

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240621

· 综 述 ·

重症监护病房获得性肌无力的超声量化评估研究进展

陶 乐^{1,2}, 邱梦宁², 赵佳琦^{1,2*}

1. 海军军医大学(第二军医大学)第二附属医院超声诊断科, 上海 200003

2. 同济大学附属上海市第四人民医院超声医学科, 上海 200434

[摘要] 重症监护病房获得性肌无力(ICU-AW)临床常见,特别是机械通气脱机延迟导致的肌肉无力和肌肉功能障碍需要进行及时、有效的影像学评估。超声作为一种无辐射、无创、实时、可重复的影像学技术,可作为肌肉结构和功能评估的首选方法,在ICU-AW病情诊断和监测中具有重要的临床价值。本文综述了超声检查在ICU-AW无创定量评估中的临床应用及研究进展。

[关键词] 重症监护病房获得性肌无力;肌少症;超声检查;剪切波弹性成像

[引用本文] 陶乐,邱梦宁,赵佳琦.重症监护病房获得性肌无力的超声量化评估研究进展[J].海军军医大学学报,2025,46(7):916-921. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240621.

Ultrasonic quantitative assessment of intensive care unit acquired weakness: research progress

TAO Le^{1,2}, QIU Mengning², ZHAO Jiaqi^{1,2*}

1. Department of Ultrasound, The Second Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200003, China

2. Department of Ultrasound, Shanghai Fourth People's Hospital, School of Medicine, Tongji University, Shanghai 200434, China

[Abstract] Intensive care unit acquired weakness (ICU-AW) is common in clinical practice, especially muscle weakness and muscle dysfunction caused by delayed weaning from mechanical ventilation, which requires timely and effective imaging evaluation. Ultrasound, as a non-radiation, non-invasive, real-time and repeatable imaging technology, can serve as a preferred method for assessing muscle structure and function, and has important clinical value in the diagnosis and monitoring of ICU-AW. This review summarizes the clinical application and research progress of ultrasound examination in the non-invasive quantitative evaluation of ICU-AW.

[Key words] intensive care unit acquired weakness; sarcopenia; ultrasonography; shear wave elastography

[Citation] TAO L, QIU M, ZHAO J. Ultrasonic quantitative assessment of intensive care unit acquired weakness: research progress[J]. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(7): 916-921. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240621.

ICU患者因住院周期长,常出现肌肉萎缩和肌力下降,即ICU获得性肌无力(ICU acquired weakness, ICU-AW),属于临床重症患者常见的肌肉减少症^[1]。亚洲肌肉减少症工作组(Asian Working Group for Sarcopenia, AWGS)推荐双能X射线吸收仪(dual energy X-ray absorptiometry, DXA)和生物电阻抗分析(bio-electrical impedance

analysis, BIA)作为肌肉质量评估的首选方法^[2],然而DXA价格昂贵且有辐射风险,BIA虽简便但易受群体差异影响,两者均不适合临床筛查。体格检查、实验室标志物检测、肌肉活检等方法无法对ICU-AW进行精确无创评估^[3-5];MRI和CT由于设备固定无法移动,且MRI检查费用偏高、CT具有辐射暴露等问题,均不能普及用于ICU-

[收稿日期] 2024-09-04 **[接受日期]** 2024-12-17

[基金项目] 上海市虹口区卫生健康委员会医学科课题面上项目(虹卫2302-26),上海市虹口区卫生健康委员会临床重点扶持专科建设项目(HKLCFC202404),同济大学附属上海市第四人民医院学科助推计划临床研究重点项目(SY-XKZT-2023-2002)。Supported by General Program of Medical Research Project of Health Commission of Shanghai Hongkou District (HW2302-26), Clinical Key Supporting Project of Health Commission of Shanghai Hongkou District (HKLCFC202404), and Clinical Key Research Project in Discipline-Driven Plan of Shanghai Fourth People's Hospital Affiliated to Tongji University (SY-XKZT-2023-2002).

[作者简介] 陶 乐,硕士生,主治医师. E-mail: taolele2021@163.com

*通信作者(Corresponding author). E-mail: qiqiblue67@163.com

AW患者的肌肉状态监测^[6-7]。近年来,在ICU临床实践中,超声检查因能实时动态成像、无辐射危害、操作简便、可重复性强,已成为一种有效的病情监测和疗效评估手段,在肌骨系统中已被证明是一种有前途的肌肉质量评估和潜在分类工具^[8-9]。本文综述了超声检查在ICU-AW无创定量评估中的临床应用及研究进展。

1 临床评估 ICU-AW 肌力的主要方法

ICU-AW患者的肌肉数量、质量和力量均有所下降。临床医师通过测量患者的小腿围(小腿围男<34 cm,女<33 cm)来评估肌肉数量和质量的改变,进行肌少症的有效筛查^[2]。采用肌力评定方法评估肌肉力量,主要包括英国医学研究委员会(Medical Research Council, MRC)评分法和手持式肌力测定仪(hand-held dynamometry, HHD)握力测量,其中以MRC评分法的应用最为广泛^[10]。MRC评分法通过对患者腕、肘、肩、踝、膝及髋6个关节双侧12个肌群的评估,将肌力分为6个等级:0分(完全没有收缩反应)、1分(有轻微收缩,但不能引起关节运动)、2分(在减重状态下能做关节全范围运动)、3分(能抗重力做关节全范围运动,但不能抗阻力)、4分(能做抗重力、抗一定阻力的运动)、5分(能做抗重力、抗充分阻力的运动),总分为60分。当MRC总得分<48分即可诊断为ICU-AW,总得分<36分时则为重度ICU-AW。在针对ICU机械通气患者的前瞻性研究中,MRC总得分48分(或每个肌肉组的平均MRC得分4分)被用作定义ICU-AW的诊断临界点^[11]。然而这种评估方法具有主观经验依赖性,临床医师在区分协同肌肉肌力时存在一定困难。有学者将MRC评分法修订为4个等级:0分为瘫痪,1分为肌力丧失>50%,2分为肌力丧失<50%,3分为正常;MRC总得分<24分则可诊断为ICU-AW。然而,MRC评分法对肌肉功能的细微变化不灵敏,无法评估远端肢体功能(如手部内在肌肉),而远端肢体功能可能首先受累,此时则需要结合其他方法进行评估。当患者六大关节周围肌群功能受限时,若HHD测量显示握力下降(握力男<28 kg,女<18 kg),可作为肌力评估的最佳替代方案,并据此判断为肌肉衰弱^[2]。

虽然MRC评分法和HHD测定相对简单直观,但需要受检者在清醒状态下配合完成,并且能够用

最大力量进行收缩和握力动作。在临床实践中,大多ICU患者处于昏迷、谵妄、机械通气等状态,可能失去知觉或无法配合,不能满足主动评估条件。因此,这2种方法在临床实际应用中受到一定限制。

2 临床评估 ICU-AW 肌肉质量的主要方法

DXA是目前诊断肌少症唯一具有公开推荐诊断临界值的放射学工具,能够对全身及各节段脂肪组织和肌肉质量进行测量,但具有放射性,不可在床旁使用^[12],国际肌肉萎缩工作组推荐的DXA诊断截断值受年龄、身高、体重及人种等因素的影响,因此不能一概而论。AWGS 2019年推荐使用DXA测量肌肉质量,对肌少症的诊断临界值为骨骼肌质量男<7.0 kg/m²、女<5.4 kg/m²^[2]。在日本人群中使用DXA和BIA诊断肌萎缩发现,用DXA测量的肢体肌肉质量更有效性,可用于诊断肌肉萎缩^[13]。Thackeray等^[14]使用DXA测量了ICU患者出院后1年内的身体成分变化,包括1年内的体重、全身肌肉质量、全身脂肪质量和四肢肌重等身体组成指标的变化情况,发现与对照组相比,ICU组患者1年内的全身肌肉质量较对照组平均减少0.96 kg(95% CI -1.91~-0.01 kg, $P<0.05$),全身脂肪质量较对照组平均高出6.79 kg(95% CI 4.55~9.03 kg, $P<0.001$),还发现低肌肉质量会导致ICU住院时间及机械通气时间延长,而相对较多的肌肉质量则会降低住院28 d的死亡风险。也有学者利用BIA评估ICU患者肌肉消耗及其与营养摄入的关系,发现入住ICU第7天后患者肌肉质量及BIA相位角明显减少,肌肉质量与BIA测得的相位角呈正相关^[15]。但由于存在大量的混杂因素和变量,测量某种人体成分的直接精度较低,如测量结果受水合状态和体内水分分布的影响。因此,将DXA和BIA用于量化评估ICU-AW肌肉状态的临床应用和推广受到一定限制。

3 超声量化评估 ICU-AW 的主要方法

研究表明,超声作为一种高重复性、非侵入性、操作便捷、成像模式多样的影像学工具,对ICU-AW肌肉形态结构及功能变化的可视化评估效益成本明显优于CT或MRI等其他影像学方法^[16]。而且超声检查无需患者清醒配合,可用于评估多个肌肉群,通过测量目标肌群的横截面积、厚度、回声强度和羽状角等参数的显著变化定量识别肌肉萎

缩^[17]。同时,肌肉超声技术简单易学,ICU医护人员经针对性培训后即可使用超声设备动态评估ICU患者的病情、辅助监测肌肉超声影像学指标变化,以便临床早期识别ICU-AW。

3.1 常规超声评估指标

3.1.1 肌肉横截面积 研究表明,正常健康人群下肢肌肉(股直肌、胫骨前肌、比目鱼肌)的横截面积越大,肌肉数量越多,肌力就越大,肌力和肌肉的横截面积呈正相关^[18]。在危重症患者中,下肢肌肉横截面积在疾病早期减少^[19],超声监测可见肌肉图像出现显著变化^[20]。随着ICU入住时间的延长,患者肌肉数量减少越明显,在入住ICU后的前7 d,股直肌横截面积减少约17.7%,在入住ICU 20 d后,股直肌横截面积减少可达45%^[21]。连续肌肉超声测量显示,当横截面积变化 $\geq 10\%$ 时,则考虑肌肉萎缩^[22]。

除了肢体肌群,研究还发现ICU患者在开始机械通气后数小时内即可出现膈肌萎缩,横截面积明显减少,提示膈肌无力;床旁超声动态监测膈肌功能变化可作为辅助临床危重症患者风险分层的快速方法^[23]。因此,对于ICU患者,特别是接受体外膜肺氧合(extracorporeal membrane oxygenation, ECMO)住院治疗者,肌肉横截面积可作为评估ICU-AW患者肌肉萎缩的可靠指标,帮助临床早期判断患者肌力水平,早期识别ICU-AW并协助制定有效的干预策略。

3.1.2 肌肉厚度 超声测量肌肉厚度作为一种评估肌肉数量的方法,已得到广泛应用^[24]。在ICU患者住院期间,超声测量显示股直肌或股四头肌厚度下降明显,可用于定量评估肌肉萎缩程度^[22]。研究表明,ICU床旁超声可监测急性肾损伤患者的股四头肌和股中间肌厚度变化,为肌肉萎缩诊断提供客观依据^[25]。ICU机械通气患者随着住院时间的延长,股外侧肌的肌肉厚度也随之下降,且在第6天测量的肌肉厚度明显减少^[26],住院第10天后下降显著,可达10%^[27],表明肌肉厚度值与ICU住院时间呈负相关。肌肉数量减少伴随肌力下降,导致患者ICU住院并发症的发生风险和死亡率增加,因此,通过ICU床旁超声测量肌肉厚度量化肌肉数量减少或肌无力,可评估ICU患者的营养状况和预后^[28]。但目前有关ICU-AW患者肌肉厚度变化的研究多数为观察性研究,样本量较小,且测量部位及测量方法无统一标准,肌肉厚度变化及其与病情严重程度、预后的相关性仍需进一步研究阐明。

3.1.3 肌肉回声强度 一般情况下,正常肌肉组织呈低回声,异常肌肉组织因脂肪含量或纤维成分增多,回声多增强^[29],因此,量化评估肌肉回声强度有助于获得肌肉质量的组成信息。ICU-AW患者随着住院时间的延长,分解代谢大于合成代谢,正常的肌肉组织逐渐被脂肪组织取代或出现纤维化,超声图像上肌肉回声强度也发生相应变化,被半定量分为4个等级:均质低回声、异质低回声、脂肪浸润及伴有筋膜炎和/或坏死^[30],特别是股四头肌(股直肌)的回声强度和肌肉功能有很强的相关性^[31]。有研究者对154例患者在ICU入住时、入住ICU后每周1次、清醒时、ICU转出时和出院时,对股直肌的横截面积和回声强度进行了超声监测,发现股直肌横截面积在入住ICU最初7 d内每天损失高达2%,伴随有回声增强,提示正常肌肉组织大量减少,回声强度升高可能表明液体浸润、脂肪组织和肌肉质量下降^[32]。推测ICU患者可能因长时间卧床、机体炎症反应和氧化应激、蛋白质分解增加且合成减少等因素导致危重型肌病而出现ICU-AW,超声图像上多表现为肌肉回声不均匀增强,且超声回声强度分级被证实与肌肉活检病理结果相关。这种采用非侵入性量表评估ICU-AW肌肉回声强度的方法有一定的主观性,而联合计算机视觉技术检测肌肉回声平均灰度水平的分析结果则较超声医师肉眼主观判图更加量化、更准确和客观。需要注意的是,肌肉回声强度测量值是通过超声图像像素的灰度分析获得,计算耗时稍长,需要建立正常参考值,且回声强度检测易受动态范围(dynamic range)、灰度图(gray scale image)、线密度(linear density)、Iclear(evaluation of a novel external neuromodulation device)等设备参数设置或患者自身因素影响^[33],如果能够结合其他肌肉超声测量指标或许能够更好地无创定量评估ICU-AW患者的肌肉状态。

3.1.4 肌肉羽状角 肌肉纤维进入腱膜的角度被称为羽状角,能够直观反映肌肉结构及力量,角度越大,产生的肌肉力量越大^[34]。超声监测发现下肢肌肉羽状角的变化对ICU-AW评估具有很高的诊断准确性,在患者入住ICU第5天即出现股四头肌肌肉厚度、横截面积和羽状角减小,这可帮助临床早期识别肌肉萎缩^[18]。

因此,常规超声检测肌肉厚度、横截面积和羽状角的变化可用于ICU-AW评估,推测如采用3种超声

指标联合评估可能会更有效地预测 ICU-AW 肌肉质量的减少。但目前相关的大样本多中心研究尚少,羽状角减小与肌肉萎缩的内在关系还需进一步研究。

3.2 超声新技术应用 随着超声设备的迭代更新,肌肉超声新技术也被应用于 ICU-AW 的肌肉评估。有学者在常规二维灰阶超声基础上叠加超声剪切波弹性成像技术(shear wave elastography, SWE)^[35],评估静态条件下 ICU 危重患者股直肌和股中间肌的肌肉厚度、横截面积、羽状角及剪切波弹性定量参数,发现 ICU-AW 患者的股直肌和股中间肌的剪切波弹性定量参数明显增高,其中股中间肌的剪切波弹性模量值变化尤为明显,表明通过 SWE 技术评估 ICU-AW 患者肌肉硬度变化可为临床提供肌肉质地层面的影像学依据。也有学者认为,高剪切模量值与肌肉僵硬有关,而低剪切模量值与慢性肌病的肌肉萎缩有关^[36],如长期机械通气的 ICU 患者股直肌硬度 SWE 测值(kPa)显著增高,ROC 曲线的 AUC 值为 0.97^[30],表明 ICU 长期住院患者的肌肉更僵硬可能与肌肉纤维化增加有关。

有研究者在利用二维灰阶超声多参数检测 ICU-AW 患者的股直肌厚度、肌肉横截面积、回声等级基础上,叠加使用彩色多普勒血流显像评估股四头肌内部血管化改变,并采用 M 型模式明确是否存在肌束震颤,发现 ICU-AW 患者相应肌肉横截面积和厚度均显著降低,中央肌腱厚度显著增加,部分病例股四头肌的肌肉内血流和肌束纤维颤动也显著降低^[31]。随着肌骨超声设备性能的不断拓展,联合使用 SWE、超微血流成像(superb microvascular imaging, SMI)和超声造影(contrast enhanced ultrasound, CEUS)等新技术可评估 ICU 患者的股直肌肌肉消耗情况。通过 SMI 观察到 53.8% 的 ICU-AW 患者股直肌肌肉内微血流分布低于对照组($P < 0.001$),CEUS 检出 ICU-AW 肌肉内微循环灌注减少(AUC=0.8),SWE 测值增高提示 ICU-AW 患者肌肉弹性力学性能减弱^[30]。这些超声新技术指标联合监测可直观反映 ICU-AW 患者肌肉形态结构、循环灌注、弹性质地等方面的综合信息,对预测 ICU 重症患者治疗后肌肉康复和功能恢复具有较高的诊断效能。

3.3 计算机技术辅助超声诊断应用 近年来,随着计算机技术的快速发展,基于计算机辅助诊断的图像定量分析技术已被证实能够增强超声图像信息的

客观性和可解释性,为肌肉疾病的超声诊断提供更加客观、精准的定量手段^[37]。正常肌肉组织在二维灰阶超声图像上通常表现为低回声,并夹杂散布肌束内或肌束间的结缔组织高回声,表现出特定的纹理结构层次。目前很多学者已将计算机辅助骨骼肌纹理定量识别应用于实验研究或临床实践。笔者团队曾采用二维灰阶高频超声检测上臂肌肉单纯急性挫伤患者的局部肌肉二维超声图像,针对挫伤区局部肌束回声增强、肌纤维层次紊乱、纹理模糊、回声变化较周边肌纹理正常区显著等图像特点,采用自主专利“骨骼肌损伤超声图像纹理定量分析的强度界面多级分解法”和“结构化信息极大分解法”实现计算机技术对肌肉损伤区域模糊边缘的分割,提取上臂肌肉纹理灰度值的均值、灰度值的标准差、纹理基元形状的不规则度、纹理基元的平均大小、纹理的密致性及纹理分布的均匀性、方向性和周期性 8 个特征参数,以表征超声图像上肌纤维粗糙度、复杂度及均匀性,用于定量分析急性挫伤后肌肉纹理特征变化^[38]。也有学者采用肌肉灰阶超声图像纹理分析技术评估肌源性疾病,通过实时人工智能工具对 75 例患者的肌肉超声数据进行纹理分析,结果显示该方法区分正常与异常肌肉组织的准确率达 78%,能够辅助神经肌肉疾病的评估^[39]。因此,计算机技术辅助肌肉灰阶超声纹理分析可以作为一种非侵入性评估肌源性疾病的有效手段。

还有学者将二维灰阶超声图像纹理特征与 SWE 速度指标相结合,对疾病肌肉进行评价。Liu 等^[40]采用局部二值模式提取肱二头肌超声图像的熵和能量参量,同时通过横、纵切面的剪切波速度评估肌肉硬度,并探讨痉挛肌肉的回声纹理特征、肌肉硬度与功能表现之间的关系。该研究结果证实,轻瘫组肱二头肌的剪切波速度明显快于非轻瘫组,2 种纹理特征熵和能量均与纵向面上的剪切波速度显著相关。这种局部二值模式量化评估肌肉质量变化和辅助诊断肌肉性能的算法充分整合了超声回波灰阶纹理、肌肉黏弹性和各向异性等特征,适用于评估更加复杂化的肌肉疾病模型。当然,进行计算机图像分割和测量仍需要人工标注和手动操作,具有一定的主观性,对于复杂图像的自动分析仍有所欠缺,如通过人工智能方法自动进行图像分割并进行全自动检测,则有助于优化当前 ICU-AW 肌肉超声图像定量分析方法,推动其在重症医学临床实践中的有效实施。

4 小结和展望

ICU-AW 是 ICU 重症患者并发的一种肌肉减少症,诸多影像学方法可用于 ICU-AW 的无创诊断评估。相较于其他影像学手段,超声具有实时无创、便携经济、精确量化、可多次重复的独特优势,成为 ICU-AW 可视化诊断及量化监测的有力工具。作为一种非侵入性的测量方法,尤其是新型超声技术,在传统 CT、MRI 及常规超声对 ICU-AW 患者肌肉进行定性(肌肉力量下降)、定量(肌肉数量、质量减少)评估基础上,增加了对肌肉血流灌注、弹性质地、肌肉纹理等方面的综合评估,提高了多参数超声全面评估 ICU-AW 的系统性和完整性。然而,目前研究不可避免存在以下局限性:肌肉超声检测切面获取仍具有相对主观性,与医师操作手法有关;尚无最佳观察指标和诊断截断参考值,需要统一操作标准及进行同质化规范;不同肌肉测量部位的选择对于诊断效能的影响仍需进一步探究,超声新技术指标的综合运用还需要规范和普及。相信随着人工智能技术在医工交叉领域研究的深入,未来会出现更多新颖、有价值的肌肉质量评估工具,通过肌肉超声多参数图像人工智能自动识别与定量分析,有望进一步提高对 ICU-AW 的诊断准确度和监测精准性。

[参考文献]

- [1] PUTHUCHEARY Z A, RAWAL J, MCPHAIL M, et al. Acute skeletal muscle wasting in critical illness[J]. *JAMA*, 2013, 310(15): 1591-1600. DOI: 10.1001/jama.2013.278481.
- [2] CHEN L K, WOO J, ASSANTACHAI P, et al. Asian working group for sarcopenia: 2019 consensus update on sarcopenia diagnosis and treatment[J]. *J Am Med Dir Assoc*, 2020, 21(3): 300-307.e2. DOI: 10.1016/j.jamda.2019.12.012.
- [3] PLAUT T, WEISS L. Electrodiagnostic evaluation of critical illness neuropathy[M/OL]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2025. (2022-09-26) [2024-09-03]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK562270/>.
- [4] INAN B, BEKIRCAN-KURT C E, ERGUL-ULGER Z, et al. Multimodal assessment of intensive care unit-acquired weakness in severe stroke patients[J]. *Acta Neurol Belg*, 2022, 122(5): 1313-1321. DOI: 10.1007/s13760-022-02009-9.
- [5] ATTWELL C, SAUTEREL L, JÖHR J, et al. Early detection of ICU-acquired weakness in septic shock patients ventilated longer than 72 h[J]. *BMC Pulm Med*, 2022, 22(1): 466. DOI: 10.1186/s12890-022-02193-7.
- [6] ABE R, SHIMAZUI T, SUGO M, et al. Achievement of adequate nutrition contributes to maintaining the skeletal muscle area in patients with sepsis undergoing early mobilization: a retrospective observational study[J]. *BMC Nutr*, 2024, 10(1): 32. DOI: 10.1186/s40795-024-00846-w.
- [7] REHMANN R, ENAX-KRUMOVA E, MEYER-FRIEBEM C H, et al. Quantitative muscle MRI displays clinically relevant myostructural abnormalities in long-term ICU-survivors: a case-control study[J]. *BMC Med Imaging*, 2023, 23(1): 38. DOI: 10.1186/s12880-023-00995-7.
- [8] ROBBA C, WONG A, POOLE D, et al. Basic ultrasound head-to-toe skills for intensivists in the general and neuro intensive care unit population: consensus and expert recommendations of the European Society of Intensive Care Medicine[J]. *Intensive Care Med*, 2021, 47(12): 1347-1367. DOI: 10.1007/s00134-021-06486-z.
- [9] JORGENSEN S P, CARTWRIGHT M S, NORBURY J. Neuromuscular ultrasound: indications in the electrodiagnostic laboratory[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2022, 101(1): 78-88. DOI: 10.1097/PHM.0000000000001790.
- [10] O'BRIEN M. Aids to the examination of the peripheral nervous system: 6th edition[J]. *Pract Neurol*, 2023, 23(3): 263-264. DOI: 10.1136/pn-2022-003686.
- [11] DE JONGHE B, SHARSHAR T, LEFAUCHEUR J P, et al. Paresis acquired in the intensive care unit: a prospective multicenter study[J]. *JAMA*, 2002, 288(22): 2859-2867. DOI: 10.1001/jama.288.22.2859.
- [12] DENGEL D R, STUDEE H R, JUCKETT W T, et al. Muscle-to-bone ratio in NCAA division I collegiate football players by position[J]. *J Strength Cond Res*, 2024, 38(9): 1607-1612. DOI: 10.1519/jsc.0000000000004853.
- [13] YAMADA Y, YAMADA M, YOSHIDA T, et al. Validating muscle mass cutoffs of four international sarcopenia-working groups in Japanese people using DXA and BIA[J]. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2021, 12(4): 1000-1010. DOI: 10.1002/jcsm.12732.
- [14] THACKERAY M, KOTOWICZ M A, PASCO J A, et al. Changes in body composition in the year following critical illness: a case-control study[J]. *J Crit Care*, 2022, 71: 154043. DOI: 10.1016/j.jcrc.2022.154043.
- [15] DEANA C, GUNST J, DE ROSA S, et al. Bioimpedance-assessed muscle wasting and its relation to nutritional intake during the first week of ICU: a pre-planned secondary analysis of Nutriti Study[J]. *Ann Intensive Care*, 2024, 14(1): 29. DOI: 10.1186/s13613-024-01262-w.
- [16] KLAWITTER F, WALTER U, AXER H, et al. [Intensive care unit-acquired weakness—diagnostic value of neuromuscular ultrasound][J]. *Anaesthesiologie*, 2023, 72(8): 543-554. DOI: 10.1007/s00101-023-01300-5.
- [17] VAN RUIJVEN I M, STAPEL S N, MOLINGER J, et al. Monitoring muscle mass using ultrasound: a key role in critical care[J]. *Curr Opin Crit Care*, 2021, 27(4): 354-360. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000846.
- [18] PAOLO F, VALENTINA D G, SILVIA C, et al. The possible predictive value of muscle ultrasound in the diagnosis of ICUAW in long-term critically ill patients[J]. *J Crit Care*, 2022, 71: 154104. DOI: 10.1016/j.jcrc.2022.154104.

- [19] YAO H, 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.
- [20] JAIN A, SANKAR J, KABRA S K, et al. Evaluation of changes in quadriceps femoris muscle in critically ill children using ultrasonography[J]. *Indian J Pediatr*, 2023, 90(6): 541-547. DOI: 10.1007/s12098-022-04220-1.
- [21] FAZZINI B, MÄRKL T, COSTAS C, et al. The rate and assessment of muscle wasting during critical illness: a systematic review and meta-analysis[J]. *Crit Care*, 2023, 27(1): 2. DOI: 10.1186/s13054-022-04253-0.
- [22] ZHANG W, WU J, GU Q, et al. Changes in muscle ultrasound for the diagnosis of intensive care unit acquired weakness in critically ill patients[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 18280. DOI: 10.1038/s41598-021-97680-y.
- [23] DAMS K, DE MEYER G R, 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.
- [24] WEINEL L M, SUMMERS M J, CHAPPLE L A. Ultrasonography to measure quadriceps muscle in critically ill patients: a literature review of reported methodologies[J]. *Anaesth Intensive Care*, 2019, 47(5): 423-434. DOI: 10.1177/0310057X19875152.
- [25] SABATINO A, MAGGIORE U, REGOLISTI G, et al. Ultrasound for non-invasive assessment and monitoring of quadriceps muscle thickness in critically ill patients with acute kidney injury[J]. *Front Nutr*, 2021, 8: 622823. DOI: 10.3389/fnut.2021.622823.
- [26] HOFFMANN R M, ARIAGNO K A, PHAM I V, et al. Ultrasound assessment of quadriceps femoris muscle thickness in critically ill children[J]. *Pediatr Crit Care Med*, 2021, 22(10): 889-897. DOI: 10.1097/PCC.0000000000002747.
- [27] DRESEN E, WEIßBRICH C, FIMMERS R, et al. Medical high-protein nutrition therapy and loss of muscle mass in adult ICU patients: a randomized controlled trial[J]. *Clin Nutr*, 2021, 40(4): 1562-1570. DOI: 10.1016/j.clnu.2021.02.021.
- [28] RAJAGOPAL K, VIJAYAN D, THOMAS S M. 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.
- [29] EL-ANSARY D, MARSHALL C J, FARRAGHER J, et al. Architectural anatomy of the quadriceps and the relationship with muscle strength: an observational study utilising real-time ultrasound in healthy adults[J]. *J Anat*, 2021, 239(4): 847-855. DOI: 10.1111/joa.13497.
- [30] HERNÁNDEZ-SOCORRO C R, SAAVEDRA P, LÓPEZ-FERNÁNDEZ J C, et al. Novel high-quality sonographic methods to diagnose muscle wasting in long-stay critically ill patients: shear wave elastography, superb microvascular imaging and contrast-enhanced ultrasound[J]. *Nutrients*, 2021, 13(7): 2224. DOI: 10.3390/nu13072224.
- [31] NAGAE M, UMEGAKI H, YOSHIKO A, et al. Muscle ultrasound and its application to point-of-care ultrasonography: a narrative review[J]. *Ann Med*, 2023, 55(1): 190-197. DOI: 10.1080/07853890.2022.2157871.
- [32] ROLLINSON T C, 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.
- [33] FU H, WANG L, ZHANG W, et al. Diagnostic test accuracy of ultrasound for sarcopenia diagnosis: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, 2023, 14(1): 57-70. DOI: 10.1002/jcsm.13149.
- [34] GUPTA M, LEHL S S, LAMBAA S. Ultrasonography for assessment of sarcopenia: a primer[J]. *J Midlife Health*, 2022, 13(4): 269-277. DOI: 10.4103/jmh.jmh_234_22.
- [35] 尹思舒. 超声剪切波弹性成像评价重症监护室获得性肌无力[D]. 广州:南方医科大学, 2022.
- [36] JAVED N, GHAZANFAR H, JYALA A, et al. Associations of real-time ultrasound and strain and shear wave elastography with gastrointestinal organs: a systematic review[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(21): 3302. DOI: 10.3390/diagnostics13213302.
- [37] KLAWITTER F, WALTER U, AXER H, et al. Neuromuscular ultrasound in intensive care unit-acquired weakness: current state and future directions[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2023, 59(5): 844. DOI: 10.3390/medicina59050844.
- [38] 赵佳琦, 贾兰婷, 徐琪, 等. 计算机辅助定量评价肌肉急性挫伤后高频超声二维图像纹理特征变化[J]. 第二军医大学学报, 2020, 41(1): 6-10. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2020.01.0006.
- [39] ZHAO J Q, JIA L T, XU Q, et al. Computer-aided quantitative evaluation of texture features extracted from two-dimensional high frequency ultrasonograms after acute muscle contusion[J]. *Acad J Sec Mil Med Univ*, 2020, 41(1): 6-10. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2020.01.0006.
- [40] NODA Y, SEKIGUCHI K, MATOBA S, et al. Real-time artificial intelligence-based texture analysis of muscle ultrasound data for neuromuscular disorder assessment[J]. *Clin Neurophysiol Pract*, 2024, 9: 242-248. DOI: 10.1016/j.cnp.2024.08.003.
- [41] LIU P T, WEI T S, CHING C T. Quantitative ultrasound texture analysis to assess the spastic muscles in stroke patients[J]. *Appl Sci*, 2021, 11(1): 11. DOI: 10.3390/app11010011.