

自动化毛细血管再充盈时间在脓毒性休克复苏中的 流程化应用进展

姚伟晴¹ 邱斌¹ 肖鸿² 刘东¹

¹ 解放军联勤保障部队第九四〇医院重症医学科, 兰州 730050; ² 解放军联勤保障部队第九四〇医院高原医学科, 兰州 730050

通信作者: 刘东, Email: liutung@163.com

【摘要】 脓毒性休克复苏长期以平均动脉压、尿量等宏循环指标及乳酸等代谢指标作为主要评估依据, 但宏循环与微循环/外周灌注常不同步; 乳酸亦可受清除障碍、儿茶酚胺相关代谢改变等因素影响而出现下降滞后或非低灌注性升高。毛细血管再充盈时间(CRT)作为经典床旁体征, 可在一定程度上反映皮肤微循环再灌注状态。近年来, 自动化毛细血管再充盈时间(aCRT)通过标准化按压与光学信号客观分析, 降低操作者差异并支持高频趋势监测, 为外周灌注终点的流程化应用提供了技术基础。以CRT导向复苏策略与以乳酸导向复苏策略对比的国际多中心随机对照试验结果显示, 以CRT为目标的复苏策略可减轻脓毒性休克患者72 h器官功能障碍, 且贝叶斯再分析提示该策略具有较高的获益概率。近期个体化血流动力学复苏方案进一步将CRT终点与血流动力学表型整合, 提示“外周灌注终点联合表型化干预”有望提升复苏策略的个体化与可推广性。本文系统梳理CRT及其自动化测量的生理学基础、测量与标准化要点, 以及关键临床证据, 并提出以“停止补液并触发再评估”为核心的闭环流程, 旨在促进急诊与重症医学科将aCRT转化为可执行、可质控、可追踪的床旁决策工具。

【关键词】 脓毒性休克; 外周灌注; 毛细血管再充盈时间; 自动化监测; 乳酸; 液体管理

基金项目: 甘肃省自然科学基金(21RJ11RA002)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20260126-00054

Progress in the protocolized application of automated capillary refill time in septic shock resuscitation

Yao Weiqing¹, Qiu Bin¹, Xiao Hong², Liu Dong¹

¹Department of Critical Care Medicine, the 940 Hospital of Joint Logistic Support Force of PLA, Lanzhou 730050, China;

²Department of Plateau Medicine, the 940 Hospital of Joint Logistic Support Force of PLA, Lanzhou 730050, China

Corresponding author: Liu Dong, Email: liutung@163.com

【Abstract】 Resuscitation in septic shock has traditionally relied mainly on macrocirculatory indicators, such as mean arterial pressure and urine output, and metabolic indicators, such as lactate. However, macrocirculation and microcirculation/peripheral perfusion are often dissociated. In addition, lactate decline may be delayed, or lactate may be elevated for reasons unrelated to hypoperfusion, owing to impaired clearance and catecholamine-related metabolic alterations. Capillary refill time (CRT), a classic bedside sign, can reflect cutaneous microcirculatory reperfusion to some extent. In recent years, automated capillary refill time (aCRT), based on standardized compression and objective optical signal analysis, has reduced operator-related variability and enabled frequent trend monitoring, thereby providing a technical basis for the protocolized use of peripheral perfusion endpoints. An international multicenter randomized controlled trial comparing CRT-guided with lactate-guided resuscitation showed that CRT-targeted resuscitation was associated with less organ dysfunction at 72 hours in patients with septic shock, and a subsequent Bayesian reanalysis indicated a high probability of benefit. More recently, an individualized hemodynamic resuscitation strategy has integrated CRT endpoints with hemodynamic phenotyping, suggesting that combining peripheral perfusion endpoints with phenotype-guided interventions may improve the individualization and generalizability of resuscitation strategies. This review systematically summarizes the physiological basis of CRT and its automated measurement, key issues in measurement and standardization, and pivotal clinical evidence. It further proposes a closed-loop workflow centered on "withholding further fluid administration and triggering reassessment", aiming to facilitate the translation of aCRT into an actionable, quality-controlled, and traceable bedside decision-support tool in emergency and critical care practice.

【Key words】 Septic shock; Peripheral perfusion; Capillary refill time; Automated monitoring; Lactate; Fluid management

Fund program: Gansu Provincial Natural Science Foundation Project (21RJ11RA002)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20260126-00054

脓毒性休克是脓毒症导致的循环、细胞及代谢功能严重异常状态, 具有病情进展迅速、血流动力学不稳定和器

官功能障碍风险高等特点。脓毒性休克具有高度时间依赖性, 早期复苏常在信息不完备、病理生理快速演变的条件下

进行,临床面临“何时补液、补多少、何时停止补液以及停止补液后如何处理”的连续决策困境。“拯救脓毒症运动”(Surviving Sepsis Campaign, SSC)2021 版指南强调,脓毒性休克需早期识别与及时复苏,并建议将毛细血管再充盈时间(capillary refill time, CRT)作为其他灌注指标的辅助手段用于复苏评估^[1]。欧洲重症医学会(European Society of Intensive Care Medicine, ESICM)2025 年发布的《循环性休克与血流动力学监测指南》指出,对于成人循环性休克患者,应在床旁评估皮肤灌注,其中 CRT 可作为重要临床体征,并结合皮肤温度和花斑等指标进行综合判断^[2]。

长期以来,平均动脉压、尿量等宏循环指标及乳酸等代谢指标被广泛用于复苏评估。然而,脓毒性休克中宏循环与微循环/外周灌注可出现“解耦”,即宏循环参数已达标但组织灌注仍不足,或宏循环尚未完全纠正而外周灌注已明显改善,该现象与血流动力学一致性受损密切相关^[3-4]。因此,仅依赖宏循环达标可能导致复苏不足或过度^[3]。与此同时,乳酸升高并非总是“低灌注”的同义词,除氧供需失衡外,还可能与应激性有氧糖酵解增强、氧利用障碍以及肝肾清除改变等因素相关,这些因素可导致乳酸下降滞后或与组织灌注恢复不同步^[5-6]。因此,单纯依赖乳酸清除亦可能造成延迟停液或过度复苏。

在此背景下,以 CRT 为代表的外周灌注指标重新受到关注。系统综述与 Meta 分析提示, CRT 在成人危重症患者中具有一定的预后判别价值^[7];一项大型国际多中心随机临床试验比较了 CRT 导向复苏策略与乳酸导向复苏策略,结果显示,以 CRT 为复苏目标的策略可减轻脓毒性休克患者 72 h 器官功能障碍,并为以外周灌注为导向的复苏策略提供了随机试验证据支持^[8]。在 CRT 的基础上,自动化毛细血管再充盈时间(automated capillary refill time, aCRT)通过标准化按压与光学信号客观量化,降低操作者差异,并支持高频重复与趋势监测,从而为将外周灌注指标纳入流程化决策与质量控制提供了技术条件。现系统梳理 CRT 及其自动化测量的生理学基础、测量与标准化要点及关键临床证据,并提出一套以“停止补液并触发再评估”为核心的流程化应用框架,以期推动 aCRT 转化为可执行、可质控、可追踪的床旁决策工具。

1 文献检索策略

计算机检索 PubMed、Embase、Web of Science、中国知网、万方数据知识服务平台和维普中文科技期刊数据库,检索时限为各数据库建库至 2025 年 12 月 31 日。英文检索词包括 septic shock、sepsis、capillary refill time、automated capillary refill time、quantitative capillary refill time、peripheral perfusion、resuscitation、hemodynamic monitoring、fluid therapy 和 deresuscitation;中文检索词包括脓毒症、脓毒性休克、毛细血管再充盈时间、自动化毛细血管再充盈时间、外周灌注、液体复苏、血流动力学监测和去复苏。检索词采用主题词与自由词相结合的方式,并追溯关键指南、系统评价和随机对照试验的参考文献。纳入成人脓毒症/脓毒性休克

相关指南、共识、系统评价、随机对照试验、观察性研究及 aCRT 方法学验证研究;排除儿科或新生儿研究、非脓毒症人群研究、重复发表、无法获取全文及与主题相关性不足的文献。经筛选并结合参考文献追溯,最终纳入 49 篇文献,其中英文 46 篇,中文 3 篇。

2 指标内涵与病理生理基础

2.1 CRT 与 aCRT 的概念及生理学基础: CRT 是指对末梢皮肤施加一定压力造成短暂缺血后,皮肤颜色恢复所需的时间,其可反映皮肤微血管床再灌注速度^[9-10]。CRT 受局部血管张力、微循环灌注压、交感神经系统活性和体温等生理因素,以及按压部位、持续时间、力度和环境光线等测量条件影响^[11]。aCRT 通常指在固定按压时间与压力条件下,借助反射光或光电容积描记等信号对颜色或脉搏波恢复曲线进行客观量化,输出可重复的定量时间或相关参数,以减少观察者差异并支持趋势监测^[12-13]。需要强调的是, aCRT 并未改变 CRT 所反映的生理内涵,而是将传统“主观体征”转化为“可量化的趋势信号”,从而更便于纳入复苏闭环管理与质量控制流程^[4,9]。

2.2 脓毒性休克外周灌注异常机制与宏循环-微循环解耦: 脓毒性休克时,炎症反应可引起血管内皮功能障碍、内皮糖萼损伤、微血栓形成和微循环血流分布异常;同时,交感神经系统过度激活以及血管活性药物所致的外周血管张力改变,也可进一步影响皮肤微循环灌注。上述因素共同作用,可导致 CRT 延长、肢端发凉和花斑加重等外周灌注受损表现^[9,11]。既往微循环研究和综述显示,早期微循环灌注障碍与器官功能障碍及死亡相关;即使平均动脉压等宏循环指标得到纠正,微循环异常仍可能持续存在,即发生宏循环-微循环解耦,提示血流动力学一致性受损^[3-4,14]。这种宏循环-微循环解耦现象说明,宏循环指标达标并不等同于组织灌注恢复,也为将 aCRT/CRT 等外周灌注指标纳入复苏评估提供了病理生理依据^[3,15]。

2.3 乳酸升高的异质性及与外周灌注不同步的临床含义: 乳酸升高既可来自组织缺氧导致的无氧代谢,也可由应激状态下有氧糖酵解增强、 β 受体激动、线粒体功能障碍以及肝肾清除率下降等因素所致,因此,乳酸升高并不等同于组织低灌注^[5-6,16]。乳酸清除指导策略在部分研究与结局改善相关,但在外周灌注已恢复而乳酸仍高的情境下,若继续以“降乳酸”为单一目标推进补液,可能带来不必要的液体负荷并增加液体蓄积相关风险^[17-18]。因此,将 aCRT/CRT 与乳酸联合解读更合理的核心在于:将乳酸作为总体风险与代谢负荷信号,同时以外周灌注趋势校验“是否仍存在可逆的低灌注需要干预”,从而降低过度复苏的概率,并提高策略的个体化与安全性^[5,19]。

3 aCRT 测量技术与标准化

3.1 技术路线与关键差异: 现有 aCRT 测量技术大体可分为两类。一是基于光电容积描记或反射光信号的定量毛细血管再充盈时间(quantitative capillary refill time, qCRT),多在常规传感器基础上,通过短暂压迫或遮断后采集波形恢复

曲线并计算相关参数^[12, 20]。二是采用专用自动压迫装置,以机械结构固定压迫时间和压力,同时采集皮肤光学信号并自动计算 CRT 及其衍生参数^[21]。相关装置在重症患者中的初步应用表明,标准化机械按压与光学信号分析可实现 CRT 的客观量化^[22];其方法学研究进一步显示,自动测量参数具有较好的观察者间及观察者内重复性,有助于减少人工目测和手动按压带来的测量差异^[23]。

但不同设备在压迫方式、测量部位、光学信号采集、算法定义及输出参数等方面存在明显差异,相关阈值难以直接互换。因此,临床应用中同一设备、同一测量部位及相对一致条件下的动态变化,通常较不同设备之间单一绝对阈值的比较更具有参考价值^[24]。此外,部分自动化设备在急性循环衰竭患者中的一致性验证结果并不理想^[25],提示自动化和标准化并不等同于测量结果必然准确。现有研究总体样本量较小,设备与算法尚不统一,其在脓毒性休克患者中的测量准确性、参考阈值及临床决策价值仍需进一步验证。

3.2 操作规范与质量控制:无论使用人工 CRT 还是 aCRT 设备,可推广性的关键不是追求单次读数“绝对精确”,而是建立可复制的标准化条件并强调动态趋势解读^[9]。建议将 aCRT/CRT 测量纳入科室统一流程:连续监测时应尽量固定同一解剖部位,如指端或胸骨,避免因随意更换测量部位而降低前后读数的可比性^[11];科室内应依据设备说明书和本中心标准操作规程统一按压持续时间(常用 5 s 或 10 s),并通过培训和考核保证操作的一致性^[9, 11, 26];在记录模板中同步标注体温、血管活性药物剂量及末梢温度/皮温梯度等潜在干扰因素,以便解释趋势变化^[11, 15, 27];复苏早期采用短周期复测(如每 15~30 min 复测,干预后 15 min 内复测),以捕捉趋势并支持闭环决策^[7-8, 19]。对于 aCRT,还应将“信号质量”纳入质控:低灌注时脉搏波幅下降、运动伪差、传感器松动等可导致读数失真,必要时需要重复测量或更换部位,并结合临床背景综合判断^[12, 21]。

3.3 影响因素、偏倚与本地校准:体温降低或末梢寒冷可在非休克情况下延长 aCRT/CRT;血管活性药物尤其高剂量去甲肾上腺素可能使外周血管收缩加重,导致 aCRT 持续偏长,这并不一定代表容量不足,应结合血管活性药物变化与整体血流动力学背景进行解释^[11, 28]。此外,若 aCRT 采用光电容积描记或反射光信号,其测量偏倚需要被正视。脉搏血氧仪在不同肤色人群中存在系统性误差的证据较为明确,因此,基于光学信号的衍生指标同样应进行公平性评估、设备校准与阈值本地化验证^[29-30]。但目前关于 aCRT 在不同肤色人群中的临床表现及阈值外推证据仍相对有限,其跨人群适用性尚需进一步验证。因此, aCRT 更适合作为“趋势指标”,阈值应在本地人群与本地设备条件下通过队列或真实世界数据校准后再用于流程决策,以降低外推误差与误判风险^[24-25]。

aCRT/CRT 在特殊人群和极端血流动力学状态下的解释需更加谨慎。对于严重低体温、显著外周血管病变、重度

休克伴高剂量缩血管药物支持、严重微循环障碍或肝硬化等患者, aCRT/CRT 延长未必单纯代表容量不足,也可能更多反映外周血管收缩增强、血管反应性异常或宏循环-微循环解耦。换言之, aCRT/CRT 并不是微循环灌注的“金标准”,不宜脱离具体临床情境单独作为治疗决策依据。近年来有研究者进一步指出, CRT 与系统血流动力学之间的关系具有条件性,受宏循环-微循环耦联状态影响明显,因此其更适合作为床旁动态再评估信号,而非孤立的决策指标^[31-32]。

4 临床证据与研究进展

4.1 观察性研究与预后关联:大量观察性研究表明,外周灌注受损与不良结局相关。Lima 等^[33]在综合重症监护病房收治的成人患者研究中发现,主观外周灌注评估与更高序贯器官衰竭评分(Sequential Organ Failure Assessment, SOFA)及更差预后相关,并可提供独立于传统全身指标之外的风险分层信息。花斑评分在脓毒性休克中具有较强的预后提示价值,并在多队列研究中得到验证^[34]。在复苏过程中,标准化 CRT 评估显示, CRT 持续异常与死亡风险升高相关,可用于动态识别外周灌注仍未恢复的患者^[11]。在脓毒症相关性高乳酸血症患者中,复苏后 CRT 及其变化率与 SOFA 评分的动态变化相关, CRT 改善不足提示器官功能恶化风险升高^[35]。急诊队列研究也发现,补液过程中 CRT 的变化趋势与脓毒症相关性高乳酸血症患者结局相关^[36]。上述证据表明,相较于单次测量,连续观察 CRT 在复苏前后的动态变化中更有助于评价灌注反应、识别持续性外周灌注异常并进行风险分层。由于 CRT 的改善在部分患者中可能早于乳酸下降^[8],故其可为早期复苏策略的调整提供更加及时的床旁反馈。

4.2 随机对照试验与再分析证据:一项大型国际多中心随机临床试验就脓毒性休克患者以 CRT 正常化为目标的复苏策略与以乳酸清除为目标的复苏策略进行比较,结果显示, CRT 靶向组 72 h 器官功能障碍更轻, 28 d 病死率呈下降趋势但差异未达统计学意义^[8]。随后对该试验的贝叶斯再分析提示, CRT 靶向组具有较高的临床获益概率,为以外周灌注为导向的复苏策略提供了更强的推断支持^[37]。进一步的事后分析提示,在基线 CRT 已相对正常的患者中,若仍以乳酸为主要靶点持续推进复苏,可能带来额外液体负荷并与更差结局相关^[38],这从反面强化了“不能脱离外周灌注状态机械追求乳酸下降”的理念。

最新的多中心随机临床试验评估了以 CRT 正常化为目标、结合血流动力学表型评估的个体化复苏策略。该策略依据容量反应性、血管张力和心功能等表型选择补液、血管活性药物调整或正性肌力支持,并通过 CRT 动态变化评价干预反应。结果显示,该策略在由 28 d 病死率、生命支持持续时间和住院时间构成的分层复合结局方面优于常规治疗^[39]。提示 CRT 可作为触发再评估和监测复苏反应的床旁目标,而具体干预应由血流动力学表型决定。

4.3 aCRT 方法学验证与证据整合:目前 aCRT 的相关证据以方法学与可行性研究为主。qCRT 可用于识别高乳酸或更

高风险的患者,提示其具备客观筛查与分诊潜力^[13,40]。在急诊场景中,qCRT与目测CRT的对比研究也提示量化有望减少观察者差异并支持趋势监测^[12]。此外,基于脉搏血氧光电容积描记波形的机器学习用于自动识别CRT异常已在急诊场景中开展探索,提示“数字化CRT”具备进一步工程化的可行性^[41]。

但设备间一致性、阈值迁移性以及低灌注/强缩血管状态下的信号稳定性仍是研究的主要“瓶颈”。以aCRT测量装置DiCART™为例,其在急性循环衰竭患者中的验证研究提示与临床CRT的一致性不足;相关可靠性研究也提示此类设备仍需在不同临床情境中进一步验证与校准^[24-25]。目前经过大规模临床验证的成熟aCRT设备仍然较少,这在一定程度上限制了其现阶段的广泛应用。因此,现阶段更可靠的做法是把aCRT作为可重复的趋势信号,与被动抬腿试验等动态评估和床旁超声等成熟工具共同纳入复苏闭环,而非单独依赖aCRT替代全部复苏评价指标^[19,42]。

5 流程化应用策略

5.1 aCRT在复苏决策中的定位:结合现有证据与临床可推广性,aCRT更适合作为外周组织灌注的趋势指标嵌入早期复苏决策,而非以单次阈值作为裁决工具。aCRT核心价值主要体现在三方面:其一,弥补宏循环指标和乳酸在时间滞后与异质性方面的不足,为组织灌注状态提供更即时的床旁反馈^[4,9];其二,在补液推进过程中提供“停止补液并触发再评估”的信号,从而降低在灌注已改善背景下仍追加补液所致的液体蓄积风险^[18,43];其三,作为分层线索与容量反应性评估和血流动力学表型判断相结合,帮助临床明确下一步干预的方向,如补液、升压、正性肌力支持或转向其他原因评估^[8,39]。总体而言,aCRT更适合被定位为“趋势监测+触发再评估”的床旁工具,其应用应建立在动态评估和具体临床情境之上。

需要强调的是,CRT并非唯一的床旁外周灌注评估工具。在临床实践中,皮温或中心-皮肤温度梯度、花斑评分以及外周灌注指数(peripheral perfusion index,PPI)等,同样可用于外周灌注监测。相较而言,aCRT/CRT的优势在于操作简便、获取迅速,且对短周期干预后的变化较为敏感,更适合作为早期复苏中的起始评估信号;而其他指标则可作为补充信息,用于风险分层和状态校验。因此,aCRT/CRT并非替代其他外周灌注指标,而应与皮温、花斑评分、PPI、乳酸动态及床旁超声等联合解读,以提高对不同病理生理状态的识别能力^[9]。

5.2 停止补液并触发再评估的闭环策略:将aCRT用于流程化复苏时,关键在于把“异常读数”转化为再评估触发点,并以动态评估作为继续补液的前置评估条件,形成可重复的闭环。在实践中,首先应完成结果解释前的质量核查,排查并校正常见伪差与干扰因素:末梢温度降低或体温波动、传感器松动/接触不良、运动伪差、信号波幅过低,以及血管活性药物剂量调整等均可能影响aCRT读数;在校正后应及时复测以确认异常是否真实存在^[9]。其次,aCRT异常并不

等同于容量不足,补液决策应优先经过容量反应性评估;被动抬腿试验等动态测试可用于判断患者是否可能从补液中获益,从而避免“因aCRT延长而盲目补液”^[42]。再次,在实施补液、升压或其他表型化干预后,应进行短周期复测,以aCRT趋势变化评估组织灌注是否改善^[8,39];若aCRT持续异常或改善有限,应及时转向表型化路径(如优化血管张力、评估心功能/低心排血量,或考虑微循环障碍与血流分配异常等),而非在同一策略上反复加量^[39,44]。综上,“排干扰—闸门评估—干预—复测”的闭环是aCRT实现流程化落地的最小可执行单元。基于上述思路,我们提出aCRT导向的脓毒性休克早期复苏闭环流程,见图1。

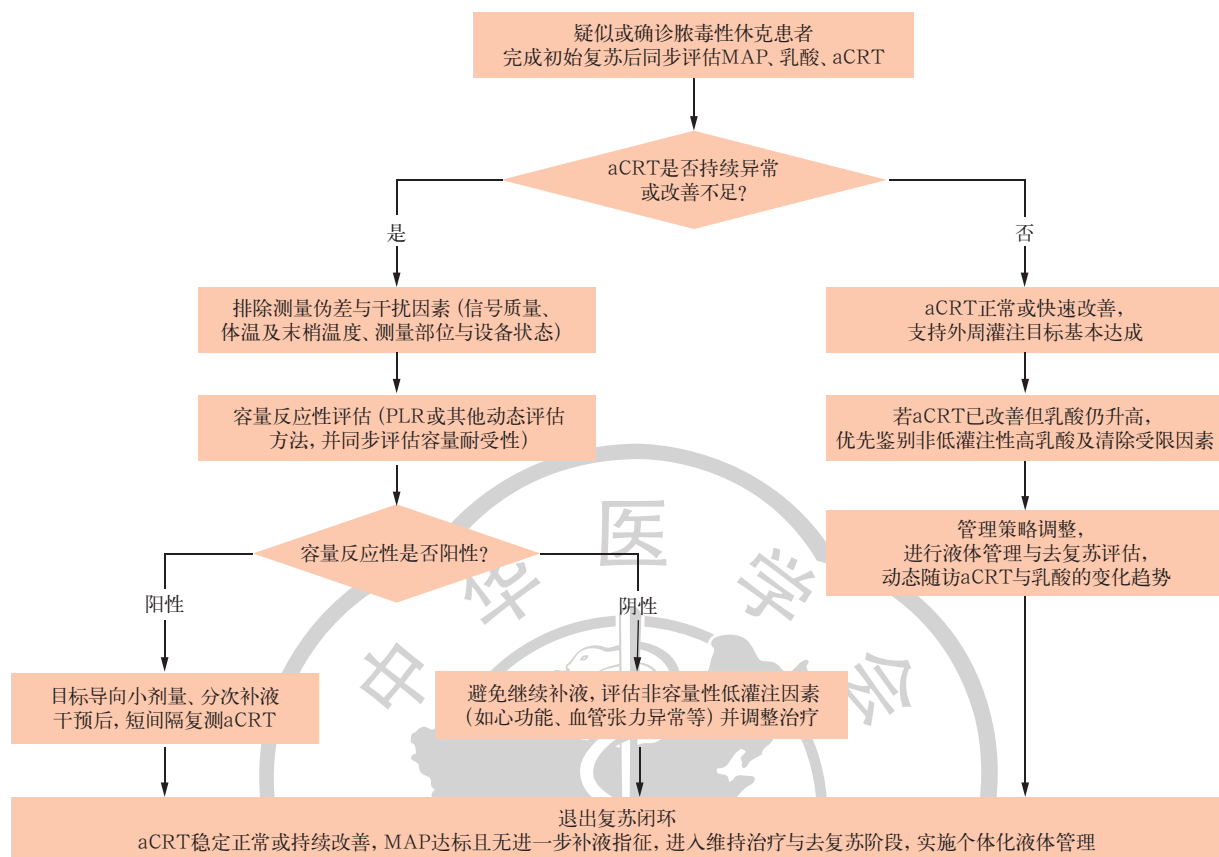
为提高该流程在临床应用中的可操作性与一致性,仍需对测量、解释及决策节点的关键风险点进行质量控制,具体见表1。

5.3 aCRT与乳酸联合解读:aCRT与乳酸的联合解读并非“二选一”,而是回答不同层面的问题。aCRT更侧重判断外周组织灌注是否仍提示可干预的不足,从而决定是否需要继续推进复苏;乳酸更多反映总体风险与代谢负荷,提示是否存在持续应激、清除障碍或非低灌注因素需要处理^[6]。因此,当aCRT已正常或明显改善而乳酸仍高时,应优先考虑非低灌注性高乳酸及清除受限(如肝功能受损、药物/儿茶酚胺影响、持续应激等),避免为追求乳酸下降而继续补液导致液体蓄积^[6,18];相反,当aCRT持续异常且乳酸升高或下降缓慢时,更支持仍存在灌注不足或血流分配异常,应进入“再评估—表型化干预—复测”的闭环管理^[4,39]。通过这种联合框架,可将乳酸从“单一治疗目标”回归为“风险提示信号”,并以aCRT趋势校验组织灌注是否真正改善,从而提高复苏策略的个体化与安全性。为便于床旁快速分层,我们将aCRT与乳酸的组合状态归纳为四象限解读框架,见图2。四象限矩阵旨在指导“下一步评估思路”,而非机械化的治疗指令。不同象限仅提示更应优先考虑的病理生理方向,例如:aCRT异常时,应重点评估是否仍存在可逆性低灌注、血管张力异常、心功能障碍或宏循环-微循环解耦;aCRT恢复而乳酸持续升高时,则应优先识别非低灌注性高乳酸、清除障碍及持续应激等因素。所有治疗调整均应结合动态评估及整体临床背景,并在小剂量分次干预后进行短周期复测(如10~15min)^[1,8]。

6 从复苏到去复苏的衔接

6.1 转入限制性液体与去复苏的时机和理由:脓毒性休克治疗常经历复苏、优化、稳定与去复苏阶段,不同阶段对应的目标和策略并不相同,提示液体治疗存在“窄治疗窗”^[18,47-48]。一项脓毒症队列研究显示,持续液体正平衡与较差预后独立相关^[43],且近年来对“液体蓄积综合征”的概念、识别与处理已有较系统的总结^[17]。因此,当aCRT趋势持续恢复并稳定正常、宏循环目标基本达成,且动态评估提示进一步补液获益有限时,可尽早由“继续补液”转向“限制性液体与去复苏”,以降低液体蓄积的相关风险^[17]。

6.2 去复苏阶段的监测组合与安全边界:去复苏阶段的安



注: aCRT 为自动化毛细血管再充盈时间, MAP 为平均动脉压, PLR 为被动抬腿试验; aCRT 异常主要提示外周灌注可能受损, 但不应被机械理解为补液指令, 而应作为启动进一步再评估的床旁信号; 当 aCRT 或乳酸改善不足时, 应进一步结合容量反应性、心功能、血管张力及其他可能导致组织灌注异常的因素进行表型化分析, 再决定补液、升压、正性肌力支持或转向其他原因处理

图 1 aCRT 导向的脓毒性休克早期复苏闭环流程

表 1 aCRT 流程化应用的质量控制要点

关键环节	常见风险点	潜在影响	质控措施
测量一致性	部位 / 按压时长不固定	阈值漂移、趋势不可比	固定部位, 固定 5 s 或 10 s 写入标准操作规程 ^[11, 45]
温度影响	低体温 / 末梢寒冷导致延长	假阳性低灌注	记录体温, 必要时温暖肢体再测 ^[9]
信号质量	运动伪差、脉搏波幅弱	aCRT 失真	关注质量提示, 重复测量, 更换部位 ^[12, 41]
用药干扰	高剂量缩血管药导致偏长	反映药效非容量不足	结合平均动脉压、剂量解读, 滴定后复测 ^[9, 28]
决策误区	aCRT 异常就继续补液	低灌注 ≠ 容量反应性	补液必须先通过被动抬腿试验等动态评估闸门 ^[8, 42]
乳酸误用	aCRT 正常仍为降乳酸补液	增加液体蓄积风险	评估非低灌注高乳酸原因, 转入液体管理 ^[5, 38]
公平性偏倚	光学信号跨肤色偏差	可能影响阈值与趋势	本地不同肤色校准, 多模态互证 ^[29, 46]

注: aCRT 为自动化毛细血管再充盈时间

		乳酸	
		升高	正常/下降
aCRT	异常/延长	高风险低灌注倾向 • 排除伪差与干扰 • 评估容量反应性 • 小剂量分次干预 • 10~15 min 复测 aCRT	可能局部或早期灌注异常 • 关注趋势而非单次值 • 考虑用药与外周血管收缩 • 加密复测并结合超声
	正常/改善	非低灌注性高乳酸可能 • 避免乳酸单一驱动补液 • 评估清除障碍与代谢因素 • 转入液体管理评估	灌注基本恢复 • 停止补液(若无其他指征) • 进入维持与去复苏阶段 • 持续趋势监测 aCRT 与乳酸

注: aCRT 为自动化毛细血管再充盈时间

图 2 aCRT 与乳酸联合解读四象限矩阵

全边界是在利尿或超滤降低液体负荷的同时, 避免诱发新的组织低灌注^[17-18]。此时 aCRT 仍可作为外周灌注的趋势性信号, 与尿量和液体平衡、动态乳酸、床旁超声评估及血管活性药物需求联合解读。在动态评估方面, 被动抬腿试验等方法可用于在“是否需要再补液 / 是否仍有容量获益”方面提供闸门信息, 避免仅凭单一灌注信号做加减量决策^[42]。对于“容量耐受 / 静脉回流受限”的识别, 可结合静脉超声充血评分作为补充线索, 与 aCRT 的灌注趋势相互印证^[49]。实践中应警惕三类偏差: 一是仅因乳酸下降缓慢而延长补液窗口; 二是未证实容量反应性即因 aCRT 偏长而持续补液; 三是忽视体温、用药和信号质量导致误判。总体建议是将 aCRT 用于复苏期“停止补液并触发再评估”, 并在稳定与去

复苏期用于验证撤液治疗的灌注安全性,避免其被机械化为单一阈值决策工具^[17-18]。

7 小结与展望

aCRT/CRT 的临床价值在于其能够以无创、快速、可重复的方式提供外周灌注床旁信息,并较乳酸能更早反映部分患者对复苏干预的即时反应,因此适合作为脓毒性休克早期复苏中“停止补液并触发再评估”的趋势性指标。现有随机对照试验、贝叶斯再分析及个体化血流动力学复苏研究提示,以 CRT 为导向的复苏策略有望减少不必要的液体暴露,促进器官功能恢复,并推动复苏从单纯依赖宏循环或乳酸目标,向兼顾外周灌注与病理生理表型的个体化管理发展^[8, 37, 39]。

但应清楚认识到, aCRT/CRT 并非微循环监测的“金标准”,也不是可以脱离临床背景单独作为治疗决策依据的指标,其结果受测量部位、按压方式、环境温度、体温、操作者培训、血管活性药物、外周血管状态以及光学信号质量等多种因素影响。在严重低体温、明显外周血管病变、强缩血管状态及部分特殊基础疾病患者中, aCRT/CRT 解释边界需更加谨慎。对于自动化设备而言,虽然其有助于降低人为差异、提升标准化程度,但目前大规模临床验证仍有限,部分装置与临床 CRT 的一致性不足,提示 aCRT 在现阶段更适合被定位为趋势监测工具,而非替代临床判断的独立决策装置^[24, 31-32]。

因此, aCRT/CRT 在临床上更适合作为多模态外周灌注监测体系中的核心组成之一。临床实践中宜将 aCRT/CRT 与动态乳酸、容量反应性评估、皮温或温度梯度、花斑评分、PPI 及床旁超声等联合解读,以提高对容量不足、血管张力异常、心功能障碍及宏循环-微循环解耦等不同病理生理状态的识别能力。

未来研究仍需集中解决 3 个问题:其一,进一步建立跨设备、跨部位、跨人群的标准化测量框架与本地校准策略;其二,明确不同肤色人群、特殊基础疾病及极端血流动力学状态下的适用边界;其三,在多中心真实世界研究中验证 aCRT 嵌入闭环流程后,能否稳定改善液体负荷、器官支持时间、重症监护病房住院时间及死亡等患者重要结局。只有在标准化、适用边界、流程化落地和结局验证 4 个层面同时推进, aCRT 才能真正从有前景的床旁信号发展为可推广、可质控、可解释的复苏辅助工具。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Evans L, Rhodes A, Alhazzani W, et al. Surviving Sepsis Campaign: international guidelines for management of sepsis and septic shock 2021[J]. Crit Care Med, 2021, 49(11): e1063-e1143. DOI: 10.1097/CCM.0000000000005337.
- [2] Monnet X, Messina A, Greco M, et al. ESICM guidelines on circulatory shock and hemodynamic monitoring 2025[J]. Intensive Care Med, 2025, 51(11): 1971-2012. DOI: 10.1007/s00134-025-08137-z.
- [3] Bakker J, Ince C. Monitoring coherence between the macro and microcirculation in septic shock[J]. Curr Opin Crit Care, 2020, 26(3): 267-272. DOI: 10.1097/MCC.0000000000000729.
- [4] Ince C. Hemodynamic coherence and the rationale for monitoring the microcirculation[J]. Crit Care, 2015, 19 Suppl 3(Suppl 3): S8. DOI: 10.1186/cc14726.
- [5] Gattinoni L, Vasques F, Camporota L, et al. Understanding lactatemia in human sepsis. Potential impact for early management[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2019, 200(5): 582-589. DOI: 10.1164/rrcm.201812-23420C.
- [6] Garcia-Alvarez M, Marik P, Bellomo R. Sepsis-associated hyperlactatemia[J]. Crit Care, 2014, 18(5): 503. DOI: 10.1186/s13054-014-0503-3.
- [7] Jacquet-Lagrèze M, Pernollet A, Kattan E, et al. Prognostic value of capillary refill time in adult patients: a systematic review with meta-analysis[J]. Crit Care, 2023, 27(1): 473. DOI: 10.1186/s13054-023-04751-9.
- [8] The ANDROMEDA SHOCK Investigators, the Latin America Intensive Care Network (LIVEN). Effect of a resuscitation strategy targeting peripheral perfusion status vs serum lactate levels on 28-day mortality among patients with septic shock: the ANDROMEDA-SHOCK randomized clinical trial[J]. JAMA, 2019, 321(7): 654-664. DOI: 10.1001/jama.2019.0071.
- [9] Hariri G, Joffe J, Leblanc G, et al. Narrative review: clinical assessment of peripheral tissue perfusion in septic shock[J]. Ann Intensive Care, 2019, 9(1): 37. DOI: 10.1186/s13613-019-0511-1.
- [10] Xia YX, Guo Z, Wang XR, et al. Research progress on the measurement methods and clinical significance of capillary refill time[J]. Sensors (Basel), 2024, 24(24): 7941. DOI: 10.3390/s24247941.
- [11] Ait-Oufella H, Bige N, Boelle PY, et al. Capillary refill time exploration during septic shock[J]. Intensive Care Med, 2014, 40(7): 958-964. DOI: 10.1007/s00134-014-3326-4.
- [12] Shinozaki K, Jacobson LS, Saeki K, et al. Comparison of point-of-care peripheral perfusion assessment using pulse oximetry sensor with manual capillary refill time: clinical pilot study in the emergency department[J]. J Intensive Care, 2019, 7: 52. DOI: 10.1186/s40560-019-0406-0.
- [13] Yasufumi O, Morimura N, Shirasawa A, et al. Quantitative capillary refill time predicts sepsis in patients with suspected infection in the emergency department: an observational study[J]. J Intensive Care, 2019, 7: 29. DOI: 10.1186/s40560-019-0382-4.
- [14] Duranteau J, De Backer D, Donadello K, et al. The future of intensive care: the study of the microcirculation will help to guide our therapies[J]. Crit Care, 2023, 27(1): 190. DOI: 10.1186/s13054-023-04474-x.
- [15] Microcirculatory Alterations in Resuscitation and Shock Investigators. Early microcirculatory perfusion derangements in patients with severe sepsis and septic shock: relationship to hemodynamics, oxygen transport, and survival[J]. Ann Emerg Med, 2007, 49(1): 88-98. e1-e2. DOI: 10.1016/j.annemergmed.2006.08.021.
- [16] Suetrong B, Walley KR. Lactic acidosis in sepsis: it's not all anaerobic: implications for diagnosis and management[J]. Chest, 2016, 149(1): 252-261. DOI: 10.1378/chest.15-1703.
- [17] Pfortmueller CA, Dabrowski W, Wise R, et al. Fluid accumulation syndrome in sepsis and septic shock: pathophysiology, relevance and treatment: a comprehensive review[J]. Ann Intensive Care, 2024, 14(1): 115. DOI: 10.1186/s13613-024-01336-9. Erratum in: Ann Intensive Care, 2025, 15(1): 21. DOI: 10.1186/s13613-024-01403-1.
- [18] Malbrain MLNG, Van Regenmortel N, Saugel B, et al. Principles of fluid management and stewardship in septic shock: it is time to consider the four D's and the four phases of fluid therapy[J]. Ann Intensive Care, 2018, 8(1): 66. DOI: 10.1186/s13613-018-0402-x.
- [19] ANDROMEDA-SHOCK Investigators. Systematic assessment of fluid responsiveness during early septic shock resuscitation: secondary analysis of the ANDROMEDA-SHOCK trial[J]. Crit Care, 2020, 24(1): 23. DOI: 10.1186/s13054-020-2732-y.
- [20] Klibus M, Smirnova D, Marcinkewicz Z, et al. Quantitative evaluation of microcirculatory alterations in patients with COVID-19 and bacterial septic shock through remote photoplethysmography and automated capillary refill time analysis[J]. Medicina (Kaunas), 2024, 60(10): 1680. DOI: 10.3390/medicina60101680.
- [21] Blaxter LL, Morris DE, Crowe JA, et al. An automated quasi-continuous capillary refill timing device[J]. Physiol Meas, 2016, 37(1): 83-99. DOI: 10.1088/0967-3334/37/1/83.
- [22] 陈瑞, 赖嘉华, 谢志毅, 等. 毛细血管再充盈时间测量仪在重症患者中的应用价值初探[J]. 中国急救医学, 2019, 39(10): 981-986. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1949.2019.10.013.

- [23] 陈瑞, 黄晓敏, 谢志毅, 等. 毛细血管再充盈时间测量仪测量参数的可重复性与可信度研究[J]. 临床急诊杂志, 2019, 20(7): 546-550. DOI: 10.13201/j.issn.1009-5981.2019.07.010.
- [24] Descamps A, Jacquet-Lagrèze M, Aussal T, et al. DiCARTTM device to measure capillary refill time: a validation study in patients with acute circulatory failure[J]. J Clin Monit Comput, 2025, 39(5): 831-840. DOI: 10.1007/s10877-025-01271-5.
- [25] Jacquet-Lagrèze M, Saint-Jean C, Bouët T, et al. Reliability and reproducibility of the DICART device to assess capillary refill time: a bench and in-silico study[J]. J Clin Monit Comput, 2023, 37(5): 1409-1412. DOI: 10.1007/s10877-023-01027-z.
- [26] FAMOUS Study Group. The power of flash mob research: conducting a nationwide observational clinical study on capillary refill time in a single day[J]. Chest, 2017, 151(5): 1106-1113. DOI: 10.1016/j.chest.2016.11.035.
- [27] Amson H, Vacheron CH, Thiollere F, et al. Core-to-skin temperature gradient measured by thermography predicts day-8 mortality in septic shock: a prospective observational study[J]. J Crit Care, 2020, 60: 294-299. DOI: 10.1016/j.jcrc.2020.08.022.
- [28] Fage N, Moretto F, Rosalba D, et al. Effect on capillary refill time of volume expansion and increase of the norepinephrine dose in patients with septic shock[J]. Crit Care, 2023, 27(1): 429. DOI: 10.1186/s13054-023-04714-0.
- [29] Sjöding MW, Dickson RP, Iwashyna TJ, et al. Racial bias in pulse oximetry measurement[J]. N Engl J Med, 2020, 383(25): 2477-2478. DOI: 10.1056/NEJMc2029240. Erratum in: N Engl J Med, 2021, 385(26): 2496. DOI: 10.1056/NEJMc210003.
- [30] Cabanas AM, Martín-Escudero P, Shelley KH. Improving pulse oximetry accuracy in dark-skinned patients: technical aspects and current regulations[J]. Br J Anaesth, 2023, 131(4): 640-644. DOI: 10.1016/j.bja.2023.07.005.
- [31] Hernandez G, Carmona P, Ait-Oufella H. Monitoring capillary refill time in septic shock[J]. Intensive Care Med, 2024, 50(4): 580-582. DOI: 10.1007/s00134-024-07361-3.
- [32] Hernandez G, Kattan E, Ospina-Tascón G, et al. The intricate relationship between capillary refill time and systemic hemodynamics in septic shock[J]. Ann Intensive Care, 2025, 15(1): 135. DOI: 10.1186/s13613-025-01563-8.
- [33] Lima A, Jansen TC, van Bommel J, et al. The prognostic value of the subjective assessment of peripheral perfusion in critically ill patients[J]. Crit Care Med, 2009, 37(3): 934-938. DOI: 10.1097/CCM.0b013e31819869db.
- [34] Ait-Oufella H, Lemoine S, Boelle PY, et al. Mottling score predicts survival in septic shock[J]. Intensive Care Med, 2011, 37(5): 801-807. DOI: 10.1007/s00134-011-2163-y.
- [35] 黎金国, 谢承志, 王小智. 液体复苏前后毛细血管再充盈时间变化率对脓毒症相关性高乳酸血症患者器官功能恶化风险的预测价值[J]. 临床急诊杂志, 2021, 22(12): 785-791. DOI: 10.13201/j.issn.1009-5981.2021.12.001.
- [36] Lara B, Enberg L, Ortega M, et al. Capillary refill time during fluid resuscitation in patients with sepsis-related hyperlactatemia at the emergency department is related to mortality[J]. PLoS One, 2017, 12(11): e0188548. DOI: 10.1371/journal.pone.0188548.
- [37] Zampieri FG, Damiani LP, Bakker J, et al. Effects of a resuscitation strategy targeting peripheral perfusion status versus serum lactate levels among patients with septic shock. A Bayesian reanalysis of the ANDROMEDA-SHOCK trial[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 201(4): 423-429. DOI: 10.1164/rccm.201905-0968OC.
- [38] ANDROMEDA-SHOCK Study Investigators, the Latin America Intensive Care Network (LIVEN). A lactate-targeted resuscitation strategy may be associated with higher mortality in patients with septic shock and normal capillary refill time: a post hoc analysis of the ANDROMEDA-SHOCK study[J]. Ann Intensive Care, 2020, 10(1): 114. DOI: 10.1186/s13613-020-00732-1.
- [39] ANDROMEDA-SHOCK-2 Investigators for the ANDROMEDA Research Network, Spanish Society of Anesthesiology, Reanimation and Pain Therapy (SEDAR), Latin American Intensive Care Network (LIVEN). Personalized hemodynamic resuscitation targeting capillary refill time in early septic shock: the ANDROMEDA-SHOCK-2 randomized clinical trial[J]. JAMA, 2025, 334(22): 1988-1999. DOI: 10.1001/jama.2025.20402.
- [40] Morimura N, Takahashi K, Doi T, et al. A pilot study of quantitative capillary refill time to identify high blood lactate levels in critically ill patients[J]. Emerg Med J, 2015, 32(6): 444-448. DOI: 10.1136/emered-2013-203180.
- [41] Hunter RB, Jiang S, Nishisaki A, et al. Supervised machine learning applied to automate flash and prolonged capillary refill detection by pulse oximetry[J]. Front Physiol, 2020, 11: 564589. DOI: 10.3389/fphys.2020.564589.
- [42] Monnet X, Marik P, Teboul JL. Passive leg raising for predicting fluid responsiveness: a systematic review and meta-analysis[J]. Intensive Care Med, 2016, 42(12): 1935-1947. DOI: 10.1007/s00134-015-4134-1.
- [43] Acheampong A, Vincent JL. A positive fluid balance is an independent prognostic factor in patients with sepsis[J]. Crit Care, 2015, 19(1): 251. DOI: 10.1186/s13054-015-0970-1.
- [44] Cecconi M, De Backer D, Antonelli M, et al. Consensus on circulatory shock and hemodynamic monitoring. Task force of the European Society of Intensive Care Medicine[J]. Intensive Care Med, 2014, 40(12): 1795-1815. DOI: 10.1007/s00134-014-3525-z.
- [45] Kawaguchi R, Nakada TA, Oshima T, et al. Optimal pressing strength and time for capillary refilling time[J]. Crit Care, 2019, 23(1): 4. DOI: 10.1186/s13054-018-2295-3.
- [46] Bickler PE, Feiner JR, Severinghaus JW. Effects of skin pigmentation on pulse oximeter accuracy at low saturation[J]. Anesthesiology, 2005, 102(4): 715-719. DOI: 10.1097/0000542-200504000-00004.
- [47] ADQI XII Investigators Group. Four phases of intravenous fluid therapy: a conceptual model[J]. Br J Anaesth, 2014, 113(5): 740-747. DOI: 10.1093/bja/aeu300.
- [48] Malbrain MLNG, Martin G, Ostermann M. Everything you need to know about dereuscitation[J]. Intensive Care Med, 2022, 48(12): 1781-1786. DOI: 10.1007/s00134-022-06761-7.
- [49] Beaubien-Souligny W, Rola P, Haycock K, et al. Quantifying systemic congestion with point-of-care ultrasound: development of the venous excess ultrasound grading system[J]. Ultrasound J, 2020, 12(1): 16. DOI: 10.1186/s13089-020-00163-w.

(收稿日期: 2026-01-26)

(本文编辑: 保健媛 张耘菲)

• 消息 •

关于杜绝和抵制第三方机构代写代投稿件的通知

近期中华医学会杂志社学术期刊出版平台在后台监测到部分用户使用虚假的手机号和 Email 地址注册账号, 这些账号的投稿 IP 地址与作者所在单位所属行政区域严重偏离, 涉嫌第三方机构代写代投。此类行为属于严重的学术不端, 我们已将排查到的稿件信息通报各编辑部, 杂志社新媒体部也将对此类账号做封禁处理, 相关稿件一律做退稿处理。

为弘扬科学精神, 加强科学道德和学风建设, 抵制学术不端行为, 端正学风, 维护风清气正的良好学术生态环境, 请广大读者和作者务必提高认识, 规范行为, 以免给作者的学术诚信、职业发展和所在单位的声誉带来不良影响。

(中华医学会杂志社)