

重症超声技术在脓毒症相关并发症中的临床应用与研究进展

王志成^{1*}, 李文强^{2#}

¹济宁医学院临床医学院(附属医院), 山东 济宁

²济宁市第一人民医院重症医学科, 山东 济宁

收稿日期: 2026年7月18日; 录用日期: 2026年8月11日; 发布日期: 2026年8月20日

摘要

脓毒症是一种由感染引起的全身性炎症反应, 常伴随多个器官的功能障碍及病理损伤, 是重症医学中的挑战性疾病之一。近年来, 重症超声技术(Point-Of-Care Ultrasound, POCUS)凭借无创、实时、床旁可重复评估等特点, 在脓毒症相关并发症的诊断、监测和治疗决策中得到广泛应用。本文综述了重症超声在脓毒症相关心功能障碍、急性呼吸窘迫综合征(ARDS)、急性肾损伤(AKI)、脓毒症性脑病(SAE)和肠道功能障碍与缺血中的应用, 并重点补充其在多模态监测体系中的地位。通过经胸心脏超声、肺部超声、多普勒、CEUS和TCD等技术, 临床医生不仅能够早期识别多系统并发症, 还可将VTI、LVEF、B-lines、肾血流阻力指数等超声指标与心排量指数、SVV、乳酸、肌酐、氧合指数等有创或实验室指标相互印证, 从而为液体复苏、血管活性药物调整、呼吸支持和器官灌注评估提供更完整的证据链。本文同时讨论了超声技术在实践中面临的挑战, 如操作者依赖性强、标准化不足及高质量循证研究仍有限等。未来, 随着人工智能和图像自动识别技术的发展, 以及培训体系的完善, 重症超声将在脓毒症个体化治疗和精准管理中发挥更加核心的作用。

关键词

脓毒症, 重症超声, 脓毒症相关并发症

Clinical Applications and Research Advances of Critical Care Ultrasound in Sepsis-Related Complications

Zhicheng Wang^{1*}, Wenqiang Li^{2#}

¹School of Clinical Medicine, Jining Medical University/Affiliated Hospital of Jining Medical University, Jining Shandong

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王志成, 李文强. 重症超声技术在脓毒症相关并发症中的临床应用与研究进展[J]. 临床个性化医学, 2026, 5(4): 348-357. DOI: 10.12677/jcpm.2026.54259

²Department of Critical Care Medicine, Jining First People's Hospital, Jining Shandong

Received: July 18, 2026; accepted: August 11, 2026; published: August 20, 2026

Abstract

Sepsis is a systemic inflammatory response triggered by infection and is frequently accompanied by multiple organ dysfunction and pathological injury, making it one of the most challenging conditions in critical care. In recent years, point-of-care ultrasound (POCUS) has been widely applied in the diagnosis and management of sepsis-related complications because it is non-invasive, real-time, repeatable, and feasible at the bedside. This review summarizes the application of critical care ultrasound in sepsis-related cardiac dysfunction, acute respiratory distress syndrome (ARDS), acute kidney injury (AKI), sepsis-associated encephalopathy (SAE), and gastrointestinal dysfunction and ischemia, with an additional focus on the role of POCUS within multimodal monitoring. By integrating transthoracic echocardiography, lung ultrasound, Doppler ultrasound, contrast-enhanced ultrasound (CEUS), and transcranial Doppler (TCD), clinicians can not only detect multi-organ complications early but also cross-validate ultrasound parameters such as VTI, LVEF, B-lines, and renal resistance indices with invasive hemodynamic variables and laboratory indicators including cardiac index, stroke volume variation, lactate, creatinine, and oxygenation indices. This multimodal approach provides a more comprehensive evidence chain for fluid resuscitation, vasoactive drug titration, respiratory support, and organ perfusion assessment. The review also discusses practical limitations of ultrasound, including operator dependence, insufficient standardization, and the need for more high-quality evidence. Looking ahead, with the development of artificial intelligence and automated image recognition technologies, as well as the improvement of training systems, critical care ultrasound is expected to play an increasingly central role in personalized treatment and precise management of sepsis.

Keywords

Sepsis, Point-of-Care Ultrasound, Sepsis-Related Complications

Copyright © 2026 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

脓毒症及其引起的多器官功能障碍是ICU最常见的致死性疾病之一,研究表明,全球脓毒症年发病率为276~678/100,000人,病死率为22.5%至26.7% [1] [2]。Kubler等人进行的一项研究分析了波兰严重败血症的病程和结果,发现入住ICU的患者病情严重。9%~12%的患者在入院时诊断出1或2个器官功能障碍,而大多数患者(89%)在入住ICU期间出现3个或更多器官功能障碍[3]。及时识别并发症、准确评估器官功能状态对于治疗决策和改善预后至关重要。传统评估手段如实验室检查和放射影像虽具价值,但在重症患者中存在一定局限,难以满足对“实时、动态、无创”的监测需求[4]。重症超声技术(Point-of-Care Ultrasound, POCUS)以其高灵敏度、可床旁操作等特性,为临床提供了更为精准、高效的诊疗工具[5]。本文将系统评述重症超声技术在脓毒症相关多系统并发症中的临床应用及研究进展,进一步探讨其价值与未来发展方向。现就重症超声技术在脓毒症相关并发症中的临床应用与研究进展予以综述。

2. 重症超声技术与脓毒症概述

脓毒症的发生通常伴随着全身性炎症反应和器官功能障碍, 其病理生理机制复杂, 涉及免疫反应、微循环障碍和代谢紊乱等多个方面[6]。脓毒症引起的器官损伤可能迅速进展, 导致病情的急剧恶化, 因此, 早期的病情评估和实时的动态监测对临床决策至关重要[7]。传统的影像学检查在脓毒症患者中存在一定的局限性, 尤其是在监测器官功能变化、评估血流动力学状态以及指导液体管理等方面。而重症超声技术通过床旁实时评估心血管、呼吸、腹部以及肾脏等系统的功能状态, 能够为临床医生提供更为准确和及时的病理生理信息, 显著提高脓毒症的诊断效率和治疗精确度[8]。

重症超声技术通过对心脏、肺部、肾脏和腹腔等器官系统的动态评估, 帮助临床医生监测脓毒症引起的多脏器损害。心脏超声能够评估脓毒症性休克引起的血流动力学变化, 为液体复苏和血管收缩药物的使用提供依据[9][10]。肺部超声则通过观察肺水肿、ARDS及气胸等变化, 实时反映肺部病变的进展, 指导呼吸支持的调整[11]。腹部超声能够帮助评估肝脏和肠道的功能状态, 及时发现脓毒症相关的肝损伤、腹水等并发症[12]。肾脏超声则通过评估肾脏血流和功能, 帮助识别急性肾损伤, 并提供液体管理和透析的指导依据[13]。

总之, 重症超声技术在脓毒症的早期诊断、并发症监测、治疗决策和预后评估中都发挥了重要作用。随着技术的不断进步和临床应用的逐步深入, 超声技术有望成为脓毒症管理中不可或缺的工具, 为患者的个体化治疗和精准医疗提供更加坚实的支持。

3. 重症超声技术在脓毒症相关并发症中的临床应用

3.1. 重症超声技术在脓毒症性休克与脓毒症相关性心肌病中的应用

心肌功能障碍是脓毒症, 尤其是脓毒症性休克中的常见表现, 其发生机制涉及炎症介质释放、线粒体功能障碍、冠脉微循环异常和心肌细胞钙稳态紊乱等多个环节[10]。脓毒症相关心肌病(SCM)可表现为左室或右室收缩功能障碍、舒张功能障碍, 也可呈现高动力循环状态下的相对心肌储备不足, 且与循环衰竭和不良预后密切相关[14]。因此, 床旁、动态、可重复地识别心肌受累类型, 是脓毒症性休克治疗决策中的关键环节。

超声心动图被认为是脓毒症性休克患者心功能与血流动力学评估的一线方法, 经胸超声心动图(TTE)可同时观察左室收缩、舒张功能、右室负荷、容量状态及每搏输出量变化[15]。组织多普勒成像(TDI)的价值不宜仅笼统概括为“更敏感”, 而应区分不同参数和研究终点。Sturgess等开展的前瞻性观察研究纳入21例成人脓毒症性休克患者, 在休克发生72h内完成TTE和心脏生物标志物检测, 结果显示TDI舒张功能指标 E/e' 在死亡风险判别中优于BNP、NT-proBNP和肌钙蛋白T; E/e' 预测院内死亡的AUC为0.94, 截断值14.5时敏感性为100%、特异性为83%, 且在校正APACHE III评分、既往心脏病、液体平衡和舒张功能分级后仍为院内死亡的独立预测因子[16]。这一结果提示, TDI在脓毒症性休克中的优势主要体现在对左室舒张功能和充盈压改变的定量评估, 而不是单纯替代LVEF。

相反, 关于TDI收缩期 s' 波的证据并不一致。Sanfilippo等纳入13项研究、1197例脓毒症患者的系统评价和Meta分析显示, s' 波在生存者与非生存者之间差异并无统计学意义, 提示“ s' 波越低则死亡风险越高”的结论并不稳固[17]。因此, 在综述中更合适的表述是: TDI可作为LVEF之外的补充工具, 尤其适用于评价舒张功能和充盈压力; 但其结果应结合机械通气状态、血管活性药物剂量、心律和容量负荷共同解读。斑点追踪超声心动图(STE)测得的整体纵向应变(GLS)则显示出较稳定的预后价值。一项纳入8项研究、794例严重脓毒症或脓毒症性休克患者的Meta分析显示, GLS恶化与死亡率升高相关(标准化均数差-0.26, 95% CI: -0.47~-0.04, $P=0.02$), 而同一人群中LVEF与死亡率无显著相关($P=0.83$)

[18]。这说明在负荷条件剧烈波动的脓毒症休克中, GLS 可能较 LVEF 更能反映内在心肌损伤, 但仍需注意不同设备、软件和图像质量对测量一致性的影响。

另外, 右心室功能的评估在脓毒性休克中尤其重要。右心室与左心室在循环系统中的相互依赖关系使得右心室功能障碍可能加剧心血管不全, 影响整体预后[10]。右心室的功能通常通过三尖瓣环平面收缩偏移(TAPSE)和右心室面积变化率(FAC)等指标来评估, 这些指标能有效反映右心室的收缩能力[19]。研究发现, 右心室功能障碍的脓毒症患者, 其死亡率显著高于右心室功能正常的患者[20], TAPSE 小于 1.6 cm 或右心室射血分数低于 35%的患者, 预后较差[14] [20] [21]。

尽管已有研究提示左心室舒张功能障碍、GLS 异常以及右心室功能障碍与脓毒症患者预后相关, 但现有证据仍具有异质性。LVEF 受前负荷、后负荷和血管扩张状态影响明显; TDI 存在角度依赖和局部取样局限; STE 对图像质量、帧频和分析软件较敏感。对于机械通气、快速补液、去甲肾上腺素或正性肌力药使用中的患者, 单一超声参数可能不足以解释循环状态。因此, 心脏超声更适合作为连续血流动力学评估的一部分, 与 MAP、乳酸、尿量、心肌损伤标志物、CI 和动态容量反应指标联合判断, 以提高治疗决策的可靠性。

3.2. 重症超声技术在脓毒症相关急性呼吸窘迫综合征中的应用

重症超声, 特别是肺部超声(Lung Ultrasound, LUS), 在脓毒症相关急性呼吸窘迫综合征(ARDS)中的临床应用日益凸显[22]。ARDS 作为脓毒症常见的严重并发症, 其病理机制主要表现为肺毛细血管通透性增加、非心源性肺水肿以及弥漫性肺泡损伤, 进而导致顽固性低氧血症[23]。相比传统影像检查, LUS 具有无创、便捷、可床旁操作和重复性强的优势, 能在不影响患者生命支持的前提下, 快速识别肺间质水肿、肺实变、B 线增多、白肺征及肺滑动消失等典型表现, 为 ARDS 的早期诊断提供可靠依据, 尤其适用于病情危重、无法搬动或感染风险高的重症患者[24] [25]。

目前, LUS 在 ICU 中的价值主要体现在两方面: 一是提高床旁识别肺水肿、实变和气胸等病变的效率; 二是通过连续评分反映肺含水量和通气状态的动态变化, 从而辅助液体管理和呼吸支持调整[25]。在一项儿童 ARDS 前瞻性观察研究中, LUS 评分可用于评估 CRRT 治疗后肺水肿变化, 并与氧合和肺顺应性改善趋势相对应[26]。另有新生儿 ARDS 研究显示, 血清 miR-92、miR-122 联合肺超声评分预测不良转归的 AUC 达到 0.920, 提示 LUS 与实验室指标联合后可提高风险分层能力[27]。这些研究均说明, LUS 的优势并非单纯“看得更清楚”, 而在于可将 B-lines、胸膜线异常、实变范围和 LUS 评分转化为可重复的半定量指标, 用于连续评价病情变化。

此外, LUS 也正在从诊断工具向治疗分层工具延伸。PEGASUS 是一项正在开展的国际多中心随机临床试验方案, 研究者拟依据 LUS 将 ARDS 肺部形态分为“局灶型”和“非局灶型”, 并分别匹配不同机械通气策略, 例如局灶型更强调俯卧位通气, 非局灶型则更强调较高 PEEP 和肺复张策略[28]。需要注意的是, 该研究目前属于试验方案阶段, 其意义在于提出了“以超声表型指导通气”的研究框架, 而不能直接表述为已经证实改善预后。对于脓毒症相关 ARDS, LUS 应与 PaO₂/FiO₂、PEEP、肺顺应性、液体平衡和血流动力学指标联合解释, 避免仅依据 B-lines 增加即简单判断为容量过负荷或单纯肺水肿。

3.3. 重症超声技术在急性肾损伤中的应用

重症超声技术在脓毒症引发的急性肾损伤(AKI)中的应用具有重要的临床价值, 特别是在早期诊断、病程监测和评估治疗效果方面[29]。脓毒症引起的 AKI 涉及复杂的病理机制, 包括肾脏微循环的障碍和肾脏灌注不足, 这些变化通过传统的血清学标志物难以及时准确捕捉[30]。传统的诊断方法, 如血清肌酐水平和尿量的变化, 往往反应滞后且不够敏感[31], 而超声技术, 尤其是对比增强超声(CEUS), 则提供了

一种安全、无创且高效的替代方案。

在脓毒症相关 AKI 的临床实践中, 超声技术特别是脉冲多普勒超声和 CEUS 能够精确评估肾脏的宏观和微观灌注情况[32] [33]。研究显示, 脓毒症引发的 AKI 患者常伴随显著的肾血流量下降, 尤其是肾皮质和髓质区域的微循环受损显著[34]。通过对比增强超声, 能够定量分析肾脏微血管的时间-强度曲线(TIC), 进而监测肾脏微循环的变化, 发现血流延迟、脉冲指数和灌注效率的变化[35]。这些参数的变化与脓毒症 AKI 的严重程度密切相关, 有助于医生判断患者的预后, 并为及时调整治疗策略提供依据。

此外, CEUS 能够通过监测肾脏灌注的动态变化来评估肾脏的微循环功能, 尤其在轻度到中度的脓毒症 AKI 患者中, CEUS 已被证明能够早期识别肾脏灌注不足, 从而引导早期干预, 防止病情加重[36]。通过评估时间到峰值(TTP)、上升时间(RT)和平均传输时间(MTT), CEUS 不仅能够反映肾脏的宏观血流情况, 还能揭示微循环的变化[37], 这对于判断 AKI 的严重程度和进展至关重要。总而言之, 重症超声技术在脓毒症相关急性肾损伤中的应用提供了非侵入性实时监测, 有助于提高诊断精度和治疗评估, 但仍需进一步研究以完善其临床角色。

3.4. 重症超声技术在脓毒症性脑病中的应用

在脓毒症相关并发症中, 脓毒症性脑病(Sepsis-Associated Encephalopathy, SAE)是一种常见且具有高度致残和致死风险的神经系统表现, 其发病机制涉及炎症反应、脑微循环障碍、自主神经功能紊乱及血脑屏障破坏等多个方面[38]。近年来, 重症超声技术, 尤其是经颅多普勒超声(Transcranial Doppler, TCD), 在 SAE 的评估与监测中逐渐展现出独特优势[39]。

TCD 可实时、无创地评估颅内大动脉血流动力学状态。多个研究显示, 在 SAE 患者中, TCD 检测到的脑血流阻力指标——搏动指数(Pulsatility Index, PI)和阻力指数(Resistive Index, RI)明显升高, 提示存在脑血管阻力增高及微循环灌注障碍[40], 这一变化与意识障碍的发生密切相关。在儿童严重脓毒症或脓毒症性休克队列中, PI 和 RI 不仅能区分 SAE 与非 SAE 状态, 还能预测病死率, ROC 曲线下面积分别为 0.72 和 0.73, 提示其具有中等判别能力[41]。

此外, 有研究证实, $PI > 1.3$ 可作为 SAE 发生的临床预警信号, 且与后续谵妄的发生显著相关[42]。多变量分析亦表明, PI 升高是独立于年龄与疾病严重程度(如 APACHE II 评分)以外的独立危险因素[42]。另一项前瞻性研究指出, PI 在 SAE 患者中于病程早期(如第 1 天)显著升高, 并与重症监护病房(CAM-ICU)检测到的谵妄相一致, 提示 TCD 可用于 SAE 的早期识别和动态评估[42]。

在临床应用方面, 基于 TCD 引导的个体化血流动力学管理策略也显示出一定价值。Salem 等开展的单中心随机对照研究纳入 112 例脓毒症性脑病合并脓毒症休克患者, 将 TCD 组的去甲肾上腺素滴定目标设为 $PI < 1.3$, 对照组则按 SSC 推荐维持 $MAP \geq 65 \text{ mmHg}$; 研究以 ICU 死亡率为主要终点, 并观察 GCS 评分、SOFA 评分、脑灌注压和去甲肾上腺素用量等结局[43]。该研究提示, TCD 不仅可用于 SAE 监测, 还可能帮助识别“MAP 达标但脑灌注仍不足”的患者, 为血管活性药物个体化调整提供依据。除传统 TCD 外, 近期动物实验亦探索了超声刺激迷走神经(Vagus Nerve Stimulation, VNS)改善 SAE 的可能性, 发现超声 VNS 可改善小鼠模型中的神经元放电模式、炎症水平与行为状态, 提示超声在神经免疫调节中的潜在价值[44]。

综上所述, 经颅多普勒超声作为简便、无创的监测工具, 通过监测 PI 和 RI 反映脑血流动力学变化, 帮助脓毒症性脑病的早期诊断与治疗, 但仍需更多研究以优化其标准化应用。

3.5. 重症超声技术在肠道功能障碍与肠缺血中的应用

重症超声技术, 特别是对比增强超声(CEUS), 在脓毒症相关肠道功能障碍和肠缺血的早期诊断和管

理中, 展现出了极大的潜力。在脓毒症患者中, 肠道功能障碍通常与全身炎症反应、微循环障碍及器官灌注不足密切相关[45], 这使得肠道缺血的识别变得尤为重要。CEUS 通过使用微气泡对比剂, 可以动态评估肠壁的血流灌注情况, 帮助检测微循环功能障碍[46]。

对于肠缺血, 尤其是在脓毒症或其他严重病症中的肠道灌注不足, CEUS 能够提供比传统 B 超和 CT 更精细的血管化信息[47]。通过动态观察对比剂的灌注行为, CEUS 能够显示肠壁的早期灌注异常, 包括肠壁增厚、肠壁水肿及微血管灌注不良等表现。例如, 研究表明, CEUS 能够精确评估肠道的微循环状态, 及时发现肠道缺血和早期肠道损伤, 尤其是在脓毒症引发的肠道功能障碍中[46]。

此外, CEUS 在监测肠道微血管病变方面, 具有重要临床价值。通过对比增强超声, 能够定量评估肠道血流动态变化, 辅助判断肠道是否存在缺血或其他病变, 如肠粘膜屏障功能损伤等[48]。与传统的放射学成像方法相比, CEUS 不仅避免了辐射, 还因其非侵入性和实时监测能力[49], 成为了 ICU 和急性病房中不可或缺的诊断工具。

综上所述, 重症超声技术, 尤其是 CEUS, 在脓毒症相关肠道功能障碍与肠缺血的管理中, 能够提供有效的诊断支持。其能够为临床医生提供动态、即时的肠道微循环信息, 尤其在早期肠缺血的识别和监测中, 具有无可比拟的优势。

4. POCUS 在多模态监测中的地位

在脓毒症管理中, POCUS 不应被理解为替代有创监测或实验室检查的单一工具, 而更适合作为多模态监测体系中的“床旁功能评估接口”。2021 年 Surviving Sepsis Campaign 指南建议, 对于成人脓毒症或脓毒性休克患者, 应优先使用动态指标指导液体复苏, 而非仅依赖体格检查或静态参数; 其所列动态指标包括被动抬腿试验或液体负荷后每搏量变化、SVV、PPV 以及可获得时的超声心动图评估[50]。这一推荐为 POCUS 在血流动力学管理中的定位提供了依据: POCUS 提供器官结构和功能层面的解释, 有创监测提供连续压力、心排量或容量反应数据, 实验室检查则反映组织灌注、炎症负荷和器官损伤结果。三者相互补充, 才能更接近脓毒症患者真实的病理生理状态。

在循环监测中, 左室流出道速度时间积分(LVOT-VTI)可作为每搏量和心排量变化的床旁替代指标。Wang 等在 44 例接受机械通气的脓毒症休克患者中, 将 PiCCO 测得的心排量指数(CI)增加 $\geq 15\%$ 定义为容量反应阳性, 并比较 SVV、PPV、CVP 及 ΔVTI -LVOT 对容量反应性的预测能力。结果显示, ΔVTI -LVOT 预测容量反应性的 AUC 为 0.956, 截断值 15.9%时敏感性为 87.5%、特异性为 95%, 其判别能力优于 SVV (AUC 0.800)和 PPV (AUC 0.843) [51]。这一研究说明, 超声 VTI 并不是孤立指标, 而是可以与 CI、SVV、PPV 等有创或半有创血流动力学指标相互校验; 当 VTI 升高提示每搏量改善, 而乳酸下降、尿量改善和皮肤灌注恢复同时出现时, 液体复苏的生理合理性更强。相反, 若 VTI 无明显增加且 B-lines 增多或右室扩张加重, 则应警惕继续补液导致肺水肿或右心负荷增加。

在心肺联合评估中, LVEF、GLS、TDIE/e' 和 TAPSE/FAC 可分别反映左室收缩、舒张充盈压力和右室功能; LUS 中的 B-lines、胸膜线异常、肺实变和 LUS 评分则反映肺间质水肿、肺泡塌陷或炎症渗出。将这些指标与 MAP、CI、SVV、乳酸、中心静脉血氧饱和度、 PaO_2/FiO_2 、PEEP 和肺顺应性联合解读, 可帮助区分“低容量、低心排”“血管扩张性休克”“心源性或混合性肺水肿”以及“ARDS 主导的低氧血症”等不同情境。尤其在脓毒症相关 ARDS 中, B-lines 增加并不等同于必须利尿或限制补液; 只有当其与氧合恶化、肺顺应性下降、液体正平衡、VTI 无反应或心脏充盈压升高共同出现时, 才更支持容量耐受性下降。

在肾脏、脑和肠道灌注评估中, POCUS 同样需要嵌入多模态证据链。肾脏多普勒或 CEUS 可提示肾血流阻力升高和微循环灌注不足, 但 AKI 诊断仍需结合尿量、肌酐、肾毒性药物暴露和循环灌注状态;

TCD 的 PI、RI 可反映脑血管阻力和脑灌注风险, 但 SAE 判断仍需结合 GCS、CAM-ICU、镇静深度、代谢紊乱和感染控制情况; 肠道 CEUS 可提供肠壁灌注信息, 但肠缺血的临床判断仍需结合乳酸、腹部体征、血管活性药物剂量和 CT 等影像学证据。由此可见, POCUS 的核心地位不是“替代”其他监测, 而是将器官影像、功能参数和连续临床数据连接起来, 为复杂脓毒症患者的个体化决策提供更完整的证据框架。

5. 重症超声技术在脓毒症并发症管理中的临床价值与挑战

重症超声技术作为无创、实时、床旁可重复操作的监测工具, 已在脓毒症并发症管理中展现出重要临床价值[52]。其价值不仅在于发现结构性病变, 更在于贯穿诊断、治疗指导和动态评估全过程, 可用于评估心功能、肺水肿、肾脏灌注、肝脏血流动力学、脑血流状态和肠道微循环等多个系统。

此外, 超声参数与患者预后密切相关, 如肺 B 线、心排量趋势、肾血流动态等可用于监测病情变化和指导治疗决策。超声技术的床旁即时性, 使得动态治疗调整更为灵活, 尤其在液体管理、血流动力学支持及容量负荷评估方面的作用更加突出。

尽管重症超声技术具有显著优势, 但其推广应用仍面临挑战。首先, 技术操作依赖操作者经验, 设备质量和图像采集窗口差异较大, 影响测量结果的可重复性。其次, 虽然部分指标已有前瞻性观察研究或随机对照研究支持, 但多系统 POCUS 整合策略仍缺乏大样本、多中心、以患者重要结局为终点的高质量研究。最后, 设备普及率和培训体系仍不均衡, 特别是在基层医疗机构, 肠道 CEUS、TCD 和复杂血流动力学超声的临床渗透率仍较低[53]。

未来, 人工智能和图像自动分析技术的发展有望降低操作者依赖, 标准化培训和质量控制流程可提高图像采集与判读的一致性[54]。但在证据转化过程中仍应保持谨慎: POCUS 更适合作为临床决策的组成部分, 而不是脱离病情背景的单项诊断依据。只有在统一操作流程、明确阈值含义并通过前瞻性研究验证临床获益后, 重症超声才能更稳妥地成为脓毒症并发症管理中的核心工具。

6. 小结

重症超声技术在脓毒症相关并发症的管理中展现了较大的临床潜力, 尤其是在多系统并发症的早期诊断、治疗决策和动态评估方面。通过心脏、肺部、肾脏、脑部和肠道等多个器官系统的实时监测, 重症超声可为临床提供结构和功能层面的信息支持。在脓毒症性休克、急性呼吸窘迫综合征、急性肾损伤、脓毒症性脑病和肠道功能障碍等关键领域, 超声技术能够辅助病情监测、早期干预、液体管理和器官灌注评估。更重要的是, POCUS 应被置于多模态监测框架下, 与有创血流动力学指标、实验室检查和临床评分共同解读, 而不是作为孤立指标指导复杂决策。

然而, 重症超声的广泛应用仍面临一些挑战, 尤其是操作者经验的依赖性、设备差异和评估标准化不足等问题, 这在一定程度上限制了其普及。未来, 随着人工智能技术的不断发展、图像自动识别技术的普及以及标准化培训体系的建设, 重症超声技术有望克服这些挑战, 进一步增强其临床可用性和应用效果。此外, 通过更多大规模、多中心的高质量临床研究, 重症超声将更好地为脓毒症患者提供精准的诊疗支持, 成为脓毒症管理中不可或缺的核心工具。

参考文献

- [1] Schlappbach, L.J., Watson, R.S., Sorce, L.R., Argent, A.C., Menon, K., Hall, M.W., *et al.* (2024) International Consensus Criteria for Pediatric Sepsis and Septic Shock. *JAMA*, **331**, 665-674. <https://doi.org/10.1001/jama.2024.0179>
- [2] Fleischmann-Struzek, C. and Rudd, K. (2023) Challenges of Assessing the Burden of Sepsis. *Medizinische Klinik-Intensivmedizin und Notfallmedizin*, **118**, 68-74. <https://doi.org/10.1007/s00063-023-01088-7>

- [3] Kübler, A., Adamik, B., Ciszewicz-Adamiczka, B. and Ostrowska, E. (2015) Severe Sepsis in Intensive Care Units in Poland—A Point Prevalence Study in 2012 and 2013. *Anestezjologia Intensywna Terapia*, **47**, 315-319. <https://doi.org/10.5603/ait.2015.0047>
- [4] Elsayed, Y., Wahab, M.G.A., Mohamed, A., Fadel, N.B., Bhombal, S., Yousef, N., *et al.* (2023) Point-of-Care Ultrasound (POCUS) Protocol for Systematic Assessment of the Crashing Neonate—Expert Consensus Statement of the International Crashing Neonate Working Group. *European Journal of Pediatrics*, **182**, 53-66. <https://doi.org/10.1007/s00431-022-04636-z>
- [5] Singh, Y., Tissot, C., Fraga, M.V., Yousef, N., Cortes, R.G., Lopez, J., *et al.* (2020) International Evidence-Based Guidelines on Point of Care Ultrasound (POCUS) for Critically Ill Neonates and Children Issued by the POCUS Working Group of the European Society of Paediatric and Neonatal Intensive Care (ESPNIC). *Critical Care (London, England)*, **24**, Article No. 65. <https://doi.org/10.1186/s13054-020-2787-9>
- [6] Font, M.D., Thyagarajan, B. and Khanna, A.K. (2020) Sepsis and Septic Shock—Basics of Diagnosis, Pathophysiology and Clinical Decision Making. *Medical Clinics of North America*, **104**, 573-585. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2020.02.011>
- [7] Rababa, M., Bani Hamad, D. and Hayajneh, A.A. (2022) Sepsis Assessment and Management in Critically Ill Adults: A Systematic Review. *PLOS ONE*, **17**, e0270711. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270711>
- [8] Polyzogopoulou, E., Velliou, M., Verras, C., Ventoulis, I., Parissis, J., Osterwalder, J., *et al.* (2023) Point-of-Care Ultrasound: A Multimodal Tool for the Management of Sepsis in the Emergency Department. *Medicina (Kaunas)*, **59**, Article No. 1180. <https://doi.org/10.3390/medicina59061180>
- [9] Lima, M.R. and Silva, D. (2023) Septic Cardiomyopathy: A Narrative Review. *Revista Portuguesa de Cardiologia*, **42**, 471-481. <https://doi.org/10.1016/j.repc.2021.05.020>
- [10] Carbone, F., Liberale, L., Preda, A., Schindler, T.H. and Montecucco, F. (2022) Septic Cardiomyopathy: From Pathophysiology to the Clinical Setting. *Cells*, **11**, Article No. 2833. <https://doi.org/10.3390/cells11182833>
- [11] Mongodi, S., De Luca, D., Colombo, A., Stella, A., Santangelo, E., Corradi, F., *et al.* (2021) Quantitative Lung Ultrasound: Technical Aspects and Clinical Applications. *Anesthesiology*, **134**, 949-965. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000003757>
- [12] Li, J.J., Boivin, Z., Bhalodkar, S. and Liu, R. (2024) Point of Care Abdominal Ultrasound. *Seminars in Ultrasound, CT and MRI*, **45**, 11-21. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2023.12.003>
- [13] Jury, D. and Shaw, A.D. (2021) Utility of Bedside Ultrasound Derived Hepatic and Renal Parenchymal Flow Patterns to Guide Management of Acute Kidney Injury. *Current Opinion in Critical Care*, **27**, 587-592. <https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000000899>
- [14] Lanspa, M.J., Cirulis, M.M., Wiley, B.M., Olsen, T.D., Wilson, E.L., Beesley, S.J., *et al.* (2021) Right Ventricular Dysfunction in Early Sepsis and Septic Shock. *Chest*, **159**, 1055-1063. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2020.09.274>
- [15] Tucker, R.V., Williams, K., Theyyunni, N. and Fung, C.M. (2022) Sepsis-Induced Cardiomyopathy Detected with Focused Cardiac Ultrasound in the Emergency Department. *The Journal of Emergency Medicine*, **63**, e91-e99. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2022.06.002>
- [16] Sturgess, D.J., Marwick, T.H., Joyce, C., Jenkins, C., Jones, M., Masci, P., *et al.* (2010) Prediction of Hospital Outcome in Septic Shock: A Prospective Comparison of Tissue Doppler and Cardiac Biomarkers. *Critical Care*, **14**, R44. <https://doi.org/10.1186/cc8931>
- [17] Sanfilippo, F., Huang, S., Messina, A., Franchi, F., Oliveri, F., Vieillard-Baron, A., *et al.* (2021) Systolic Dysfunction as Evaluated by Tissue Doppler Imaging Echocardiography and Mortality in Septic Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Critical Care*, **62**, 256-264. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2020.12.026>
- [18] Sanfilippo, F., Corredor, C., Fletcher, N., Tritapepe, L., Lorini, F.L., Arcadipane, A., *et al.* (2018) Left Ventricular Systolic Function Evaluated by Strain Echocardiography and Relationship with Mortality in Patients with Severe Sepsis or Septic Shock: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Critical Care*, **22**, Article No. 183. <https://doi.org/10.1186/s13054-018-2113-y>
- [19] Hameed, A., Condliffe, R., Swift, A.J., Alabed, S., Kiely, D.G. and Charalampopoulos, A. (2023) Assessment of Right Ventricular Function—A State of the Art. *Current Heart Failure Reports*, **20**, 194-207. <https://doi.org/10.1007/s11897-023-00600-6>
- [20] Vallabhajosyula, S., Shankar, A., Vojjini, R., Cheungpasitporn, W., Sundaragiri, P.R., DuBrock, H.M., *et al.* (2021) Impact of Right Ventricular Dysfunction on Short-Term and Long-Term Mortality in Sepsis: A Meta-Analysis of 1,373 Patients. *Chest*, **159**, 2254-2263. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2020.12.016>
- [21] Parikh, R., Thomas, A., Sharofi, A., Moallem, N., Fiscus, G. and Farber, H.W. (2024) Severe Pulmonary Hypertension-Interstitial Lung Disease Presenting as Right Ventricular Failure: Stabilisation with Intravenous Prostacyclin and Maintenance with Inhaled Prostacyclin. *ERJ Open Research*, **10**, 00659-2023. <https://doi.org/10.1183/23120541.00659-2023>

- [22] Meyer, N.J., Gattinoni, L. and Calfee, C.S. (2021) Acute Respiratory Distress Syndrome. *The Lancet*, **398**, 622-637. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(21\)00439-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(21)00439-6)
- [23] Qiao, X., Yin, J., Zheng, Z., Li, L. and Feng, X. (2024) Endothelial Cell Dynamics in Sepsis-Induced Acute Lung Injury and Acute Respiratory Distress Syndrome: Pathogenesis and Therapeutic Implications. *Cell Communication and Signaling*, **22**, Article No. 241. <https://doi.org/10.1186/s12964-024-01620-y>
- [24] Kaczka, D.W. (2024) Imaging the Lung in ARDS: A Primer. *Respiratory Care*, **69**, 1011-1024. <https://doi.org/10.4187/respcare.12061>
- [25] García-de-Acilu, M., Santafé, M. and Roca, O. (2023) Use of Thoracic Ultrasound in Acute Respiratory Distress Syndrome. *Annals of Translational Medicine*, **11**, 320-320. <https://doi.org/10.21037/atm-22-4576>
- [26] Wang, F., Wang, C., Shi, J., Shan, Y., Miao, H., Sun, T., *et al.* (2021) Lung Ultrasound Score Assessing the Pulmonary Edema in Pediatric Acute Respiratory Distress Syndrome Received Continuous Hemofiltration Therapy: A Prospective Observational Study. *BMC Pulmonary Medicine*, **21**, Article No. 40. <https://doi.org/10.1186/s12890-021-01394-w>
- [27] Hong, H., Fu, B. and Wang, R. (2022) Clinical Value of Serum miR-92 and miR-122 Expression Level Combined with Pulmonary Ultrasound Score in the Prognosis of Neonatal Acute Respiratory Distress Syndrome. *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, **36**, e24485. <https://doi.org/10.1002/jcla.24485>
- [28] Sinnige, J.S., Smit, M.R., Ghose, A., de Grooth, H., Itenov, T.S., Ischaki, E., *et al.* (2024) Personalized Mechanical Ventilation Guided by Ultrasound in Patients with Acute Respiratory Distress Syndrome (PEGASUS): Study Protocol for an International Randomized Clinical Trial. *Trials*, **25**, Article No. 308. <https://doi.org/10.1186/s13063-024-08140-7>
- [29] Rajangam, M., Nallasamy, K., Bhatia, A., Kumar, V., Kaur, P. and Angurana, S.K. (2024) Renal Resistive Index by Point of Care Ultrasound to Predict Sepsis Associated Acute Kidney Injury in Critically Ill Children. *Pediatric Nephrology (Berlin, Germany)*, **39**, 3581-3589. <https://doi.org/10.1007/s00467-024-06392-8>
- [30] Starr, M.C., Banks, R., Reeder, R.W., Fitzgerald, J.C., Pollack, M.M., Meert, K.L., *et al.* (2020) Severe Acute Kidney Injury Is Associated with Increased Risk of Death and New Morbidity after Pediatric Septic Shock. *Pediatric Critical Care Medicine*, **21**, e686-e695. <https://doi.org/10.1097/pcc.0000000000002418>
- [31] Matuszkiewicz-Rowińska, J. and Małyszko, J. (2020) Acute Kidney Injury, Its Definition, and Treatment in Adults: Guidelines and Reality. *Polish Archives of Internal Medicine*, **130**, 1074-80. <https://doi.org/10.20452/pamw.15373>
- [32] Yoon, H.E., Kim, D.W., Kim, D., Kim, Y., Shin, S.J. and Shin, Y.R. (2020) A Pilot Trial to Evaluate the Clinical Usefulness of Contrast-Enhanced Ultrasound in Predicting Renal Outcomes in Patients with Acute Kidney Injury. *PLOS ONE*, **15**, e0235130. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235130>
- [33] Shin, J., Hwang, J.H., Park, S.B. and Kim, S.H. (2023) Prediction of Renal Recovery Following Sepsis-Associated Acute Kidney Injury Requiring Renal Replacement Therapy Using Contrast-Enhanced Ultrasonography. *Kidney Research and Clinical Practice*, **42**, 473-486. <https://doi.org/10.23876/j.krcp.22.086>
- [34] Poston, J.T. and Koyner, J.L. (2019) Sepsis Associated Acute Kidney Injury. *BMJ*, **364**, k4891. <https://doi.org/10.1136/bmj.k4891>
- [35] Ren, L., Zhao, Y., Xiao, J., Li, M., Zhang, Y., Zhu, L., *et al.* (2023) Contrast-Enhanced Ultrasound in Evaluating the Severity of Acute Kidney Injury: An Animal Experimental Study. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, **85**, 447-458. <https://doi.org/10.3233/ch-231940>
- [36] Fan, Z., Jiang, J., Xiao, C., Chen, Y., Xia, Q., Wang, J., *et al.* (2023) Construction and Validation of Prognostic Models in Critically Ill Patients with Sepsis-Associated Acute Kidney Injury: Interpretable Machine Learning Approach. *Journal of Translational Medicine*, **21**, Article No. 406. <https://doi.org/10.1186/s12967-023-04205-4>
- [37] Liu, P.Q., Ding, C.W., Zhang, Y.C., Ma, Q. and Liu, L.J. (2022) Diagnostic Value of Ultrasound and Contrast-Enhanced Ultrasound in Septic Acute Kidney Injury. *Journal of Clinical Ultrasound*, **50**, 505-514. <https://doi.org/10.1002/jcu.23118>
- [38] Sonnevile, R., Benghanem, S., Jeantin, L., de Montmollin, E., Doman, M., Gaudemer, A., *et al.* (2023) The Spectrum of Sepsis-Associated Encephalopathy: A Clinical Perspective. *Critical Care (London, England)*, **27**, Article No. 386. <https://doi.org/10.1186/s13054-023-04655-8>
- [39] Zheng, Y., Shen, M., Xuan, L., Pan, S., Chen, S., Zhong, M., *et al.* (2023) Cerebral Blood Flow Alterations in Sepsis-associated Encephalopathy: A Prospective Observational Study. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **42**, 1829-1839. <https://doi.org/10.1002/jum.16204>
- [40] Molnár, L., Németh, N., Berhész, M., Hajdú, E., Papp, L., Molnár, Á., *et al.* (2017) Assessment of Cerebral Circulation in a Porcine Model of Intravenously Given *E. coli* Induced Fulminant Sepsis. *BMC Anesthesiology*, **17**, Article No. 98. <https://doi.org/10.1186/s12871-017-0389-0>
- [41] Algebaly, H., ElSherbini, S., Galal, A., Hamdi, R., Baz, A. and Elbeledy, A. (2020) Transcranial Doppler Can Predict Development and Outcome of Sepsis-Associated Encephalopathy in Pediatrics with Severe Sepsis or Septic Shock.

- Frontiers in Pediatrics*, **8**, Article No. 450. <https://doi.org/10.3389/fped.2020.00450>
- [42] Pierrakos, C., Attou, R., Decorte, L., Kolyviras, A., Malinverni, S., Gottignies, P., *et al.* (2014) Transcranial Doppler to Assess Sepsis-Associated Encephalopathy in Critically Ill Patients. *BMC Anesthesiology*, **14**, Article No. 45. <https://doi.org/10.1186/1471-2253-14-45>
 - [43] Salem, M.S., Abosabaa, M.A., Abd El Ghafar, M.S., El-Gendy, H.M.E.M. and Alsherif, S.E.I. (2025) Norepinephrine Titration in Patients with Sepsis-Induced Encephalopathy: Cerebral Pulsatility Index Compared to Mean Arterial Pressure Guided Protocol: Randomized Controlled Trial. *BMC Anesthesiology*, **25**, Article No. 5. <https://doi.org/10.1186/s12871-024-02814-0>
 - [44] Imamura, Y., Matsumoto, H., Imamura, J., Matsumoto, N., Yamakawa, K., Yoshikawa, N., *et al.* (2023) Ultrasound Stimulation of the Vagal Nerve Improves Acute Septic Encephalopathy in Mice. *Frontiers in Neuroscience*, **17**, Article ID: 1211608. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1211608>
 - [45] Assimakopoulos, S.F., Triantos, C., Thomopoulos, K., Fligou, F., Maroulis, I., Marangos, M., *et al.* (2018) Gut-Origin Sepsis in the Critically Ill Patient: Pathophysiology and Treatment. *Infection*, **46**, 751-760. <https://doi.org/10.1007/s15010-018-1178-5>
 - [46] Tews, H.C., Kandulski, A., Schmid, S., Schlosser, S., Schirner, S., Putz, F.J., *et al.* (2022) Multimodal Ultrasound Imaging with Conventional B-Mode, Elastography, and Parametric Analysis of Contrast-Enhanced Ultrasound (CEUS): A Novel Approach to Assess Small Bowel Manifestation in Severe COVID-19 Disease. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, **82**, 341-360. <https://doi.org/10.3233/ch-221540>
 - [47] Golemati, S. and Cokkinos, D.D. (2022) Recent Advances in Vascular Ultrasound Imaging Technology and Their Clinical Implications. *Ultrasonics*, **119**, Article ID: 106599. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106599>
 - [48] Gummadi, S., Koenig, G., Wessner, C.E., Machado, P., Stem, J., Forsberg, F., *et al.* (2022) Contrast-Enhanced Ultrasound in Small Intestinal Ischemia: Proof of Concept. *Journal of Ultrasound in Medicine*, **41**, 835-843. <https://doi.org/10.1002/jum.15763>
 - [49] Pegoraro, F., Giusti, G., Giacalone, M. and Parri, N. (2022) Contrast-Enhanced Ultrasound in Pediatric Blunt Abdominal Trauma: A Systematic Review. *Journal of Ultrasound*, **25**, 419-427. <https://doi.org/10.1007/s40477-021-00623-6>
 - [50] Evans, L., Rhodes, A., Alhazzani, W., *et al.* (2021) Surviving Sepsis Campaign: International Guidelines for Management of Sepsis and Septic Shock 2021. *Critical Care Medicine*, **49**, e1063-e1143.
 - [51] Wang, J., Zhou, D., Gao, Y., Wu, Z., Wang, X. and Lv, C. (2020) Effect of VTILVOT Variation Rate on the Assessment of Fluid Responsiveness in Septic Shock Patients. *Medicine*, **99**, e22702. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000022702>
 - [52] Robba, C., Wong, A., Poole, D., Al Tayar, A., Arntfield, R.T., Chew, M.S., *et al.* (2021) 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. *Intensive Care Medicine*, **47**, 1347-1367. <https://doi.org/10.1007/s00134-021-06486-z>
 - [53] Patrawalla, P., Mayo, P. and Morris, A. (2024) Closing the Competency Gap: Preparing for the New Pulmonary and Critical Care Medicine and Critical Care Medicine Accreditation Council on Graduate Medical Education Requirements for Critical Care Ultrasound Training. *CHEST*, **166**, 257-258. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2024.02.028>
 - [54] Breitkopf, R., Trembl, B. and Rajsic, S. (2022) Lung Sonography in Critical Care Medicine. *Diagnostics*, **12**, Article No. 1405. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12061405>