

• 综述 •

外周灌注指数在脓毒性休克患者中的应用进展

安家判¹ 徐新琪¹ 杨婷玉¹ 李斌^{1,2} 窦志敏^{1,2}¹ 兰州大学第一临床医学院, 兰州 730000; ² 兰州大学第一医院重症医学科, 兰州 730000

通信作者: 窦志敏, Email: ldyy_douzhimin@lzu.edu.cn

【摘要】 脓毒性休克是重症监护病房(ICU)中常见的危重症,也是患者死亡的主要原因,微循环功能障碍是其病理生理基础。监测外周微循环功能有助于判断脓毒性休克的病情变化及评估治疗效果,而传统大循环参数并不能敏感地反映微循环的状况。外周灌注指数(PPI)由常见的血氧仪测得,其基于光电容积脉搏波描记法(PPG),通过计算外周搏动血流与非搏动组织对血氧仪探头发出的红光和红外光吸收的不同,能够实时反映外周血流灌注,从而实现无创、连续监测外周微循环功能。相较于ICU患者的其他监测指标,PPI常常被忽略,但近年来PPI在脓毒性休克患者的应用中取得了显著进展。在脓毒性休克早期阶段,PPI联合序贯器官衰竭评分(SOFA)可预测患者的病情进展,其动态变化可用于患者预后的评估。PPI不仅能指导脓毒性休克患者容量反应性评估,还可作为其液体复苏的目标以优化治疗策略。同时,PPI能辅助决定脓毒性休克患者血管活性药物启用时机及药物剂量的滴定,还可应用于机械通气患者撤机结局的预测以及评估患者器官功能障碍等。本文综述PPI的原理、影响因素及其在脓毒性休克中的临床应用进展,以期临床医生实施个体化干预、优化患者预后提供依据,推动脓毒性休克精准治疗的进一步发展。

【关键词】 外周灌注指数; 脓毒性休克; 微循环障碍; 监测**基金项目:** 国家自然科学基金(82160358)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250322-00287

The advances in the application of peripheral perfusion index in patients with septic shockAn Jiapan¹, Xu Xinqi¹, Yang Tingyu¹, Li Bin^{1,2}, Dou Zhimin^{1,2}¹The First School of Clinical Medicine, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; ²Department of Critical Care Medicine, the First Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Corresponding author: Dou Zhimin, Email: ldyy_douzhimin@lzu.edu.cn

【Abstract】 Septic shock, a prevalent critical condition in intensive care units (ICU) and a major cause of patient mortality, is fundamentally attributed to microcirculatory dysfunction. Traditional macrocirculatory parameters are often insufficiently sensitive to reflect microcirculatory status. Consequently monitoring peripheral microcirculatory function holds crucial significance for assessing disease progression and evaluating therapeutic efficacy in septic shock. The peripheral perfusion index (PPI), obtained from a standard pulse oximeter, is based on photoplethysmography (PPG). It calculates the differential absorption of red and infrared light emitted by the sensor between pulsatile arterial blood and non-pulsatile tissue, enabling real-time reflection of peripheral perfusion and thus providing non-invasive, continuous monitoring of microcirculatory function. Although often overlooked compared to other ICU monitoring parameters, PPI has demonstrated notable clinical advances in septic shock management. Specifically, in early identification, PPI combined with sequential organ failure assessment (SOFA) predicts disease progression, with its dynamic changes further aiding prognosis assessment. During fluid resuscitation, it guides fluid responsiveness evaluation and serves as a therapeutic target to optimize strategies. In circulatory support, it assists in determining vasoactive drug initiation timing and dosage titration. Additionally, PPI aids mechanical ventilation weaning and organ dysfunction evaluation. This article reviews the principles, influencing factors, and clinical application advances of PPI in septic shock, aiming to provide clinicians with a basis for individualized intervention, improved patient outcomes, and the advancement of precision medicine in septic shock management.

【Key words】 Peripheral perfusion index; Septic shock; Microcirculatory dysfunction; Monitoring**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (82160358)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20250322-00287

脓毒症是宿主对于感染的反应失调引起的危及生命的器官功能障碍;而脓毒性休克是指脓毒症合并严重的循环、细胞和代谢紊乱,即使进行充分液体复苏,仍然需要使用血管活性药维持平均动脉压(mean artery pressure, MAP) ≥ 65 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa),同时血清乳酸 ≥ 2 mmol/L^[1]。脓毒性休克是重症监护病房(intensive care unit, ICU)中较常见的危重症之一,其病死率高达40%以上^[2]。微循环障碍是

脓毒性休克最主要的病理生理改变,早期纠正微循环障碍可以改善脓毒性休克患者的预后^[3]。目前常用的床旁监测微循环的指标有毛细血管再充盈时间^[4]、皮肤温度梯度、斑驳评分等,但是这些指标易受操作者主观和环境因素等影响,最关键的是缺乏客观量化标准和无法连续监测。微循环的无创高级监测技术如甲襞微循环视频毛细血管镜检查、正交偏振光谱成像、侧流暗场成像、激光散斑对比成像^[5]等,

因需要复杂昂贵的设备及图像解读的复杂性等难以广泛应用于临床。此外,血液监测指标如乳酸、混合中心静脉血氧饱和度(central venous oxygen saturation, ScvO₂)、二氧化碳分压间隙等,因需反复进行动脉或静脉采血,可能增加感染风险,且检测耗时长,在临床应用也存在局限性。外周灌注指数(peripheral perfusion index, PPI)是基于脉搏血氧技术得出的参数,获取极为便捷,可以用于评价外周血流灌注,具有无创、简便、连续监测等优点,被越来越多地应用于脓毒性休克的诊疗。现系统总结 PPI 在脓毒性休克中的研究进展,以期阐明 PPI 在优化脓毒性休克诊疗中的临床价值。

1 脓毒性休克与外周灌注

组织灌注不足和微循环功能障碍是脓毒性休克的核心病理机制,其中血管内皮功能障碍、血管张力降低和微血栓形成在脓毒性休克导致外周灌注不足中发挥关键作用。

1.1 血管内皮功能障碍:正常血管内皮表面由内皮糖萼、细胞间连接和内皮细胞三部分构成,主要作用为调节血管通透性^[6],其在脓毒性休克时会发生以下变化:①内皮糖萼降解:内皮糖萼覆盖在血管内皮管腔表面,将内皮细胞与血液分隔,能够控制血管通透性和血管张力,具有防止微血栓形成、调节白细胞黏附等功能。脓毒性休克时,强烈的炎症反应使内皮细胞激活,诱导白细胞聚集,产生大量炎症因子,如白细胞介素-1(interleukin-1, IL-1)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)等,使内皮糖萼脱落^[7],这一过程导致白细胞黏附和毛细血管渗漏,血浆蛋白和液体进入到组织间隙,从而引发组织水肿^[8];同时,内皮糖萼降解还可刺激中性粒细胞聚集,进一步加剧炎症反应和促进疾病进展^[9]。②细胞间连接改变:血管内皮细胞间的连接分为紧密连接、黏附连接和缝隙连接,其在维持血管内皮的完整性、血管通透性中起着重要作用^[10]。脓毒性休克时,大量炎症因子通过血管内皮钙黏蛋白复合体解体、紧密连接蛋白异常及肌动蛋白-肌球蛋白收缩性骨架重构等多种机制破坏内皮细胞连接^[11-14]。③内皮细胞损伤:内皮细胞充当血液与血管平滑肌细胞之间的屏障,其损伤脱落后,不仅使血管结构完整性受到破坏,还会促进血管舒缩因子的异常释放,引发大量炎症因子释放及毛细血管通透性增加^[9]。内皮糖萼降解、细胞间连接改变和内皮细胞损伤所致的血管内皮功能障碍是最终导致脓毒性休克患者微循环血流紊乱及组织灌注不足的重要原因。

1.2 血管张力降低:正常平滑肌细胞通过乳酸、五羟色胺、前列环素、一氧化氮(nitric oxide, NO)、内皮素和血栓素等舒缩血管物质维持正常血管张力。脓毒性休克时,持续激活的交感神经系统导致缩血管受体的敏感性下降,因而对缩血管物质的反应性降低^[15]。脓毒性休克患者常伴有危重病相关的皮质类固醇功能不全(critical illness-related corticosteroid insufficiency, CIRCI),这对于缩血管物质的低反应性也有重要影响^[16]。同时,内皮细胞激活后会增加诱导型一氧化氮合酶(inducible nitric oxide synthase, iNOS)的表达和 NO 生成,导致外周血管扩张^[17]。因此,血管活性剂受体异常、类固醇

皮质激素功能不全和 NO 释放增加共同导致了脓毒性休克时外周血管张力的明显降低。

1.3 微血栓形成:脓毒性休克可通过内皮细胞损伤、细胞脱水及腺苷耗竭等多种机制显著改变血液流变学特性,导致红细胞变形能力下降,使其无法顺畅通过微循环^[18]。白细胞和血小板的激活与黏附增强可引发血管炎症反应,进一步促进微血栓形成,导致微循环血流阻塞^[19]。

上述脓毒性休克时的微循环改变会导致组织低灌注和缺氧,即使给予充分的液体复苏等治疗,宏观血流动力学参数恢复正常,组织微循环灌注障碍仍可能持续存在,这被称为“大循环-微循环耦联失调”^[20]。当大循环与微循环不同步时,患者病死率将显著升高。因此,对于脓毒性休克患者,应基于血流动力学状态全面评估大循环-微循环协调性,快速判断、分析、解读二者状态,动态调整液体复苏等治疗策略。

2 PPI 简介

2.1 PPI 的原理:PPI 由基于光电容积脉搏波描记法(photoplethysmography, PPG)的脉搏血氧仪测得,能够反映外周组织血流灌注。脉搏血氧仪探头通过发射特定波长的红外光,穿透人体组织后由光电探测器接收并转换为电信号,该信号可分为两种成分:一是搏动信号,其来自脉动血管内血红蛋白对光吸收的周期性变化,波动与心动周期同步,为交流(alternating current, AC)成分;二是非搏动信号,其来自于皮肤、骨骼等非脉动组织,为直流(direct current, DC)成分。PPI 为 AC/DC 比值,其通过测量脉动血流的比例,客观反映外周微循环中小动脉的搏动性血流强度,评估外周血流灌注,适用于监测脓毒性休克微循环功能。

2.2 PPI 的影响因素和临床意义:PPI 评估外周血流灌注主要取决于心排量(cardiac output, CO)和血管张力两大因素。临床上,脓毒性休克病理生理改变、液体复苏、血管活性药物使用、机械通气等因素都可以影响患者的心脏功能和血管张力,从而引起 PPI 的变化。脓毒性休克时 PPI 下降可较传统生物标志物更早识别微循环障碍,通过动态监测患者的 PPI 结合其他临床检测指标可以更好地利用 PPI 指导脓毒性休克的诊疗。需要注意的是,周围血管疾病、体温、疼痛和应激等因素均可在一定程度上影响 PPI 的准确性,研究亦发现性别、年龄、体质量^[21]及体位^[22]同样会改变 PPI 值,且 PPI 在健康人群中呈现偏态分布^[23]。所以在解释和应用 PPI 时,需要考虑上述主要决定因素和其他影响因素,同时尽量进行个体化动态分析,以更准确地评估患者的外周灌注状态。

3 PPI 在脓毒性休克患者中的应用

3.1 PPI 可早期识别脓毒性休克:可以通过 PPI 监测患者的微循环改变以实现早期识别和评估脓毒性休克。脓毒性休克时为了保证机体重要器官的灌注,外周组织灌注的减少通常会早于血压下降,而在治疗后较晚期才逐步恢复正常,为了保障重要器官功能需要在早期发现微循环变化并立即启动治疗。因此,对于脓毒性休克患者, PPI 在疾病的早期

识别和评估病情严重程度方面具有重要价值。Lima 等^[23]提出 $PPI < 1.4$ 可作为组织灌注不足的标志,并能早期预测器官功能衰竭及休克的发生。而 PPI 联合快速序贯器官衰竭评分(quick sequential organ failure assessment, qSOFA)能提高对急诊感染患者进展为脓毒症的预测效能^[24]。石远峰等^[25]研究发现,将 $PPI < 1.4$ 作为脓毒性休克诊断标准,其敏感度达到 94.3%。通过 PPI 早期识别脓毒性休克,有助于尽早给予治疗措施,改善患者预后。

3.2 PPI 可预测脓毒性休克患者预后:微循环异常的程度和持续时间显著影响脓毒性休克患者预后,通过对 PPI 的监测可以预测脓毒性休克患者的预后。入院时 PPI 下降及治疗期间 PPI 恢复较慢与患者预后不良显著相关。研究发现,入 ICU 6 h $PPI < 1.68$ 或 12 h $PPI < 1.86$ 的患者 28 d 病死率显著升高^[26];治疗后 48 h PPI 能很好地预测脓毒性休克患者 28 d 预后(敏感度为 94.1%,特异度为 93.9%),优于传统乳酸及宏观血流动力学指标^[27]。老年脓毒性休克患者 3 h 初始复苏后,PPI 联合中心静脉-动脉血二氧化碳分压差/动脉-中心静脉血氧含量差可以很好地预测 28 d 死亡风险^[28]。这些研究表明 PPI 在预测脓毒性休克患者预后方面有着显著的临床价值,其联合其他指标能进一步优化预测效能。

3.3 PPI 可指导脓毒性休克液体复苏:液体复苏是脓毒性休克治疗的基石,但如何在实现充分灌注的同时避免液体超负荷仍是临床中的一大难题。现行的复苏策略主要依赖于动脉血压、中心静脉压、MAP 等大循环指标,然而脓毒性休克患者常出现体循环与微循环血流动力学不一致的情况,这可能导致治疗中微循环得不到改善,从而无法有效纠正患者的器官灌注和氧合状况。有研究证明,脓毒性休克患者大循环状况改善后,并不会引起明显的微循环改变^[29]。使用微循环指标指导液体复苏时可以显著减少液体入量,同时实时评估患者的容量状态,防止出现液体超负荷^[30]。PPI 可通过实时反馈微循环灌注情况指导液体复苏,减少液体超负荷风险,使液体复苏更加精准和安全。

3.3.1 PPI 可评估容量反应性:在脓毒性休克液体复苏过程中,临床面临的问题是过量的液体复苏有可能导致患者液体超负荷,增加心脏负担,而容量反应性评估可以指导患者是否需要继续进行液体复苏。目前容量反应性评估主要基于 CO 在补液后的变化,而 CO 监测技术主要分为有创和无创两大类,有创监测如脉搏指示连续心排量监测(pulse indicator continuous cardiac output, PiCCO),部分患者置管难度高,且存在感染等并发症风险;而超声等无创监测技术,无法实现连续监测,并且对操作者的水平要求较高。PPI 作为评估外周血流灌注的指标,CO 是其主要决定因素之一,并且 Lian 等^[31]研究证明 PPI 的变化与 CO 的变化有明显的正相关性;同时,PPI 的测量方法简单,无创且可以连续监测,使 PPI 能够成为 CO 的无创替代指标;研究还发现,补液 30 min 后 PPI 增加 33% 可以预测患者容量反应性。另有研究发现,脓毒性休克患者输注 200 mL 晶体液 1 min 后,PPI 增加 5% 可以预测患者具有容量反应性^[32]。Aboelenin

等^[33]研究也发现,PPI 能够很好地预测脓毒性休克患者容量反应性(敏感度为 96.2%,特异度为 100%)。最近的研究发现,被动抬腿试验(passive leg raising, PLR)中 PPI 增加大于 9.7% 可以准确地预测脓毒症患者容量反应性(敏感度为 95.2%)^[34]。因此,PPI 可以广泛应用于脓毒性休克患者容量反应性的评估。

3.3.2 PPI 可作为液体复苏目标:在液体复苏中,设定明确的复苏目标对于治疗的成功至关重要。乳酸水平作为临床上液体复苏的主要参考目标已被广泛接受。但乳酸检测需要反复穿刺获取血样,导致感染风险增加,同时,实验室检测耗时导致结果滞后,且受肝功能异常、恶性肿瘤、药物等因素影响。PPI 可通过无创脉搏血氧仪实现连续监测液体复苏过程中的组织灌注,近年来有大量研究发现以其作为液体复苏目标能够使脓毒性休克患者获益更多,例如:van Genderen 等^[35]研究显示,采用 PPI 指导的复苏策略能够减少脓毒性休克患者的补液量,防止液体超负荷,并且与乳酸水平指导组相比,PPI 指导组患者的住院时间更短,序贯器官衰竭评分(sequential organ failure assessment, SOFA)也更低。最近的一项研究也发现,与 MAP 指导组相比,PPI 指导组脓毒症患者有着更短的 ICU 住院时间、更低的 28 d 病死率^[36]。同时有研究发现,PPI 指导的液体复苏能够显著减少脓毒性休克患者连续性肾脏替代治疗时间及 ICU 住院时间^[25]。此外,PPI 联合 ScvO₂ 能够更准确地预测患者 30 d 病死率^[37]。因此,以 PPI 作为目标的液体复苏策略能够减少补液量,缩短住院时间,且联合大循环指标能进一步优化个体化治疗策略。

3.4 PPI 可指导血管活性药物使用:当脓毒性休克患者经充分液体复苏后 MAP 仍无法维持 ≥ 65 mmHg 时,需立即使用血管活性药物治疗。血管活性药物通过增加血管张力,纠正血管扩张,使 MAP 升高,减少额外的液体入量,降低液体超负荷风险。然而,过高剂量的血管活性药物可能会导致周围微血管过度收缩,减少外周血流灌注,加重微循环障碍。最近的一项研究证实,过高剂量的去甲肾上腺素(norepinephrine, NE)是影响脓毒性休克患者预后的独立危险因素^[38]。PPI 与血管张力呈负相关,可以指导血管活性药物的应用时机和剂量调控。研究发现, $PPI < 0.3$ 可作为血管活性药物启动时机的有效预测指标^[39]。尽管维持 $MAP \geq 65$ mmHg 是多数脓毒性休克患者使用血管活性药物的目标,但个体化目标调整至关重要。研究显示,使用 NE 时达到最大 PPI 值对应的 MAP 存在显著个体差异^[29]。脓毒性休克患者使用 NE 过程中,较高的 PPI 是保护因素^[38]。通过 PPI 指导血管活性药物的使用,可以精准把握治疗时机和优化剂量调控,在保障外周血流灌注的同时,降低因高剂量药物导致的灌注不足风险,从而显著提升脓毒性休克患者的治疗效果,改善预后。

3.5 PPI 可预测机械通气撤机结局:脓毒性休克患者往往存在呼吸衰竭并需要机械通气,而判断患者能否顺利撤机是临床医生面临的一大挑战。心功能障碍是导致撤机失败的

重要原因^[40],传统撤机预测参数(如浅快呼吸指数、膈肌功能指标)因无法评估心脏功能或诊断效能不高无法准确预测患者的撤机结局^[41]。PPI 通过实时反映 CO 的变化,为撤机过程中心功能评估提供了新的方案。在撤机时,患者由机械通气转为自主呼吸,此过程中胸腔内压由正压转为负压,会导致心脏前负荷增加(静脉回流增加)和后负荷升高(左室跨壁压增加)。当患者存在心功能障碍时,撤机引起的前负荷增加并不能有效转换为 CO 的增加,进而导致 PPI 的增加幅度较心功能正常患者降低,从而通过 PPI 的变化可以预测患者的撤机结局。Lotfy 等^[42]研究发现,若 30 min 的自主呼吸试验(spontaneous breathing trial, SBT)后 PPI 增加小于 40%,再插管风险显著升高(特异度为 72%,敏感度为 94%)。通过 PPI 无创、实时监测撤机期间心功能,可以敏感地预测撤机结局,弥补传统参数的不足,优化撤机策略。

3.6 PPI 在脓毒性休克中其他器官功能障碍中的应用:脓毒性休克患者因自主神经功能障碍可导致血流动力学紊乱。半直立位应激试验时,血液因重力向下肢聚集,回心血量减少,健康人群通过交感神经兴奋引起血管收缩及心率代偿性增快,从而维持血压稳定,表现为 PPI 显著降低。而脓毒性休克患者因炎症反应干扰自主神经调节功能,PPI 下降幅度减弱,提示交感神经代偿能力受损,与休克进展相关^[43]。

脓毒性休克患者常并发急性肾损伤(acute kidney injury, AKI),其发生与肾脏灌注不足密切相关,PPI 在 AKI 的早期预警和预后评估中具有重要价值。研究发现,术中 PPI 较低与 AKI 发生显著相关^[44]。进一步研究显示,患者入院 72 h 内 PPI 持续较低可有效预测脓毒症相关 AKI 的死亡风险因素,同时可反映全身低灌注状态下肾脏氧供失衡及微循环障碍^[45]。

PPI 还可以提示脓毒性休克患者的器官功能损害。研究发现,脓毒性休克患者 PPI 与凝血功能指标凝血酶原时间(prothrombin time, PT)、活化部分凝血活酶时间(activated partial thromboplastin time, APTT)以及心肌损伤标志物心肌肌钙蛋白 I(cardiac troponin I, cTnI)呈显著负相关^[46],PPI 降低可能提示凝血系统激活、心肌细胞损伤,可以作为多器官功能损害的早期预警指标。

4 PPI 临床应用的局限性

尽管 PPI 在脓毒性休克的诊疗中具有良好的临床应用价值,但在 PPI 的应用过程中需注意以下问题:首先,PPI 可能受体温、疼痛、外周血管疾病、运动伪影以及设备误差等的影响,增加了解释的复杂性。其次,PPI 在健康人群中呈现偏态分布,很难确定阈值,在解释和应用 PPI 时更需关注其动态变化。此外,因为品牌设备不同及算法差异导致各个研究数据无法直接对比,限制了 PPI 在多中心研究中的应用。因此,将 PPI 应用于脓毒性休克的诊疗过程中需要考虑个体差异,结合患者的其他监测指标,提高其临床应用价值。

5 总结与展望

PPI 作为临床容易获得的床旁指标,通过无创、实时评估微循环状态,在脓毒性休克的早期识别、预后评估、液体

复苏、血管活性药物使用、机械通气撤机及评估器官功能障碍中展现出良好的应用前景。尽管 PPI 的临床应用仍面临着测量技术、个体差异等局限性,但随着临床对 PPI 的重视程度不断提高,相关研究日益增多,结合新型传感技术、多参数联合监测以及大数据人工智能分析,PPI 有望在脓毒性休克管理中发挥更大的作用。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Singer M, Deutschman CS, Seymour CW, et al. The third international consensus definitions for sepsis and septic shock (Sepsis-3) [J]. JAMA, 2016, 315 (8): 801-810. DOI: 10.1001/jama.2016.0287.
- [2] Evans L, Rhodes A, Alhazzani W, et al. Surviving Sepsis Campaign: international guidelines for management of sepsis and septic shock 2021 [J]. Intensive Care Med, 2021, 47 (11): 1181-1247. DOI: 10.1007/s00134-021-06506-y.
- [3] González R, Urbano J, López-Herce J. Resuscitating the macro- vs. microcirculation in septic shock [J]. Curr Opin Pediatr, 2024, 36 (3): 274-281. DOI: 10.1097/MOP.0000000000001345.
- [4] Huang WP, Xiang H, Hu C, et al. Association of sublingual microcirculation parameters and capillary refill time in the early phase of ICU admission [J]. Crit Care Med, 2023, 51 (7): 913-923. DOI: 10.1097/CCM.0000000000005851.
- [5] Aksu U, Yavuz-Aksu B, Goswami N. Microcirculation: current perspective in diagnostics, imaging, and clinical applications [J]. J Clin Med, 2024, 13 (22): 6762. DOI: 10.3390/jcm13226762.
- [6] Joffe J, Hellman J, Ince C, et al. Endothelial responses in sepsis [J]. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 202 (3): 361-370. DOI: 10.1164/rccm.201910-1911TR.
- [7] Uchimido R, Schmidt EP, Shapiro NI. The glycocalyx: a novel diagnostic and therapeutic target in sepsis [J]. Crit Care, 2019, 23 (1): 16. DOI: 10.1186/s13054-018-2292-6.
- [8] Maneta E, Aivalioti E, Tual-Chalot S, et al. Endothelial dysfunction and immunothrombosis in sepsis [J]. Front Immunol, 2023, 14: 1144229. DOI: 10.3389/fimmu.2023.1144229.
- [9] Wang H, Ding H, Wang ZY, et al. Research progress on microcirculatory disorders in septic shock: a narrative review [J]. Medicine (Baltimore), 2024, 103 (8): e37273. DOI: 10.1097/MD.0000000000037273.
- [10] Liu Z, Ting Y, Li M, et al. From immune dysregulation to organ dysfunction: understanding the enigma of sepsis [J]. Front Microbiol, 2024, 15: 1415274. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1415274.
- [11] Gavard J. Endothelial permeability and VE-cadherin: a wacky comradeship [J]. Cell Adh Migr, 2014, 8 (2): 158-164. DOI: 10.4161/cam.29026.
- [12] Rho SS, Ando K, Fukuhara S. Dynamic regulation of vascular permeability by vascular endothelial cadherin-mediated endothelial cell-cell junctions [J]. J Nippon Med Sch, 2017, 84 (4): 148-159. DOI: 10.1272/jnms.84.148.
- [13] Hartsock A, Nelson WJ. Adherens and tight junctions: structure, function and connections to the actin cytoskeleton [J]. Biochim Biophys Acta, 2008, 1778 (3): 660-669. DOI: 10.1016/j.bbame.2007.07.012.
- [14] ADQI XIV Workgroup. The endothelium in sepsis [J]. Shock, 2016, 45 (3): 259-270. DOI: 10.1097/SHK.0000000000000473.
- [15] Huang L, Huang QB, Ma WQ, et al. Understanding hemodynamic incoherence: mechanisms, phenotypes, and implications for treatment [J]. Shock, 2025, 63 (3): 342-350. DOI: 10.1097/SHK.0000000000002507.
- [16] Fowler C, Raoof N, Pastores SM. Sepsis and adrenal insufficiency [J]. J Intensive Care Med, 2023, 38 (11): 987-996. DOI: 10.1177/08850666231183396.
- [17] Hu DX, Sheeja Prabhakaran H, Zhang YY, et al. Mitochondrial dysfunction in sepsis: mechanisms and therapeutic perspectives [J]. Crit Care, 2024, 28 (1): 292. DOI: 10.1186/s13054-024-05069-w.

- [18] Secor D, Li FY, Ellis CG, et al. Impaired microvascular perfusion in sepsis requires activated coagulation and P-selectin-mediated platelet adhesion in capillaries [J]. *Intensive Care Med*, 2010, 36 (11): 1928–1934. DOI: 10.1007/s00134-010-1969-3.
- [19] Aklilu A, Lai MS, Jiang ZW, et al. Immunothrombosis in sepsis: cellular crosstalk, molecular triggers, and therapeutic opportunities: a review [J]. *Int J Mol Sci*, 2025, 26 (13): 6114. DOI: 10.3390/ijms26136114.
- [20] 何怀武, 刘大为, 隆云. 休克复苏: “大循环-微循环”偶联的提出与内涵 [J]. *中华医学杂志*, 2018, 98 (35): 2781–2784. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2018.35.002.
- [21] Okada H, Tanaka M, Yasuda T, et al. Decreased microcirculatory function measured by perfusion index is predictive of cardiovascular death [J]. *Heart Vessels*, 2020, 35 (7): 930–935. DOI: 10.1007/s00380-020-01567-3.
- [22] Tapar H, Karaman S, Dogru S, et al. The effect of patient positions on perfusion index [J]. *BMC Anesthesiol*, 2018, 18 (1): 111. DOI: 10.1186/s12871-018-0571-z.
- [23] Lima AP, Beelen P, Bakker J. Use of a peripheral perfusion index derived from the pulse oximetry signal as a noninvasive indicator of perfusion [J]. *Crit Care Med*, 2002, 30 (6): 1210–1213. DOI: 10.1097/00003246-200206000-00006.
- [24] 伍卓文, 高子娴, 舒鑫妮, 等. 外周灌注指数联合 qSOFA 评分预警分层评估急诊感染患者的临床价值 [J]. *中国急救医学*, 2021, 41 (9): 755–758. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1949.2021.09.004.
- [25] 石远峰, 殷睿宏, 王言理, 等. PPI 在脓毒性休克早期诊断及治疗中的意义: 一项前瞻性单盲随机对照试验 [J]. *中华危重病急救医学*, 2017, 29 (12): 1065–1070. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4352.2017.12.003.
- [26] Chi C, Gong H, Yang K, et al. Early peripheral perfusion index predicts 28-day outcome in patients with septic shock [J]. *World J Emerg Med*, 2024, 15 (5): 372–378. DOI: 10.5847/wjem.j.1920-8642.2024.081.
- [27] Shahsavarinia K, Sabzevari T, Shadvar K, et al. Comparison of predictive ability of macrocirculation and microcirculation markers on outcomes of patients with septic shock during initial fluid resuscitation: a prospective observational study [J]. *Intensive Care Research*, 2024, 4 (1): 38–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44231-024-00059-6>.
- [28] 宫平, 刘倩, 王啸, 等. 早期 PI 联合 Pv-aCO₂/Ca-vO₂ 预测老年脓毒性休克的死亡风险 [J/OL]. *中华临床医师杂志 (电子版)*, 2024, 18 (3): 253–258. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-0785.2024.03.004.
- [29] He HW, Liu WL, Zhou X, et al. Effect of mean arterial pressure change by norepinephrine on peripheral perfusion index in septic shock patients after early resuscitation [J]. *Chin Med J (Engl)*, 2020, 133 (18): 2146–2152. DOI: 10.1097/CM9.0000000000001017.
- [30] Zhou QX, Dai CY, Zhu Y, et al. The effectiveness and feasibility of fluid resuscitation directed by microcirculation monitoring in patients with septic shock: a randomized controlled trial [J]. *Ann Palliat Med*, 2021, 10 (8): 9069–9077. DOI: 10.21037/apm-21-1971.
- [31] Lian H, Wang XT, Zhang Q, et al. Changes in perfusion can detect changes in the cardiac index in patients with septic shock [J]. *J Int Med Res*, 2020, 48 (8): 300060520931675. DOI: 10.1177/0300060520931675.
- [32] Hasanin A, Karam N, Mukhtar AM, et al. The ability of pulse oximetry-derived peripheral perfusion index to detect fluid responsiveness in patients with septic shock [J]. *J Anesth*, 2021, 35 (2): 254–261. DOI: 10.1007/s00540-021-02908-w.
- [33] Aboelenin MA, Randa RA, Mohamed FA. The ability of pulse oximetry-derived peripheral perfusion index to detect fluid responsiveness in patients with septic shock [J]. *Al-Azhar International Medical Journal*, 2024, 5 (5): 19. DOI: <https://doi.org/10.58675/2682-339X.2421>.
- [34] Casazzo M, Pisani L, Md Erfan Uddin RA, et al. The accuracy of the passive leg raising test using the perfusion index to identify preload responsiveness: a single center study in a resource-limited setting [J]. *Diagnostics (Basel)*, 2025, 15 (1): 103. DOI: 10.3390/diagnostics15010103.
- [35] van Genderen ME, Engels N, van der Valk RJ, et al. Early peripheral perfusion-guided fluid therapy in patients with septic shock [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2015, 191 (4): 477–480. DOI: 10.1164/rccm.201408-1575LE.
- [36] Singh RB, Shekhar S, Sinha S, et al. An observational study to correlate peripheral perfusion index as a predictor of hypotension and mortality in sepsis patients [J]. *Cureus*, 2025, 17 (3): e80431. DOI: 10.7759/cureus.80431.
- [37] He HW, Long Y, Liu DW, et al. Clinical classification of tissue perfusion based on the central venous oxygen saturation and the peripheral perfusion index [J]. *Crit Care*, 2015, 19 (1): 330. DOI: 10.1186/s13054-015-1057-8.
- [38] Wang C, Wang XT, Zhang HM, et al. Effect of norepinephrine on peripheral perfusion index and its association with the prognosis of patients with sepsis [J]. *J Intensive Care Med*, 2024, 39 (1): 21–27. DOI: 10.1177/08850666231187333.
- [39] Rasmy I, Mohamed H, Nabil N, et al. Evaluation of perfusion index as a predictor of vasopressor requirement in patients with severe sepsis [J]. *Shock*, 2015, 44 (6): 554–549. DOI: 10.1097/SHK.0000000000000481.
- [40] de Meirelles Almeida CA, Nedel WL, Morais VD, et al. Diastolic dysfunction as a predictor of weaning failure: a systematic review and meta-analysis [J]. *J Crit Care*, 2016, 34: 135–41. DOI: 10.1016/j.jcrc.2016.03.007.
- [41] Fernandez R, Raurich JM, Mut T, et al. Extubation failure: diagnostic value of occlusion pressure (P0.1) and P0.1-derived parameters [J]. *Intensive Care Med*, 2004, 30 (2): 234–240. DOI: 10.1007/s00134-003-2070-y.
- [42] Lotfy A, Hasanin A, Rashad M, et al. Peripheral perfusion index as a predictor of failed weaning from mechanical ventilation [J]. *J Clin Monit Comput*, 2021, 35 (2): 405–412. DOI: 10.1007/s10877-020-00483-1.
- [43] Guimarães LB, Guimarães CM, Carraro Junior H, et al. Peripheral perfusion response to semiorthostatic stress: a simple method for assessing autonomic dysfunction in sepsis? [J]. *Crit Care Sci*, 2024, 36: e20240090en. DOI: 10.62675/2965-2774.20240090-en.
- [44] Kang P, Park JB, Yoon HK, et al. Association of the perfusion index with postoperative acute kidney injury: a retrospective study [J]. *Korean J Anesthesiol*, 2024, 77 (2): 285. DOI: 10.4097/kja.22620.e1. Erratum for: *Korean J Anesthesiol*, 2023, 76 (4): 348–356. DOI: 10.4097/kja.22620.
- [45] de Miranda AC, de Menezes IAC, Junior HC, et al. Monitoring peripheral perfusion in sepsis associated acute kidney injury: analysis of mortality [J]. *PLoS One*, 2020, 15 (10): e0239770. DOI: 10.1371/journal.pone.0239770.
- [46] Guo QR, Lian H, Wang GJ, et al. Prospective evaluation of the peripheral perfusion index in assessing the organ dysfunction and prognosis of adult patients with sepsis in the ICU [J]. *J Intensive Care Med*, 2024, 39 (11): 1109–1119. DOI: 10.1177/08850666241252758.

(收稿日期: 2025-03-22)

(本文编辑: 保健媛 马英)