

机体不同状态下微循环变化的最新进展

涂梦漪, 陈星合, 罗 蓝, 程 镒, 李冬雪, 陈 杰*

重庆医科大学附属第二医院麻醉科, 重庆

收稿日期: 2025年7月5日; 录用日期: 2025年7月28日; 发布日期: 2025年8月7日

摘 要

微循环是组织和血液交换氧气的重要部位。围术期多种因素可以影响微循环导致其变化。随着科学技术的发展, 从机体微循环角度出发进行围术期管理受到越来越多的关注。以微循环为导向的液体治疗无疑将成为未来麻醉管理的一个重要方向。随着微循环监测的更广泛使用和更多的临床试验, 临床医生将来可能会更好地了解和管理手术患者的微循环。目前关于微循环改变的临床相关性的知识是基于先前在各种临床环境中的研究进行总结的。不同手术围术期微循环的变化具有复杂性和多样性。了解这些变化对于优化围术期管理、降低并发症风险具有重要意义。未来需要进一步深入研究微循环的病理生理机制及其在不同手术类型中的变化规律, 以指导临床实践并推动微循环监测技术的发展和應用。

关键词

微循环, 围术期, 手术

The Latest Progress in Microcirculation Changes under Different States of the Body

Mengyi Tu, Xinghe Chen, Lan Luo, Yi Chen, Dongxue Li, Jie Chen*

Department of Anesthesiology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Jul. 5th, 2025; accepted: Jul. 28th, 2025; published: Aug. 7th, 2025

Abstract

The microcirculation is an important part of the tissue and blood exchange oxygen. Perioperative microcirculation can be affected by a variety of factors leading to its change. With the development of science and technology, more and more attention has been paid to perioperative management from the perspective of body microcirculation. Microcirculation-oriented fluid

*通讯作者。

文章引用: 涂梦漪, 陈星合, 罗蓝, 程镒, 李冬雪, 陈杰. 机体不同状态下微循环变化的最新进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(8): 513-521. DOI: 10.12677/acm.2025.1582261

therapy will undoubtedly become an important direction of anesthesia management in the future. With more widespread use of microcirculation monitoring and more clinical trials, clinicians may in the future better understand and manage microcirculation in surgical patients. Current knowledge about the clinical relevance of microcirculation changes is summarized based on previous studies in various clinical Settings. The changes of microcirculation during perioperative period are complex and diverse. Understanding these changes is important for optimizing perioperative management and reducing the risk of complications. In the future, it is necessary to further study the pathophysiological mechanism of microcirculation and its changes in different surgical types in order to guide clinical practice and promote the development and application of microcirculation monitoring technology.

Keywords

Microcirculation, Perioperative, Surgery

Copyright © 2025 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

微循环作为心血管系统中最小的血管网络，在手术围术期中扮演着至关重要的角色。近年来，随着技术的进步，人们对微循环在手术围术期的变化有了更深入的了解。目前监测微循环的手段多种多样，包括毛细血管显微镜(手持式生命显微镜)、旁流暗场成像技术、激光多普勒流量计、血管闭塞测试、近红外光谱分析以及激光散斑等，这些技术能够对人体多个部位如舌下、直肠、甲襞、球结膜、肝脏、胰腺、肾脏、食管及胃等的微循环状况进行测量与评估[1]-[5]。根据微循环进行围术期个体化管理将是围术期麻醉管理的发展方向，本文对不同手术围术期微循环的变化和相关研究进展进行了综述[6]。

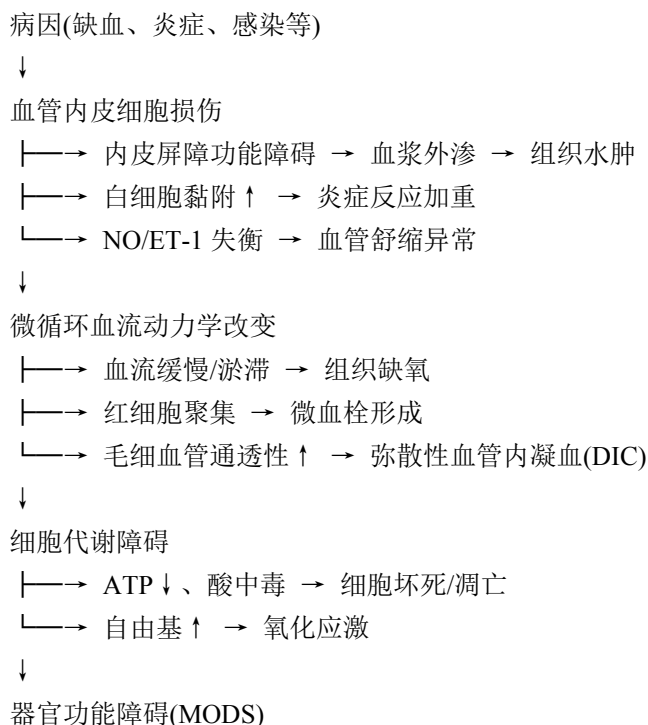
2. 微循环概述

2.1. 基本生理

微循环是体循环的终末血管网络，由直径为 $<20\mu\text{m}$ 的微血管组成。这些微血管由小动脉、毛细血管后小静脉、毛细血管及其(亚)细胞成分组成[7]。含有携氧红细胞的小动脉是我们体内主要的阻力血管。小动脉的收缩和扩张调节器官内的血流分布。毛细血管是动态血管，位于包含平滑肌细胞的小动脉之间，并调节血流和小静脉。血流的分布和大小是小动脉、毛细血管和静脉段之间响应代谢需求的协调相互作用。毛细血管网络的解剖结构在不同器官和组织之间也有很大差异[8]。微循环内的毛细血管是向组织和细胞输送氧气和营养物质、信号分子和药物产品的重要分配中心。它们还支持去除废物，在流体运动和温度控制中至关重要[9]。毛细血管的内壁由紧密连接的内皮细胞组成，内皮细胞通过贴壁连接紧密相连，内皮细胞最重要的亚细胞结构之一是位于内皮管腔侧的糖萼[10][11]。糖萼主要由蛋白聚糖、糖胺聚糖和糖蛋白组成，与内皮细胞形成一个功能单元，保证内皮细胞的完整性并调节血管通透性。微循环作为心血管系统的最终目的地，承载着将氧气输送到目标区域的重任。在这一过程中，它负责将红细胞中的氧气转移至实质细胞。这个功能确保了实质细胞能够获得所需的氧气，以满足其能量需求，进而支撑细胞的各种功能活动。在生理条件下，内皮细胞与平滑肌细胞共生，主要通过调节小动脉血管素来调节微血管流量，毛细血管红细胞流量由需求决定，并由代谢、肌源性和神经体液调节控制[12]。因此，毛细血管

红细胞流动不仅可能在不同器官之间变化,而且在单个器官内部也可能不同。毛细血管网络的解剖结构在不同器官和组织之间也有很大差异[8]。微循环的其他功能包括调节血管内和腋膜间隙之间的溶质交换,并负责将所有血液传播的激素和营养物质输送到组织细胞,包括介导免疫系统的功能活动和止血。有研究表明,器官功能与微循环功能有关,在围术期维持足够和有效的微循环功能至关重要[13]。

2.2. 微循环病理机制



2.3. 监测手段及方法

2.3.1. 直接可视化技术

1) 正交偏振光谱成像(Orthogonal Polarization Spectral Imaging, OPS)

原理: 利用偏振光消除表面反射, 通过绿光(548 nm)被血红蛋白吸收的特性, 直接观察舌下、结膜等黏膜下微血管(直径 10~100 μm)。

参数指标: 微血管密度(TVD)、灌注血管密度(PVD)、血流指数(MFI)。

优势: 非侵入性、实时动态监测。

局限: 图像易受运动伪影干扰, 仅限浅表组织观察。

围术期应用: 心脏手术中用于评估体外循环对微循环的影响, 脓毒症患者液体复苏效果监测。

2) 侧流暗场成像(Sidestream Dark Field Imaging, SDF)

升级版 OPS: 采用 LED 环形光源(530 nm)和侧流暗场技术, 分辨率更高(<1 μm), 可清晰显示红细胞流动。

典型设备: MicroScan® (MicroVision Medical)。

围术期研究: 用于腹部大手术中肠道微循环障碍的早期预警, 与乳酸水平联合预测术后器官衰竭。

3) 入射暗场成像(Incident Dark Field Imaging, IDF)

第三代技术: 整合自动聚焦和图像稳定算法, 支持视频分析软件(如 AVA® 4.3)。

临床价值：在创伤性休克患者中证实微循环改善早于宏观血流动力学参数恢复。

2.3.2. 间接评估技术

1) 激光多普勒血流仪(Laser Doppler Flowmetry, LDF)

原理：通过红细胞运动引起的多普勒频移计算组织血流量。

应用场景：皮肤移植术后皮瓣灌注监测，脊髓手术中脊髓微循环评估。

局限：仅反映相对血流变化，无法区分动静脉血流。

2) 近红外光谱技术(Near-Infrared Spectroscopy, NIRS)

组织氧饱和度(StO_2)监测：通过 700~850 nm 近红外光检测氧合/脱氧血红蛋白比例。

围术期应用：心脏手术中脑氧饱和度监测，血管外科术后肢体缺血评估。

新兴技术：空间分辨光谱(SRS-NIRS)可区分浅层与深层组织氧合。

3) 血管阻断试验(Vascular Occlusion Test, VOT)

方法：袖带加压阻断血流后释放，通过 NIRS 或 LDF 测量再灌注斜率。

参数意义：反映内皮功能及微血管反应性，预测术后急性肾损伤风险。

2.3.3. 功能性监测技术

1) 微血管通透性评估

荧光示踪技术：静脉注射荧光素钠/吲哚菁绿(ICG)，通过渗漏速率定量血管通透性。

围术期研究：脓毒症患者毛细血管渗漏综合征的定量诊断。

2) 舌下微循环视频显微镜

便携式设备：如 Cytocam® (手持式 IDF 探头)，可术中使用。

术中管理指导：指导液体复苏时发现“微循环-宏观循环解离”现象(MAP 正常但微循环灌注不足)。

2.3.4. 生物标志物与实验室检测

1) 内皮损伤标志物

可溶性血栓调节蛋白(sTM)、血管性血友病因子(vWF)：反映内皮细胞损伤程度。

围术期意义：心脏手术后 sTM 升高与微循环障碍相关。

2) 微颗粒(Microparticles)

来源：内皮细胞、血小板等释放的 0.1~1 μm 囊泡。

检测方法：流式细胞术(标记 CD31+/CD42b-为内皮源性)。

临床应用：预测术后多器官功能障碍综合征(MODS)。

2.3.5. 新兴技术与发展趋势

1) 人工智能辅助分析

深度学习算法：自动识别微血管网络(如 U-Net 架构)，定量计算灌注异质性指数(HI)。

临床验证：AI 分析舌下微循环视频的 MFI 与传统人工分析一致性达 93%。

2) 可穿戴微循环监测

柔性电子传感器：基于光电体积描记术(PPG)的无线贴片，持续监测皮肤微循环波动。

研究进展：MIT 开发的 Laser Speckle Contrast Imaging (LSCI)可穿戴设备用于术中实时监测。

3) 多模态联合监测

整合方案：IDF 成像 + ICG 清除率 + NIRS，综合评估结构、功能及代谢(如肝移植术中的微循环-线粒体耦联)。

总结：

检测技术	证据等级	成本	适用场景
正交偏振光谱成像 (ops)	中等(IIb 类)	中等	术中监测、休克评估、皮肤微循环观察，但逐渐被 SDF 取代 侧流暗场成像(SDF)中等(IIa 类)中高重症监护(脓毒症、心衰)、围术期监测，图像质量优于 OPS
激光多普勒血流仪 (LDF)	低(IIb 类)	低至中等	慢性伤口评估、糖尿病足、雷诺现象，但仅能测相对血流变化
组织血氧监测 (NIRS)	中等(IIa 类)	中等	创伤、休克、运动医学，监测组织氧合，但受皮下脂肪厚度影响
血管闭塞试验 (VOT)	高(I 类)	极低(无设备成本)	床旁评估内皮功能(如脓毒症、心源性休克)，需结合其他技术
舌下微循环视频显微镜	高(I 类)	高	脓毒症、COVID-19 等重症的预后评估，需专业分析软件
毛细血管显微镜	低(III 类)	低	风湿病(硬皮病)、慢性血管病变筛查，操作简单但主观性强

3. 不同手术的微循环

3.1. 危重症患者

微循环功能障碍被认为是脓毒血症进展中的一个关键病理生理过程。持续性微循环异常可能导致多器官系统衰竭和死亡[14][15]。在脓毒症患者中，微循环功能障碍先于大循环异常出现，这是临床结局最强的预测指标之一[16]。脓毒症与微循环的变化有关，其机制有多种，包括内皮功能障碍、糖萼降解、血细胞流变学改变(红细胞变形能力降低)以及血管舒张和血管收缩物质水平之间的失衡[17]。在感染性休克期间，微循环发生巨大变化，包括由于全身压力降低和局部小动脉收缩导致灌注压降低进而毛细血管血流减慢。在严重的脓毒症中，微循环在早期被关闭，使灌注不足和微生物攻击的影响在其破坏能力中占上风。最终可能发生广泛的毛细血管扩张。微循环功能障碍在非幸存者中更为严重，基于治疗干预的幸存者和非幸存者对微循环功能障碍的恢复也存在差异。然而，随着血流通过一些动静脉通道转移，毛细血管交换的重要区域被绕过。休克期间毛细血管血流量减少是由于红细胞和中性粒细胞无法正常通过所致。这种缺陷的发生在一定程度上是由于灌注压力降低、红细胞和白细胞的变形能力降低、小动脉收缩、循环阻塞性碎片(包括血红蛋白)以及微血管被“淤泥”堵塞。其他因素包括细胞粘附在毛细血管和静脉上皮膜上，导致血流阻力增加、通过异常经毛细血管交换导致液体流失、不同床层(例如肠道与肌肉)之间血管阻力变化的差异，以及相对缺乏对循环小血管段的调节性神经体液控制。据报道，在脓毒症期间，内皮细胞可调节血管张力，控制局部血流，影响液体和浆蛋白渗入组织的速率，调节白细胞向组织中的积累和外渗，并影响白细胞活化。由于许多破坏性因素占主导地位，可能会发生随后的一轮组织损伤。由于毛细血管淤滞时间延长、血流不足和损伤细胞释放的因子，微循环成为不受控制的细菌生长的陷阱，而持续的低氧血症、酸中毒和毒血症会增强这种生长。这些事件可能结合在一起，导致正常细胞完整性的丧失和宿主的死亡。

既往研究表明，脓毒症患者微循环血流存在显著异质性，灌注毛细血管旁边存在闭塞的毛细血管，诱导微循环分流，导致脓毒症的氧气提取能力降低[18]。与脓毒症中氧提取减少相反，最近一项关于 COVID-19 微循环反应的研究发现，微循环在响应 COVID-19 诱导的低氧血症时存在适应性反应，以增加其氧提取能力[19]。这种 COVID-19 诱导的微循环氧提取能力的增加归因于功能性毛细血管密度和毛细血管血细胞比容的增加。但是，由于炎症诱导的内皮和糖萼改变以及伴随的促凝状态，适应性反应在过度炎症期间可能会受损[20]。

Ospina 等人的一项研究发现,补液可以改善脓毒症早期的微循环,但不能改善脓毒症后期的微循环。此外, Pottecher 等表明,第一次推注液体而不是第二次推注液体可以改善舌下微循环事实上,这些发现强调了微循环在对液体反应中的重要性,并支持评估微循环以指导液体滴定的必要性[21]。

3.2. 心脏手术

心脏手术是引起强烈炎症反应最具侵入性的手术之一[22]。心脏手术通常需要体外循环,其最大的优势是能够在心脏停搏时进行手术从而排除心脏跳动的干扰,一些与体外循环相关的因素可能会影响微循环,并可能导致严重的血流动力学改变和全身炎症这些因素包括体温过低、非搏动血流、血管活性药物和血液稀释[23]-[25]。同时,心力衰竭和心源性休克与微循环功能障碍有关。虽然既往大多数临床试验只招募了少数患者,但也观察到一定程度的微循环功能障碍。还有研究表明,麻醉本身可能诱发微循环改变[26]。通常认为,在进行体外循环的心脏手术中,舌下微循环受损。然而,调查心脏手术联合体外循环对舌下微循环影响的研究产生了相互矛盾的结果。一些研究报告表面,微血管血流指数没有重要变化或毛细血管密度在进行体外循环的心脏手术期间。很少有研究表明,体外循环心脏手术可能会降低微血管血流指数或毛细血管密度,恰恰相反,甚至两者都增加。大多数关于心脏手术期间微循环的研究都很少。体外循环期间非搏动血流与搏动血流对舌下微循环影响的研究结果尚无定论。因此,在体外循环期间,脉动血流是否比非脉动血流对器官灌注有益,这仍然是个未知数。值得注意的是,不仅体外循环,而且非体外循环冠状动脉旁路移植手术期间的心脏移位也可能导致微循环损伤。

据报道,在接受体外循环心脏手术的瓣膜病或冠状动脉疾病患者中,微循环灌注受损与出血等不良结局独立相关,这意味着术前微循环评估可能在预测手术结局时提供更多信息[27][28]。微循环评估可能是识别心脏手术后出血过多这一类高风险患者的宝贵工具。此外,微循环是止血和凝血的主要部位,微血管内皮细胞可以表达抗血栓形成分子和促凝血剂,促进血液凝固和纤维蛋白溶解的过程,提示微循环功能障碍可能增加心脏手术后出血过多的风险。

3.3. 非心脏手术

在接受择期手术的患者中,舌下微循环通常是完整且功能正常的。全麻诱导会略微降低毛细血管红细胞流动并增加毛细血管密度。几项研究表明,在全身麻醉的非心脏手术中,舌下微循环得以保留并保持功能。最近的一项观察性研究调查了120例选择性非心脏手术患者舌下微循环情况,其中40例接受过低风险小型泌尿外科手术,40例接受过骨科/创伤手术,40例接受过腹部大手术[13]。这项研究纳入了患有高风险手术的慢性合并症患者。然而,在手术过程中,大循环变量由麻醉科医师常规维持,舌下微循环保持功能正常。具体来说,尽管微循环变量因个体而异,但平均舌下毛细血管流量或毛细血管密度没有显著的术中变化。在30名接受开放式前列腺切除术的患者中,舌下微循环也保持功能,并采用非常严格的液体管理策略[29]。在42例进行了上消化道大手术(主要是肝脏和胰腺手术)患者的一项研究中,他们在手术期间乳酸浓度显著增加,尽管表明氧气输送和需求之间存在不匹配,而舌下微循环监测未检测到这一点[30]。尽管在择期非心脏手术期间,舌下微循环似乎得到保留并保持功能,并在手术后不久恢复到诱导前的水平,舌下微循环的改变是否仅在手术后才发生,目前还很少研究[31]。有人认为,舌下微循环的术后改变与腹部手术后的术后感染并发症有关和术后体液平衡[32]。非心脏手术后舌下微循环是否受损仍然是一个正在进行的研究主题。

4. 围术期监测微循环的意义

尽管围手术期血流动力学优化仍然侧重于动脉血压和心输出量等大循环变量,优化微循环灌注是血

流动力学管理的最终目标[33]。在生理情况下,微循环能一定程度反映大循环情况,微循环所采用的无创监测手段可以有效避免有创监测引起的痛苦及并发症[34]。

术前通过微循环监测,可以评估患者的微循环状态,了解组织灌注和氧气输送情况,从而判断手术的风险。对于微循环障碍的患者,可以提前采取干预措施,如调整药物剂量、改善血管功能等,以降低手术风险。此外,根据微循环监测结果,可以制定更加个性化的术前治疗方案,如优化麻醉方式、调整药物使用等,以改善患者的微循环状态,为手术创造更好的条件。

在一些特殊手术的围术期管理中监测微循环也有一定的优势,微循环监测可作为指导围术期液体治疗的手段。有研究表明微循环监测可以较好反映全身微循环状况,可作为嗜铬细胞瘤术前准备的一项重要指标,帮助判断术前准备是否充分。微循环障碍与多种手术并发症密切相关,如器官功能障碍、感染等。通过术中微循环监测,可以及时发现并预防这些并发症的发生,提高手术的安全性和成功率。

此外,微循环还可作为预测预后的指标[35]。早在2014年Ince就提出了以微循环为导向的液体复苏,其认为微循环除了优化全身血流动力学外,也可以作为液体复苏的指标[36][37]。在脓毒症患者中,液体复苏过程中早期微循环血流量的增加与24h后器官衰竭的减少有关,微循环是术后器官衰竭的有效预测指标。研究表明以微循环为目标的液体复苏策略能够在不降低组织血液灌注的前提下,能有效减少感染性休克患者不必要的液体输入,并有助于改善其临床预后情况[38]。

微循环监测作为一个新兴的临床研究方向,其应用和发展有助于推动相关领域的临床研究和科技进步。通过不断积累和研究微循环监测的数据和结果,可以进一步揭示微循环在疾病发生和发展中的作用机制,为临床诊断和治疗提供更加精准和有效的手段。

5. 总结

综上,微循环作为体内血液与组织进行物质交换的重要场所,其状态受到各种因素影响[39]。微循环监测在术前准备、术中管理及术后预后等围术期管理各阶段中均具有一定的优势,以微循环为导向的麻醉管理策略,被视为围术期管理的一个重要演进方向。深入理解围术期微循环的动态变化及其监测手段,对于提升围术期麻醉管理的精准度及优化患者预后具有重要意义[40]。

基金项目

基于 PET 询证模型构建髌膝关节置换术中 VTE 管理体系及应用研究(项目编号 CSTB2022NSCQ-MSX0067)。

参考文献

- [1] Edul, V.K. and Gutierrez, F.J. (2023) Devices for Assessing Microcirculation. *Current Opinion in Critical Care*, **29**, 236-243. <https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000001044>
- [2] Lazaridis, A., Triantafyllou, A., Mastrogiannis, K., Malliora, A., Doumas, M. and Gkaliagkousi, E. (2023) Assessing Skin Microcirculation in Patients at Cardiovascular Risk by Using Laser Speckle Contrast Imaging. A Narrative Review. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, **43**, 211-222. <https://doi.org/10.1111/cpf.12819>
- [3] Hellmann, M., Kalinowski, L. and Cracowski, J.L. (2022) Laser Speckle Contrast Imaging to Assess Microcirculation. *Cardiology Journal*, **29**, 1028-1030. <https://doi.org/10.5603/cj.a2022.0097>
- [4] 张轶, 吴纪凯, 范雪颖. 渐进性松弛训练对心理应激状态人群甲襞微循环影响的研究[J]. 重庆医学, 2014, 43(19): 2410-2411+2414.
- [5] Nam, K. and Jeon, Y. (2022) Microcirculation during Surgery. *Anesthesia and Pain Medicine*, **17**, 24-34. <https://doi.org/10.17085/apm.22127>
- [6] 阎乃璐, 陆茜, 于布为. 围术期微循环的相关研究进展[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2021, 41(1): 108-111.
- [7] De Cuyper, H. and Poelaert, J. (2024) Microcirculatory Alterations in Cardiac Surgery: A Comprehensive Guide. *Journal*

- of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia, **38**, 829-838. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2023.11.042>
- [8] Ocak, I., Kara, A. and Ince, C. (2016) Monitoring Microcirculation. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, **30**, 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.bpa.2016.10.008>
- [9] Pierce, R.W., Giuliano Jr, J.S. and Pober, J.S. (2017) Endothelial Cell Function and Dysfunction in Critically Ill Children. *Pediatrics*, **140**, e20170355. <https://doi.org/10.1542/peds.2017-0355>
- [10] Uchimido, R., Schmidt, E.P. and Shapiro, N.I. (2019) The Glycocalyx: A Novel Diagnostic and Therapeutic Target in Sepsis. *Critical Care*, **23**, Article No. 16. <https://doi.org/10.1186/s13054-018-2292-6>
- [11] Ince, C., Mayeux, P.R., Nguyen, T., Gomez, H., Kellum, J.A., Ospina-Tascón, G.A., *et al.* (2016) The Endothelium in Sepsis. *Shock*, **45**, 259-270. <https://doi.org/10.1097/shk.0000000000000473>
- [12] Gutterman, D.D., Chabowski, D.S., Kadlec, A.O., *et al.* (2016) The Human Microcirculation: Regulation of Flow and beyond. *Circulation Research*, **118**, 157-172.
- [13] Guven, G., Hilty, M.P. and Ince, C. (2019) Microcirculation: Physiology, Pathophysiology, and Clinical Application. *Blood Purification*, **49**, 143-150. <https://doi.org/10.1159/000503775>
- [14] Joffre, J. and Legrand, M. (2021) Microcirculation-Targeted Resuscitation in Septic Shock: Can Complex Problems Have Simple Answers? *Annals of Intensive Care*, **11**, Article No. 1. <https://doi.org/10.1186/s13613-020-00796-z>
- [15] Yajnik, V. and Maarouf, R. (2022) Sepsis and the Microcirculation: The Impact on Outcomes. *Current Opinion in Anaesthesiology*, **35**, 230-235. <https://doi.org/10.1097/aco.0000000000001098>
- [16] Spanos, A., Jhanji, S., Vivian-Smith, A., Harris, T. and Pearse, R.M. (2010) Early Microvascular Changes in Sepsis and Severe Sepsis. *Shock*, **33**, 387-391. <https://doi.org/10.1097/shk.0b013e3181c6be04>
- [17] Lelubre, C. and Vincent, J. (2018) Mechanisms and Treatment of Organ Failure in Sepsis. *Nature Reviews Nephrology*, **14**, 417-427. <https://doi.org/10.1038/s41581-018-0005-7>
- [18] Favaron, E., Ince, C., Hilty, M.P., Ergin, B., van der Zee, P., Uz, Z., *et al.* (2021) Capillary Leukocytes, Microaggregates, and the Response to Hypoxemia in the Microcirculation of Coronavirus Disease 2019 Patients. *Critical Care Medicine*, **49**, 661-670. <https://doi.org/10.1097/ccm.0000000000004862>
- [19] Rovas, A., Osiaevi, I., Buscher, K., Sackarnd, J., Tepasse, P.R., Fobker, M., *et al.* (2020) Microvascular Dysfunction in COVID-19: The MYSTIC Study. *Angiogenesis*, **24**, 145-157. <https://doi.org/10.1007/s10456-020-09753-7>
- [20] Pottecher, J., Derudder, S., Teboul, J.L., Georger, J.F., Laplace, C., Benhamou, D., *et al.* (2010) Both Passive Leg Raising and Intravascular Volume Expansion Improve Sublingual Microcirculatory Perfusion in Severe Sepsis and Septic Shock Patients. *Intensive Care Medicine*, **36**, 1867-1874. <https://doi.org/10.1007/s00134-010-1966-6>
- [21] Jongman, R.M., Zijlstra, J.G., Kok, W.F., van Harten, A.E., Mariani, M.A., Moser, J., *et al.* (2014) Off-Pump CABG Surgery Reduces Systemic Inflammation Compared with On-Pump Surgery but Does Not Change Systemic Endothelial Responses. *Shock*, **42**, 121-128. <https://doi.org/10.1097/shk.0000000000000190>
- [22] Onorati, F., Rubino, A.S., Nucera, S., Foti, D., Sica, V., Santini, F., *et al.* (2010) Off-Pump Coronary Artery Bypass Surgery versus Standard Linear or Pulsatile Cardiopulmonary Bypass: Endothelial Activation and Inflammatory Response. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, **37**, 897-904. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2009.11.010>
- [23] Kourliouros, A., Valencia, O., Phillips, S.D., Collinson, P.O., van Besouw, J. and Jahangiri, M. (2010) Low Cardiopulmonary Bypass Perfusion Temperatures Are Associated with Acute Kidney Injury Following Coronary Artery Bypass Surgery. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*, **37**, 704-709. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2009.08.020>
- [24] Presta, P., Onorati, F., Fuiano, L., Mastroberto, P., Santarpino, G., Tozzo, C., *et al.* (2009) Can Pulsatile Cardiopulmonary Bypass Prevent Perioperative Renal Dysfunction during Myocardial Revascularization in Elderly Patients? *Nephron Clinical Practice*, **111**, c229-c235. <https://doi.org/10.1159/000208991>
- [25] Huybregts, R.A.J.M., de Vroege, R., Jansen, E.K., van Schijndel, A.W., Christiaans, H.M.T. and van Oeveren, W. (2009) The Association of Hemodilution and Transfusion of Red Blood Cells with Biochemical Markers of Splanchnic and Renal Injury during Cardiopulmonary Bypass. *Anesthesia & Analgesia*, **109**, 331-339. <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e3181ac52b2>
- [26] Nam, K. and Jeon, Y. (2022) Microcirculation during Surgery. *Anesthesia and Pain Medicine*, **17**, 24-34. <https://doi.org/10.17085/apm.22127>
- [27] Trzeciak, S., Dellinger, R.P., Parrillo, J.E., Guglielmi, M., Bajaj, J., Abate, N.L., *et al.* (2007) Early Microcirculatory Perfusion Derangements in Patients with Severe Sepsis and Septic Shock: Relationship to Hemodynamics, Oxygen Transport, and Survival. *Annals of Emergency Medicine*, **49**, 88-98. <https://doi.org/10.1016/j.annemergmed.2006.08.021>
- [28] Kim, T.K., Cho, Y.J., Min, J.J., Murkin, J.M., Bahk, J., Hong, D.M., *et al.* (2015) Microvascular Reactivity and Clinical Outcomes in Cardiac Surgery. *Critical Care*, **19**, Article No. 316. <https://doi.org/10.1186/s13054-015-1025-3>
- [29] Flick, M., Briesenick, L., Peine, S., Scheeren, T.W.L., Duranteau, J. and Saugel, B. (2021) The Effect of Moderate

- Intraoperative Blood Loss and Norepinephrine Therapy on Sublingual Microcirculatory Perfusion in Patients Having Open Radical Prostatectomy. *European Journal of Anaesthesiology*, **38**, 459-467. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000001434>
- [30] Flick, M., Schreiber, T.H., Montomoli, J., Krause, L., de Boer, H.D., Kouz, K., *et al.* (2022) Microcirculatory Tissue Perfusion during General Anaesthesia and Noncardiac Surgery. *European Journal of Anaesthesiology*, **39**, 582-590. <https://doi.org/10.1097/eja.0000000000001699>
- [31] Bansch, P., Flisberg, P. and Bentzer, P. (2014) Changes in the Sublingual Microcirculation during Major Abdominal Surgery and Post-Operative Morbidity. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, **58**, 89-97. <https://doi.org/10.1111/aas.12204>
- [32] Uz, Z., Ince, C., Guerci, P., Ince, Y., P. Araujo, R., Ergin, B., *et al.* (2018) Recruitment of Sublingual Microcirculation Using Handheld Incident Dark Field Imaging as a Routine Measurement Tool during the Postoperative De-Escalation Phase—A Pilot Study in Post ICU Cardiac Surgery Patients. *Perioperative Medicine*, **7**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1186/s13741-018-0091-x>
- [33] Saugel, B. and Sessler, D.I. (2021) Perioperative Blood Pressure Management. *Anesthesiology*, **134**, 250-261. <https://doi.org/10.1097/aln.0000000000003610>
- [34] Dubin, A., Kanoore Edul, V.S., Caminos Eguillor, J.F. and Ferrara, G. (2020) Monitoring Microcirculation: Utility and Barriers—A Point-of-View Review. *Vascular Health and Risk Management*, **16**, 577-589. <https://doi.org/10.2147/vhrm.s242635>
- [35] Li, B., Dai, Y., Cai, W., Sun, M. and Sun, J. (2025) Monitoring of Perioperative Tissue Perfusion and Impact on Patient Outcomes. *Journal of Cardiothoracic Surgery*, **20**, Article No. 100. <https://doi.org/10.1186/s13019-025-03353-6>
- [36] Ince, C. (2014) The Rationale for Microcirculatory Guided Fluid Therapy. *Current Opinion in Critical Care*, **20**, 301-308. <https://doi.org/10.1097/mcc.0000000000000091>
- [37] Bruno, R.R., Wollborn, J., Fengler, K., Flick, M., Wunder, C., Allgäuer, S., *et al.* (2023) Direct Assessment of Microcirculation in Shock: A Randomized-Controlled Multicenter Study. *Intensive Care Medicine*, **49**, 645-655. <https://doi.org/10.1007/s00134-023-07098-5>
- [38] Zhou, Q., Dai, C., Zhu, Y., Han, T., Zhou, J., Zhao, L., *et al.* (2021) The Effectiveness and Feasibility of Fluid Resuscitation Directed by Microcirculation Monitoring in Patients with Septic Shock: A Randomized Controlled Trial. *Annals of Palliative Medicine*, **10**, 9069-9077. <https://doi.org/10.21037/apm-21-1971>
- [39] 孙一, 邱林, 徐红党, 等. 心血管手术围术期舌下微循环最新研究进展[J]. 医药论坛杂志, 2021, 42(19): 135-139.
- [40] 吴京朗, 马文凤, 王颖. 微循环监测在围术期管理中的应用进展[J]. 微循环学杂志, 2023, 33(2): 95-99.