DOI: 10.11844/cjcb.2026.11.0013
中国细胞生物学学报 Chinese Journal of Cell Biology 2026, 48(11): 2658–2669 CSTR: 32200.14.cjcb.2026.11.0013

# 运动对膝骨关节炎患者微循环功能干预效应的研究进展及展望

邱新越[1,2] 李淼[1,2] 刘琦[1,2] 付贝伦[1,2] 梁影[1,2] 周术锋[1,2] 彭永[3]* 朱欢[1,2]*
([1]湖北民族大学体育学院, 恩施土家族苗族自治州 445000; [2]湖北民族大学运动科学研究中心, 恩施土家族苗族自治州 445000; [3]宿迁学院体育学院, 宿迁 223800)

**摘要** 微循环作为机体物质代谢和能量交换的重要场所, 与膝骨关节炎(KOA)的发生和疾病进展有密切关系, 改善微循环功能障碍有助于减轻患者的炎症状态, 缓解疼痛症状。运动作为非药物干预方式之一, 是临床上治疗KOA的常用方式。但运动对KOA患者微循环功能的干预效果尚存在争议, 其原因可能与运动方式、运动强度及微循环功能评价方式等因素有关。为了理清这一问题, 该综述梳理KOA患者微循环功能的变化特点, 在此基础上总结不同运动方式对KOA患者微循环功能的干预效果, 并进一步梳理相关研究中的不足以及提出研究展望, 为运动疗法在KOA患者中的应用提供新的理论依据支撑。研究表明: (1) 在多种因素的共同作用下, KOA患者膝关节存在微循环血流量下降、血管异常增生以及血管反应性下降等现象, 使软骨、滑膜等处于慢性缺氧状态, 加重患者炎症状态; (2) 长期有氧运动、抗阻运动以及有氧联合抗阻运动均能改善KOA患者微循环功能, 但各种干预方式均存在研究证据偏少或证据等级偏弱等问题, 尚需更多高质量的临床研究证据; (3) 当前相关研究存在微循环功能评价方式不足、运动干预方式单一、相关机制探讨的针对性不足、不良反应记录缺失等问题, 后续可围绕上述问题展开研究。

**关键词** 骨关节炎; 微循环; 有氧运动; 抗阻运动; 有氧联合抗阻运动

# Research Progress and Prospects on the Intervention Effect of Exercise on Microcirculation Function in Patients with Knee Osteoarthritis

QIU Xinyue[1,2], LI Miao[1,2], LIU Qi[1,2], FU Beilun[1,2], LIANG Ying[1,2], ZHOU Shufeng[1,2], PENG Yong[3]*, ZHU Huan[1,2]*
([1]*School of Physical Education of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China*; [2]*Sports Science Research Center of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China*; [3]*School of Physical Education of Suqian University, Suqian 223800, China*)

**Abstract** Microcirculation, as an important site for the metabolism and energy exchange of the body, is closely related to the occurrence and progression of KOA (knee osteoarthritis). Improving microcirculation dysfunction can help alleviate the inflammatory state of patients and relieve pain symptoms. Exercise, as one of the non-pharmacological intervention methods, is a common treatment approach in clinical practice for KOA. However, the intervention effect of exercise on the microcirculation function of KOA patients remains controversial. This may be related to factors such as exercise methods, exercise intensity, and the evaluation method of microcirculation func-

收稿日期: 2026-09-04 接受日期: 2026-10-10
2024年湖北民族大学博士科研启动基金(批准号: BS24039)和宿迁学院教学改革研究课题(批准号: JYJGX16129202501)资助的课题
*通信作者。Tel: 18771192268, E-mail: 1244774120@qq.com; Tel: 18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com
Received: September 4, 2026 Accepted: October 10, 2026
This work was supported by the 2024 Doctoral Research Start-up Fund of Hubei Minzu University (Grant No.BS24039) and the Teaching Reform Research Project of Suqian University (Grant No.JYJGX16129202501)
*Corresponding authors. Tel: +86-18771192268, E-mail: 1244774120@qq.com; Tel: +86-18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com

tion. To clarify this issue, this review first summarizes the characteristics of microcirculation function changes in KOA patients, and then summarizes the intervention effects of different exercise methods on the microcirculation function of KOA patients. It also further reviews the deficiencies in related studies and proposes research prospects, providing new theoretical basis support for the application of exercise therapy in KOA patients. (1) under the combined effect of various factors, KOA patients have phenomena such as decreased microcirculation blood flow, abnormal vascular proliferation, and decreased vascular reactivity in the knee joint, causing the cartilage, synovium, etc. to be in a chronic hypoxic state, which aggravates the inflammatory state of patients. (2) long-term aerobic exercise, resistance exercise, and aerobic combined with resistance exercise can all improve the microcirculation function of KOA patients, but various intervention methods have problems such as insufficient research evidence or weak evidence grades. More high-quality clinical research evidence is still needed. (3) the current related research has problems such as insufficient evaluation methods for microcirculation function, a single mode of exercise intervention, insufficient targeted exploration of related mechanisms, and the absence of records of adverse reactions. Future research can be conducted based on these issues.

**Keywords** osteoarthritis; microcirculation; aerobic exercise; resistance exercise; aerobic combined with resistance exercise

膝骨关节炎(knee osteoarthritis, KOA)作为一种常见的骨关节病, 全球病例超3.65亿[1]。KOA并非由单一的关节软骨磨损或损伤而致, 而是一类涉及软骨、软骨下骨、滑膜、韧带、肌肉等多结构的复杂综合征, 其中关节软骨退行性病变、滑膜炎症、细胞外层基质减少等是其主要的病理特征[2-4]。由于关节退行性病变, KOA患者易出现关节疼痛、僵直、活动范围受限等问题, 严重影响患者生活质量, 并可能慢慢造成患者残疾。相关数据显示, KOA在世界范围内的致残性高达第四位[5]。

微循环作为机体物质代谢和能量交换的重要场所, 与KOA的发生和疾病进展有密切关系。有研究指出, KOA患者膝关节存在微血管血流量(microvascular blood flow, MBF)和微血管反应性(microvascular reactivity, MR)下降等功能障碍[6-7]。微循环功能障碍不仅会降低局部组织的物质代谢效率, 且会加剧关节内部缺氧状态, 上调缺氧诱导因子-α(hypoxia-inducible factor-α, HIF-α)/血管内皮细胞生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)通路相关因子表达, 促进病理性微血管生成; VEGF驱动生成的异常血管又会促进炎症的发展, 这种相互关系会使膝关节产生持续性的炎症反应, 从而加重病情[7-8]。因此, 改善微循环功能障碍有助于减轻KOA患者膝关节的炎症状态, 缓解疼痛症状。运动作为非药物干预方式之一, 是临床上治疗KOA的常用方式。有研究发现, 有氧运动、抗阻运动及有氧联合抗阻运动等均能改善KOA患者膝关节微循环功能, 且联合运动的干预效果更优[9-12]。但也有研究持不同结论。Mattiello-Sverzut等[13]研究指出, 虽然抗阻运动能提高KOA患者肌肉力量, 但对微循环功能未产生类似效应。王昌雷等[14]进一步发现, 有氧运动联合无负重屈膝训练未能显著改善KOA患髌骨中央附近5个穴位的微循环功能。另外, 一项针对1.3万名患者的研究指出, 与安慰剂或不治疗相比, 运动仅能为膝关节骨关节炎患者带来轻微且短暂的疼痛缓解, 且证据力度较低, 且在更大规模、更长随访时间的研究中这种益处会进一步缩小[15]。

由此可见, 运动对KOA患者微循环功能的干预治疗效果尚存在争议, 其原因可能与运动方式、运动强度及微循环功能评价方式等因素有关。为了理清这一问题, 本综述梳理KOA患者微循环功能的变化特点, 在此基础上总结不同运动方式对KOA患者微循环功能的干预效果, 并进一步梳理相关研究中的不足以及提出研究展望, 为运动疗法在KOA患者中的应用提供新的理论依据支撑。

## 1 KOA患者膝关节微循环功能的变化

对于微循环功能的评价, MBF是最常用的指标。KOA患者膝关节普遍存在MBF下降现象。王昌雷等[14]发现, KOA患者膝关节内微血管狭窄并伴有斑块的形成, 血流阻力增大, 导致MBF下降。另外, 全身性的血液流变学紊乱(细胞膜膜电荷减少、稳

定性下降、易聚集)也会增大微血管血流阻力, 导致KOA患者膝关节MBF下降[16]。此外, 关节内压异常升高(远超滑膜毛细血管的末端灌注压)会限制并减少滑膜毛细血管的血流量, 进一步导致MBF下降[17]。由此可见, 血管狭窄、血液流变学紊乱、关节内压异常升高等因素导致KOA患者膝关节MBF下降, 使关节内部缺氧, 加重炎症反应。

KOA患者膝关节MBF下降还与血管异常增生有关。Xu等[8]研究发现, KOA患者的滑膜组织微血管密度异常升高, 并显著高于正常人群。然而, 这些新生血管多为发育不成熟具有高通透性的病理性血管, 导致滑膜水肿及炎性因子渗出, 从而引发膝关节内微血管淤堵, 加重膝关节组织退行性病变, 进一步加剧KOA患者的微循环功能障碍。Sanchez-Lopez等[7]研究发现, KOA患者滑膜内有微血管生成, 但MBF和关节局部氧分压显著低于正常水平。异常增生的血管不仅不具备正常血管的功能, 且会侵袭正常血管, 进而加剧膝关节内部的缺氧状态。此外, 这种病理性血管增生还发生在软骨下骨。Huang等[18]在KOA小鼠研究中发现, KOA小鼠的微循环功能障碍不仅发生在滑膜, 还出现软骨下骨中H型血管的病理性增生, 并导致局部缺氧。H型血管是一种新发现的血管亚型, 其能诱导软骨下骨的硬化和软骨骨赘形成, 从而加速KOA的发病进展。对于病理性血管的新生, KOA患者体内的炎症级联反应起到了重要作用。炎症反应会增强VEGF信号, 促进病理性血管的新生。异常新生的血管不仅会加重微循环功能障碍, 且会进一步通过提高缺氧水平给患者带来更大程度的疼痛[20]。基于血管异常增生与KOA疾病进展间的密切关系, 抑制滑膜等组织的血管新生是治疗KOA的重要策略。

此外, KOA患者膝关节微血管对运动等刺激的反应能力明显减弱。Nakanishi等[6]研究指出, 正常健康人群在进行股四头肌等长收缩训练时会诱发强烈的微血管反应性充血现象, 局部氧合血红蛋白的浓度显著升高, 而KOA患者在运动中及运动后局部氧合血红蛋白浓度均无显著变化。该研究表明, KOA患者肌肉组织微血管对运动刺激的反应能力显著降低。目前对于KOA患者微循环功能的评价, 主要以观察局部MBF和氧合血红蛋白的基线值为主。虽然该指标能在一定程度上反映出患者膝关节微循环功能的变化, 但其科学性不足。如当患者出现轻度微循环功能障碍时, MBF的基线值可能并不会显著变化, 进而造成对患者微循环功能的误诊。针对这一问题, 可通过测量患者膝关节的MR来判断微循环功能的变化。

当前, 使用近红外光检测不同刺激下氧合血红蛋白浓度的变化是评价局部肌肉组织MR的常用方式, 该方式具有测试简单、无创等优点。但该指标在评价肌肉微循环功能时, 其测试结果也会受皮肤颜色、皮脂厚度、皮肤血流等因素的影响。针对这一问题, 可进一步通过动脉血流阻断测试来观察氧合血红蛋白浓度的变化。如果动脉血流阻断后血流值下降到20%或者更低以及压力释放后血流快速恢复, 说明血流信号更偏向于肌肉组织[21]。KOA患者肌肉组织微血管对机械应力的响应能力减弱, 使其在运动过程中无法动员更多的血流量参与运动, 导致运动耐受能力下降。因此, KOA患者可能存在明显的运动耐受能力下降的现象, 这会进一步限制患者的日常体力活动能力, 并与膝关节的病变形成恶性循环。

综上所述, 在多种因素的共同作用下, KOA患者膝关节存在MBF下降、血管异常增生以及MR下降等现象, 这使软骨与滑膜等处于慢性缺氧状态, 促使炎性因子的释放。因此, 针对KOA患者微循环功能障碍的特点, 应着重提高MR并抑制异常血管增生。

## 2 运动对KOA患者微循环功能的干预效果

### 2.1 有氧运动对KOA患者微循环功能的干预效果

由于KOA患者膝关节结构的退行性变化, 其无法承受大强度的运动干预, 因此中低强度的有氧运动是首选。Huang等[18]研究发现, 4周游泳运动(7次/周, 20~50 min/次)能降低KOA小鼠软骨下骨中H型微血管密度, 改善软骨微环境, 并提高KOA小鼠的运动能力。游泳作为全身性的有氧运动, 其通过提高血液循环系统功能缓解软骨下骨的局部微血管缺氧状态, 下调HIF-α的表达, 减少VEGF所驱动的软骨下骨中H型血管的异常增生。由于H型血管数量减少、通透性降低, 软骨下骨的内环境稳态得以恢复, 进而为KOA小鼠的康复(如肿胀消除)以及运动能力的提升创造有利条件。另外, 游泳运动还能避免膝关节二次损伤。长期高强度或过度的机械负荷会促进KOA小鼠神经生长因子的过度表达, 诱导炎症微环

境, 其不仅不能促进软骨修复, 且会加速软骨细胞凋亡, 加速骨KOA的进展[20]。由于浮力的存在, 游泳可以显著降低作用于膝关节上的高运动应力和反作用力, 避免神经生长因子的过度表达, 进而对膝关节产生保护作用。此外, 该研究采用了时间递增模式, 从20 min/次逐步增加到50 min/次, 有效提高了KOA小鼠的运动适应性和运动依从性。临床上, 考虑到KOA患者多伴有运动耐受能力差及患有微循环功能障碍相关的慢性并发症, 因此在运动干预过程中, KOA患者应遵循循序渐进的负荷原则, 运动强度、运动时间等由低剂量向中等剂量逐渐过渡, 确保KOA患者对运动负荷的生理适应, 避免二次损伤。但上述研究结果是基于动物实验而得出, 其证据等级和力度相对较弱, 后续需高级别的临床研究支撑这一结论。

除能降低微血管密度外, 有氧运动还能提高KOA患者膝关节MR。周术锋等[10]发现, 进行12周运动强度为50%~70%最大心率(maximal heart rate, MHR)的24式太极拳运动(4次/周, 60 min/次)能显著提高KOA患者膝关节皮肤MR, 并降低炎症因子水平以及提高KOA患者的关节活动能力。MR主要反映不同刺激下微血管血流灌注量的变化情况, 其能客观反映出内皮细胞对刺激的响应能力[21]。在该研究中使用局部皮肤热刺激法评价患者的微循环功能, 该方法具有操作简单、依从性好等优点。将局部皮肤温度升高至(42~44) ℃, 能诱发微血管达到最大程度的生理性扩张。通过对比加热前后的血流灌注量峰值, 能客观评估微血管舒张功能和血流储备能力。由于血管舒缩因子分泌失衡, KOA患者膝关节皮肤对局部热刺激的响应能力减弱, 加热后的MBF较健康人群会明显下降。因此, 可通过测量膝关节表面组织的MR判断运动干预前后患者微循环功能的变化。膝关节微循环功能的改善以及炎症因子水平的下降减轻了KOA患者膝关节疼痛程度并提高了关节活动能力。由于该研究属于高质量的随机对照实验, 因此其研究证据的力度较高, 可在临床上推广应用。

另有研究进一步比较了水中运动和陆上运动的干预效果。Alkatan等[9]研究发现, 12周运动强度为60%~70%心率储备(heart rate reserve, HRR)的游泳运动(3次/周, 40~45 min/次)能显著改善KOA患者血管内皮依赖式功能, 但自行车骑行训练未能产生类似效应。一项Meta分析支持这一结论, 相比于陆上运动, 11周水中有氧运动(3次/周, 50 min/次, 41%~68% HRR或52%~75% MHR)更能改善中老年KOA患者内皮功能[22]。一氧化氮(nitric oxide, NO)、内皮素-1(endothelin-1, ET-1)等血管舒缩因子的分泌失衡是导致内皮功能障碍的重要原因。相比于陆上运动, 水中运动能对血管产生均匀的挤压作用并能提高心输出量和血流速度, 从而产生更大剂量的生理性血流剪切应力[23]。在剪切应力的作用下, 通过PI3K-Akt与MEK-ERK1/2两种信号转导通路促使内皮细胞释放更多的NO, 同时抑制ET-1的产生[24]。另外, 游泳时身体微血管会经历扩张–收缩的循环反应, 这种变化会增强内皮细胞功能, 促使其分泌更多的NO, 使血管产生更大程度的扩张反应。这提示相比于陆上运动, 水中运动可能是改善KOA患者膝关节微循环功能更加有效的方式。此外, 水中运动具有更高的能量消耗, 更适合肥胖型KOA患者。对于肥胖型KOA患者, 运动时膝关节会承受更大的作用力, 易造成膝关节二次损伤。水中运动通过高能量消耗发挥减脂增肌效应, 既能减轻体重又能增加下肢肌肉力量, 进而对膝关节产生保护作用, 因此水中运动是促进肥胖型KOA患者康复的理想手段。相关Meta分析也表明, 水中运动疗法在促进KOA患者康复中具有显著的临床应用价值, 其安全性、有效性和依从性均较高, 是改善患者生活质量的有效方式[22]。

综上, 现有的研究表明游泳、太极拳等有氧运动能改善KOA患者膝关节微循环功能, 且具有较高的安全性。相关Meta分析也指出, 有氧运动是KOA患者最值得首选的运动方式, 且其运动安全性较好, 未提高不良事件发生率[3]。但目前有氧运动疗法也存在诸多局限性, 主要为有氧运动干预方式单一, 仅涉及游泳和太极拳运动, 缺乏其他项目的干预研究证据。基于水中运动在运动安全性、有效性等方面的独特性, 后续研究应重点探讨水中疗法的干预效果, 如水中行走、水中太极、水中有氧操等。另外, 对于太极拳运动, 也仅有少量学者进行干预研究以及仅探讨了24式太极拳的干预效果, 研究结论的说服力和推广度不足, 需其他学者进一步验证。因此, 整体而言目前有关有氧运动对KOA患者微循环功能的干预研究较少, 尚需更多高级别的研究证据支持其在改善KOA患者膝关节微循环功能中的应用。

### 2.2 抗阻运动对KOA患者微循环功能的干预效果

抗阻运动也是KOA患者常见的运动方式, 其不仅能通过肌肉收缩产生的机械挤压作用调节微血管血流灌注量, 且能提高膝关节周围的肌肉力量, 对改善患者的疼痛症状起到重要作用。李哲等[11]研究发现, 4周抗阻训练(3次/周, 30~60 min/次)和等速离心训练(伸膝和屈膝交替进行, 60°/s~180°/s, 3次/周, 30 min/次)结合本体感觉训练(45~60 min/次)均能有效改善KOA患者膝关节MR和提高6 min步行能力, 但后者的干预效果更佳。KOA患者常伴有膝关节周围的血管淤堵, 抗阻运动可以使肌肉进行节律性的收缩和舒张, 这种物理性肌肉泵的作用可以有效减轻膝关节局部淤堵, 从而提高血流灌注量。相较于传统的肌力抗阻训练, 等速离心运动结合本体感觉训练更具训练优势。等速离心训练对原动肌、拮抗肌均能起到锻炼作用, 且能通过恒定速度降低关节负荷。另外, 反复的伸膝和屈膝还能提高骨骼肌的有氧代谢水平以及促进膝关节周围的血液循环, 进而改善关节内部的缺氧状态。此外, 本体感觉训练不仅能增强神经系统对肌肉的控制能力, 还能为肌力训练提供稳定性支持。两者结合能对KOA患者膝关节微循环产生更佳的干预效果, 从而改善患者膝关节微循环功能。另外, 该研究也采用了局部热刺激法评价MR。因此, 该研究表明抗阻运动也能提高KOA患者膝关节皮肤微血管内皮依赖性舒张功能。由于肌肉力量和微循环功能的改善, 患者的6 min步行能力得到提升。

另外, 杨新蔚等[25]研究发现, 相比于常规的药物治疗, 12周渐进抗阻运动联合血小板血浆注射(3次/周, 60 min/次, 强度根据受试者的耐受程度增加)能显著提高KOA患者膝关节MBF、MR和经皮氧分压(transcutaneous oxygen partial pressure, $TcPO_2$)。相比于其他研究, 该研究同步观察了MBF、MR以及$TcPO_2$三个指标, 同时也采用了局部热刺激法评价MR。因此, 该研究从血流动力学和血流氧合状态两个角度揭示了抗阻运动对KOA患者微循环功能的综合干预效益, 并再次证实了抗阻运动能提高KOA患者膝关节皮肤微血管内皮依赖性舒张功能。另外, 渐进强度的抗阻运动可逐步提高肌肉的代谢活动水平, 使血管有节律的舒张, 促使更多的氧气能够流入组织, 进一步改善KOA患者的微血管功能。但杨新蔚的研究仅观察了抗阻运动联合血小板血浆注射的综合效应, 未单独设置抗阻运动组。根据KOA注射型骨科生物制剂欧洲共识, 注射富血小板血浆作为A级证据用于轻中度KOA的治疗[26]。因此, 该研究无法直接明确抗阻运动对KOA患者微循环功能的干预效果。此外, 该研究在干预方案中未交代渐进抗阻强度的设计, 影响研究结论的推广。基于上述问题, 本综述认为, 该研究用于明确抗阻运动对KOA患者微循环功能的干预效果的证据力度偏弱。

以上研究表明, 长期抗阻运动能提高KOA患者膝关节微循环功能, 但也有研究持不同结论。Mattiello-Sverzut等[13]研究发现, 12周抗阻训练[3次/周, 45 min/次, 70%~80% 1RM(repetition maximum), 坐姿膝关节负重屈膝]能增强老年KOA患者下肢肌肉力量, 但骨骼肌内的微血管密度及毛细血管–肌纤维比值未发生显著变化。内皮细胞增殖是血管新生的关键环节, 其需要生理剂量的血流剪切应力刺激。长期的慢性炎症状态加之身体机能的退化, 导致老年KOA患者微血管内皮细胞的增殖能力减弱并存在滞后现象。该研究仅采用了坐姿膝关节负重屈膝, 这种运动模式可能无法对老年KOA患者微血管内皮细胞产生有效的剪切应力刺激, 未能促进患者血管新生。这提示, 对于老年KOA患者, 可能需要更高剂量的血流剪切应力刺激才能促进骨骼肌毛细血管新生, 在设计抗阻动作时应丰富动作内容并适当提高运动强度。

此外, 还有研究发现在进行抗阻训练后KOA患者膝关节微循环血流量出现下降。李雪莹等[27]发现, 4周针刺和针刺联合站桩抗阻训练(5次/周, 30 min/次, 膝关节的屈曲角度为130°~170°)均能使KOA患者犊鼻穴旁MBF下降, 但联合组下降的幅度更大。该研究使用PF5000激光多普勒血流仪监测患者MBF, 其原理是基于移动的血细胞浓度和血流速度评估MBF, 是目前临床上评价微循环功能的常用方法。对于KOA患者, 血管狭窄以及血液流变学紊乱(如血液黏滞度增大)导致血流速度减慢, 但由于单位体积内血细胞数量增加, 导致基础状态下MBF出现升高($MBF=v_{cell}\times C_{cell}$, $v_{cell}$为运动血细胞的平均速度, $C_{cell}$为运动血细胞浓度)。针刺通过辩证取穴疏通经络、促进气血运行, 改善局部血细胞聚集现象; 而站桩抗阻训练能在针刺的基础上进一步改善微循环功能, 两者可能存在协同增强效应。站桩运动通过持续的静力性收缩产生肌肉泵效应, 促进膝关节的血液循

环, 使关节内外聚集的血细胞分散、加速有害代谢产物排出, 解除局部阻塞, 改善局部微循环功能。

但由于单位体积内血细胞数量减少, 即使血流速度加快, MBF基础值仍呈下降趋势。该研究提示, 在评价MBF时, 应综合血细胞浓度和血流速度的变化, 不能将微循环血流量基线值作为评价标准。此外, 该研究仅测量了MBF的基线值, 未进一步测量MR的变化。虽然干预后患者MBF下降, 但由于血管舒张功能得到提升, 因此干预后患者的MR可能会同步提升。因此, 该研究在微循环功能的评价方式上存在缺陷, 限制研究结果的推广和普适性, 其应进一步测量患者MR。王振涛等[28]得出相同结论, 4周抗阻训练(5次/周, 30 min/次)和抗阻联合针刺治疗能显著降低老年KOA患者下肢MBF, 但联合干预组下降幅度更大。由此可见, 在抗阻运动的基础上施加针刺训练能对KOA患者微循环功能产生更佳的干预效果, 但王振涛的研究在微循环功能的评价上存在同样的局限性。

综上, 现有的研究表明4~12周抗阻运动能改善KOA患者膝关节微循环功能, 同时抗阻运动的增肌效应会进一步促进膝关节功能的恢复。在抗阻运动基础上联合血小板血浆注射、针刺治疗等, 可能具有更好的干预效果。但抗阻训练对KOA患者膝关节周围肌肉毛细血管的影响还有待于进一步研究, 后续研究可通过设计针对性的下肢抗阻训练验证其对肌肉毛细血管的影响。

### 2.3 有氧联合抗阻运动对KOA患者微循环功能的干预效果

作为一种复合型运动方式, 有氧联合抗阻运动综合了有氧运动和抗阻运动两种方式。有研究指出, 有氧联合抗阻训练是改善KOA患者症状和恢复运动功能最有效的方式, 其中有氧运动可以促进膝关节的血液循环, 抗阻运动则是提高股四头肌的力量, 促进膝关节功能的恢复[29]。但目前有关有氧联合抗阻运动对KOA患者膝关节微循环功能的干预研究较少, 仅周术锋等学者进行研究。周术锋等[10]研究发现, 12周(4次/周, 60 min/次, 50%~70% MHR)太极拳以及太极拳联合渐进强度的弹力带抗阻运动(各30 min)均能有效提高中老年KOA患者膝关节MR, 但联合干预的效果更佳。该研究提示, 相较于太极拳运动, 太极拳联合弹力带抗阻运动是改善KOA患者微循环功能更加有效的方式。

相比于传统高强度抗阻训练, 该研究采用的弹力带抗阻运动具有生物力学优势。弹力带具有随拉伸逐渐增大的柔性阻力与全程无惯性冲力的特点, 契合人体肌肉生理曲线, 其不仅能在动作起始阶段以低负荷有效降低关节剪切力、保护退变软骨, 还能强制肌肉在离心阶段保持平稳的主动控制, 避免组织二次损伤, 适合老年KOA患者以及下肢膝关节功能严重退化的患者。同时, 持续性的张力能不断刺激关节的本体感受器, 提升神经肌肉控制能力与关节动态稳定性, 从而更有助于KOA患者的恢复训练。因此, 该研究为KOA患者抗阻运动模式的制定提供了参考。但在该研究中, 试验后患者的$TcPO_2$未能显著提高, 其原因可能是运动干预周期太短, 无法使$TcPO_2$发生显著变化。$TcPO_2$的变化不仅与MBF有关, 还与人体的有氧能力有关。该研究仅对患者施加了12周的运动干预, 可能无法显著提升有氧能力, 因此未能使患者$TcPO_2$显著升高。有研究发现, 连续进行5年以上的太极拳练习能显著提高中老年人膝关节$TcPO_2$[30]。因此, 建议进一步延长运动干预周期并同步观察$TcPO_2$的变化。

但也有研究发现, 4周有氧运动(游泳、步行训练、打太极等)联合无负重屈膝训练(20~30次/组, 2组/d, 7 d/周)未能显著提高髌骨中央附近5个穴位的MBF[14], 其原因可能与运动量不足有关。该研究中抗阻运动为无负重屈膝训练, 虽然该运动方式不会对患者膝关节带来明显的压力, 但因运动强度明显偏小, 导致整体运动量不足, 无法对微循环组织形成有效的刺激。另外, 该研究未交代有氧运动的时间, 仅描述为适量运动, 推测其有氧运动量也较低。此外, 该研究仅对患者进行了4周干预, 干预周期偏短。但该研究进一步指出, 在运动干预的基础上结合推拿能显著提高患者的MBF, 其原因是特定穴位的推拿具有显著调和经络、舒畅气血的效果。由此可见, 抗阻运动的强度、干预周期等因素是影响有氧联合抗阻运动干预效果的重要因素。在制定运动方案时, 相关研究人员应充分考虑上述因素。不同运动方式对KOA患者微循环功能的干预研究见表1。

综上所述, 相比单一的运动方式, 有氧联合抗阻运动可能是改善KOA患者膝关节微循环功能更加有效的方式。在运动量方面, KOA患者需进行每周至少3次、每次至少60 min的训练计划, 实现每周累计180 min的运动量, 显著改善患者的身体功

表1 运动对KOA患者微循环功能干预效应的研究

Table 1 Studies of exercise effects on microcirculation and related vascular outcomes in KOA

| 序号 Number | 作者/年份 Author and year | 研究对象 Participants | 训练方案 Training protocol | 主要结局指标 Main outcomes | 研究结论 Main findings | 不良事件 Adverse events |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Alkatan et al. (2016)[9] | 48 adults with OA | Swimming or cycling for 12 weeks; 3 sessions per week; 40-45 min per session; 60%-70% HRR | Brachial FMD; arterial stiffness | FMD increased after swimming but not cycling; arterial stiffness decreased in both groups. These are systemic vascular outcomes | Not reported |
| 2 | Zhou et al. (2023)[10] | 54 patients with KOA | 24-form Tai Chi, or Tai Chi plus progressive elastic-band resistance exercise, for 12 weeks; 4 sessions per week; 60 min per session; 50%-70% MHR | MR; $TcPO_2$; inflammatory markers; pain and knee function | MR and clinical outcomes improved in both exercise groups, with greater benefits after combined exercise; $TcPO_2$ did not increase significantly | Not reported |
| 3 | Li et al. (2023)[11] | 60 patients with KOA | Resistance training, or isokinetic eccentric training plus proprioceptive training, for 4 weeks; 3 sessions per week; resistance: 30-60 min per session; eccentric: 30 min per session; proprioception: 45-60 min per session | MR; six minutes walking ability | Both groups improved; greater improvements were reported with eccentric plus proprioceptive training | Not reported |
| 4 | Mattiello-Sverzut et al. (2013)[13] | 26 patients with KOA | Resistance training for 12 weeks; 3 sessions per week; 45 min per session; 70%-80% 1RM | Lower-limb strength; microvascular density; capillary-to-fiber ratio | Strength improved; microvascular density and capillary-to-fiber ratio did not change significantly. Morphological outcomes do not directly measure vascular reactivity | Not reported |
| 5 | Wang et al. (2024)[14] | 87 older patients with KOA | Routine rehabilitation including aerobic activity and unloaded knee flexion for 4 weeks, with or without Tuina; 20-30 repetitions per set; 2 sets per day; 7 days per week | MBF at five sites around the patella | Routine rehabilitation alone showed no significant change; the combined Tuina group showed increased MBF | Not reported |
| 6 | Huang et al. (2025)[18] | 45 male mice; 3 groups, 15 mice per group; KOA model and exercise groups | Swimming for 4 weeks; 7 days per week; 20 min on day 1, increasing by 5 min per day during week 1; 50 min per day from week 2 | Subchondral type H vessels; motor performance | Swimming reduced type H vessels and improved motor performance in KOA mice; this is preclinical evidence | Not reported |
| 7 | Yang et al. (2024)[25] | 60 patients with KOA | Progressive resistance exercise plus intra-articular PRP for 12 weeks; 3 sessions per week; 60 min per session | MBF; MR; $TcPO_2$ | MBF, MR, and $TcPO_2$ increased; an independent exercise effect cannot be isolated from the combined intervention | Not reported |
| 8 | Li et al. (2019)[27] | 40 patients with KOA | Acupuncture alone or acupuncture plus static standing resistance exercise for 4 weeks; 5 sessions per week; 30 min per session | Baseline MBF | MBF decreased in both groups, with a larger reduction in the combined group; MR was not measured | Not reported |
| 9 | Wang et al. (2021)[28] | 80 older patients with KOA | Resistance exercise alone or resistance exercise plus acupuncture for 4 weeks; 5 sessions per week; 30 min per session | Baseline MBF | MBF decreased in both groups, with a larger reduction in the combined group; a reduction alone does not establish improved MR | Not reported |

能[31]。在时间组合方面, 有氧运动应不低于30 min。此外, 考虑到KOA患者往往伴有慢性炎症及内皮功能障碍, 复合运动应遵循递进式、个体化的循序渐进原则, 并平衡有氧与抗阻的负荷比例。

## 3 研究不足与研究展望

### 3.1 微循环功能评价方式不足

基于MR与微循环功能间的密切关联, 该指标已成为临床上最常用的微循环功能评价指标。因此, 将MR替代MBF基线值作为评价KOA患者微循环功能的核心指标。在MR的基础上, 可进一步通过测量$TcPO_2$评估局部组织的血流氧合状态。临床上, $TcPO_2$也是评价微循环功能的常用指标, 其能直接反映毛细血管向深层组织释放氧气的压力[32]。在KOA患者中, 长期的滑膜炎症与微血管密度下降会导致局部氧分压急剧下降, 这种慢性缺氧不仅会激活HIF-1α, 还会加速软骨基质降解与滑膜的无序增生[33]。因此, 测量患者$TcPO_2$能够了解患者膝关节表面组织的缺氧情况。

此外, 在$TcPO_2$的基础上, 还可以通过测量肌氧饱和度(muscle oxygen saturation, $SmO_2$)深入观察肌细胞内部的供氧水平和状态。微循环血流灌注量主要反映皮肤组织的血流灌注和氧合状态, 而$SmO_2$借助红外光谱技术可深入到骨骼肌层面观察肌细胞内部的氧合状态。对于KOA患者, 通过提高肌肉的供氧能力强化膝关节周围肌群的功能可以提高运动时膝关节的稳定性, 减少关节软骨的摩擦和损伤。此外, $SmO_2$的测试较为简单, 易于在临床上推广应用。但需要注意的是, 该指标的测量结果也会受皮下脂肪厚度、皮肤血流、肤色等因素的影响, 建议采用动脉血流阻断后反应性充血法观察$SmO_2$的增幅, 以排除上述因素的影响。综上, 仅测量KOA患者膝关节的MBF基础值无法科学判断微循环功能的变化。建议后续研究将MR、$TcPO_2$及$SmO_2$等指标相结合, 共同用于KOA患者微循环功能的评价。

### 3.2 运动干预方式单一

目前, 对于KOA患者的运动干预主要以传统运动方式为主。虽然这类运动具有一定的干预效果, 但也存在一些局限, 如患者依从性差、膝关节负重大、运动强度偏大等。针对这些问题, 可将全身振动训练(whole-body vibration training, WBVT)、血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT)等新型运动方式替代传统的运动模式。WBVT是在振动平台上为身体或身体特定部位提供振动运动的一种训练方式, 其原理是基于振动波对人体组织和生理系统产生刺激效应[34]。WBVT产生的低幅高频振动不仅能降低血液黏稠度、促进红细胞解聚, 而且其在血管壁内侧诱发的层流剪切力能有效地激活微血管内皮细胞产生NO, 促进血管舒张[35-36]。有研究指出, 即使持续3 min的WBVT也能诱导显著的外周血管舒张, 使股动脉血流量增加, 提高局部骨骼肌微血管血流量[37]。另外, WBVT联合八段锦运动能在药物治疗的基础上改善KOA患者膝关节症状及运动功能, 并减轻炎症反应[38]。以上研究均为WBVT在KOA患者中的康复治疗提供了依据。此外, WBVT不需要患者主动运动以及不会对膝关节产生应力和反作用力, 因此其运动安全性和依从性较好。对于KOA患者, 运动干预治疗过程中患者的运动依从性都是影响干预效果的核心因素[39]。伴随运动依从性的下降, 患者的运动强度和运动量会随之下降, 无法达到治疗疾病的运动量阈值。WBVT具有较好的运动依从性, 这对于提高干预治疗效果有着重要作用。

此外, 还可以使用BFRT改善KOA患者的微循环功能。BFRT是一种通过抗阻的方式刺激关节肌肉生理性肥大, 运动时动脉血的流入部分受限静脉部分完全受阻, 通过充气袖带及加压的方式实现训练的目的[40-41]。由于在运动前采取了血流限制刺激, 在运动过程中仅需要较低的运动强度, 便可达到相同甚至更优的训练效果。此外, 由于BFRT的运动强度较小, 可以有效提高KOA患者的运动耐受性, 从而在运动过程中以及结束后可以减轻患者疼痛。有研究指出, 12周BFRT能显著改善KOA患者疼痛症状、日常生活活动、生活质量、肌肉力量, 在随后的1年回访中, BFRT组KOA患者上述改善效果明显[42]。此外, Ferraz等[43]研究发现, 在肌肉力量、股四头肌质量及功能方面, 下肢低强度BFRT(12周, 30% 1RM)能达到与高强度抗阻训练(80% 1RM)相同的效果, 且BFRT也能减轻患者疼痛。张达宽等[44]得出相似结论, 低强度BFRT可显著缓解KOA患者的疼痛, 并提高肌肉激活水平和平衡能力。由此可见, 低强度的BFRT是改善KOA膝关节功能的有效方式, 且具有较高的安全性。

综上, 基于WBVT、BFRT等训练方式对KOA患者潜在的应用优势, 建议后续研究重点探讨这两

种方式对KOA患者微循环功能的干预效果，为KOA患者的临床治疗提供更加有效、依从性更好的运动方案。

### 3.3 相关机制探讨的针对性不足

目前，相关研究主要通过炎症因子或通路探讨针对运动改善KOA患者微循环功能的生物学机制。虽然这些研究在一定程度上揭示了相应的机制通路，但针对性不足。对于KOA患者的微循环功能障碍，NO、ET-1等血管舒缩因子失衡是关键的诱因，尤其是NO。NO主要由一氧化氮合酶(nitric oxide synthase, NOS)催化精氨酸产生，但不同类型NOS会催化产生不同功能的NO，因此需理清运动对KOA患者不同类型NO的影响。

内皮型一氧化氮酶(endothelial nitric oxide synthase, eNOS)催化产生的NO能促进血管扩张，提高微血管血流量，对微血管产生保护作用。但炎症因子会促进诱导型一氧化氮合酶(inducible nitric oxide synthase, iNOS)表达，这种炎症驱动生成的NO会促使病理性的微血管新生，导致关节边缘骨质的异常增生，从而加剧患者的疼痛[45]。Abella等[46]研究发现，在促炎细胞因子的诱导下，关节内微环境中会产生大量NO，这种由炎症驱动产生的高浓度NO表现出极强的细胞毒性和促炎促破坏作用，会诱导软骨细胞凋亡、促使基质金属蛋白酶被大量释放，加速软骨基质的降解。另外，局部炎症产生的iNOS会直接加剧关节软骨的分解代谢，并造成NO与ET-1之间的舒缩失衡，加剧KOA患者的微循环功能障碍与软骨退变[47]。ET-1作为由内皮细胞产生的强效血管收缩因子，在炎症状态下，过量的ET-1会导致微血管的异常收缩及血管通透性增加，并诱导产生肿瘤坏死因子-α(tumor necrosis factor-α, TNF-α)、白细胞介素-1β(interleukin-1β, IL-1β)、白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)等促炎因子，这些炎症因子会反向刺激ET-1的合成，从而加剧微循环障碍与慢性炎症[48]。因此，对于KOA患者微血管内皮细胞功能障碍，NO、ET-1等血管舒缩因子失衡可能是关键的诱因，相关研究应关注运动干预后患者NO、ET-1的变化。

但目前仅有少量研究从NO、ET-1角度探讨运动改善KOA患者微循环功能的生物学机制。Kapoor等[49]研究发现，运动干预可有效抑制NF-κB通路的激活，表现为促炎细胞因子IL-1β与TNF-α的表达水平和浓度均降低，同时抑制iNOS的表达，从而减少病理性NO的生成。另外，抑制NF-κB通路还可阻断病变微环境中的缺氧驱动信号，缓解ET-1诱导的微血管痉挛及抑制VEGF驱动的病理性血管新生[50]。由此可见，运动干预可能会抑制iNOS的表达，改善KOA患者微循环功能障碍。但目前有关运动对KOA患者eNOS的干预研究较少，这是后续相关研究的重点方向，其对揭示KOA患者微循环功能的变化有着重要意义。

### 3.4 不良反应记录缺失

由于膝关节结构的退行性变化，在运动干预过程中KOA患者可能会出现疼痛、关节活动度下降等不良反应。因此，为了综合评估运动干预方案的可行性，在干预过程中应记录患者出现的不良反应、消退速度、对后续运动的影响以及受试者流失情况等。此外，不良反应还会严重影响患者对运动方案的执行情况，可能导致无法保质保量地完成运动方案，达不到既定的运动量阈值，进而弱化干预效果[51]。通过对相关文献梳理发现，相关研究中普遍缺失对不良反应的记录。基于对临床应用的慎重考虑，后续研究应详细记录运动干预过程中患者出现的不良反应，确保运动干预的安全性。

## 4 结论

(1) 在多种因素的共同作用下，KOA患者膝关节存在微循环血流灌注下降、血管异常增生以及血管反应性下降等现象，使软骨与滑膜等处于慢性缺氧状态，促使炎性因子的释放。(2) 长期有氧运动、抗阻运动以及有氧联合抗阻运动均能改善KOA患者微循环功能，但各种干预方式均存在研究证据偏少或证据等级不足等问题，尚需更多高质量的临床研究证据。(3) 当前相关研究存在微循环功能评价方式不足、运动干预方式单一、相关机制探讨的针对性不足、不良反应记录缺失等问题，后续可围绕上述问题展开研究。

## 参考文献 (References)

[1] Sajan A, Ahmed O, Padia S A, et al. Pathophysiology of knee osteoarthritis and mechanisms of genicular artery embolization for interventional radiologists [J]. Journal of Vascular and Interventional Radiology, 2026, 37(4): 107984-107994.

[2] 叶子丰, 院一蔚, 邱礼国, 等. H型血管作为软骨下骨重构与软骨退变媒介在膝骨关节炎发病机制中的作用[J]. 重庆医科大

学学报, 2025, 50(9): 1247-1252.
Ye Z F, Yuan Y W, Qiu L G, et al. The role of H-type vessels as a mediator of subchondral bone remodeling and cartilage degeneration in the pathogenesis of knee osteoarthritis [J]. Journal of Chongqing Medical University, 2025, 50(9): 1247-1252.

[3] Yan L, Li D J, Xing D, et al. Comparative efficacy and safety of exercise modalities in knee osteoarthritis: systematic review and network meta-analysis [J]. The BMJ, 2025, 391: e085242.

[4] Vaishya R, Wamuyu E N, Vaish A, et al. Osteoarthritis phenotypes: advancing precision medicine through clinical, structural, and molecular stratification [J]. International Orthopaedics, 2026, 50(6): 1233-1247.

[5] 李文婷, 苑振浩, 郑蔓, 等. 数字化运动处方在膝骨关节炎患者中的应用研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2026, 45(3): 235-240.
Li W T, Yuan Z H, Zheng M, et al. Research progress on the application of digital exercise prescriptions in patients with knee osteoarthritis [J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2026, 45(3): 235-240.

[6] Nakanishi S, Tsutsumi M, Kitano M, et al. Effect of isometric quadriceps exercise on local microcirculation of the infrapatellar fat pad in female patients with knee osteoarthritis [J]. Osteoarthritis and Cartilage, 2024, 32(10): 1319-1326.

[7] Sanchez-Lopez E, Coras R, Torres A, et al. Synovial inflammation in osteoarthritis progression [J]. Nature Reviews Rheumatology, 2022, 18(5): 258-275.

[8] Xu M, Tu J, Yang Y W, et al. Study on the relationship between the expression of S100A12, CaSR, and IL-7R in the synovium of knee osteoarthritis and angiogenesis [J]. Annals of Palliative Medicine, 2021, 10(12): 12775-12781.

[9] Alkatan M, Machin D R, Baker J R, et al. Effects of swimming and cycling exercise intervention on vascular function in patients with osteoarthritis [J]. American Journal of Cardiology, 2016, 117(1): 141-145.

[10] 周术锋, 王芳, 彭永, 等. 12周太极拳联合渐进抗阻运动对膝关节骨性关节炎患者微循环功能及炎性因子的影响[J]. 中国体育科技, 2023, 59(3): 44-49.
Zhou S F, Wang F, Peng Y, et al. Effects of 12-week Taijiquan combined with progressive resistance exercise on microcirculatory function and inflammatory factors in patients with knee osteoarthritis [J]. China Sport Science and Technology, 2023, 59(3): 44-49.

[11] 李哲, 李新志. 等速离心康复结合本体感觉训练对KOA的疗效[J]. 体育视野, 2023(23): 131-133.
Li Z, Li X Z. Effects of isokinetic eccentric rehabilitation combined with proprioceptive training on knee osteoarthritis [J]. Sports Vision, 2023(23): 131-133.

[12] 王译霆. 水中有氧运动对膝骨关节炎患者疼痛程度和身体功能改善效果的系统性评价与Meta分析[J]. 首都体育学院学报, 2025, 37(5): 564-575.
Wang Y T. The effects of aquatic aerobic exercise on improving pain and physical function in patients with knee osteoarthritis: a systematic review and Meta-analysis [J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports, 2025, 37(5): 564-575.

[13] Mattiello-Sverzut A C, Petersen S G, Kjaer M, et al. Morphological adaptation of muscle collagen and receptor of advanced glycation end product (RAGE) in osteoarthritis patients with 12 weeks of resistance training: influence of anti-inflammatory or glucosamine treatment [J]. Rheumatology International, 2013, 33(9): 2215-2224.

[14] 王昌雷, 戴春宏, 邢斌, 等. 推拿配合常规康复训练对膝骨性关节炎患者膝关节微循环及功能恢复的影响[J]. 辽宁中医杂志, 2024, 51(3): 166-169.
Wang C L, Dai C H, Xing B, et al. Effects of Tuina combined with conventional rehabilitation training on knee microcirculation and function recovery in patients with knee osteoarthritis [J]. Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine, 2024, 51(3): 166-169.

[15] Schleimer T, Teichert F, Henriksen M, et al. Effectiveness of exercise therapy for osteoarthritis: an overview of systematic reviews and randomised controlled trials [J]. RMD Open, 2026, 12(1): e006275-e006295.

[16] Shavianidze G, Shavianidze M, Lomidze G. Influence of tskaltubo low-radon nitrogen mineral baths on erythrocyte biophysical parameters and microcirculation in osteoarthritis: a prospective clinical study [J]. The Georgian Medical Journal, 2026, 1(1): 99-114.

[17] Ma W W, Du M, Lu J, et al. Electroacupuncture improves articular microcirculation and attenuates cartilage hypoxia in a male rabbit model of knee osteoarthritis [J]. Journal of Traditional and Complementary Medicine, 2024, 14(4): 414-423.

[18] Huang L X, Du W C, Jin X, et al. Swimming exercise reduces H-type vessels by down-regulating the Hif-1α/VEGFa pathway in mice with osteoarthritis of the knee [J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2025, 26(1): 657-667.

[19] Feldmann A, Quaresima V, Perrey S, et al. Distinguishing muscle oxygen saturation from tissue oxygen saturation: accuracy, limitations, and practical utility in muscle oximetry [J]. Sports Medicine-Open, 2026, 12(1): 61-75.

[20] Shen S Y, Fang T S, Dong J B, et al. Long-term mechanical loading aggravates osteoarthritis through a pro-apoptotic inflammatory microenvironment [J]. Journal of Biomedical Research, 2026, 40(2): 134-146.

[21] 周慧敏, 李淼, 刘琦, 等. 运动对高血压患者微血管功能干预效应的研究进展及展望[J]. 中国细胞生物学学报, 2026, 48(4): 1236-1251.
Zhou H M, Li M, Liu Q, et al. Research progress and future prospects on the intervention effects of exercise methods on microvascular function in patients with hypertension [J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2026, 48(4): 1236-1251.

[22] Dunlap E, Zhou Y B, Kwok M M Y, et al. Effects of aquatic exercise on arterial stiffness and endothelial function in adults: a systematic review and meta-analyses [J]. PLoS One, 2025, 20(12): e0338929-e0338948.

[23] 文凡, 朱欢, 王康锋, 等. 水中运动疗法对常见慢性病干预效果的研究进展[J]. 体育科技文献通报, 2024, 32(2): 236-241.
Wen F, Zhu H, Wang K F, et al. Research advances in therapeutic effects of aquatic exercise for common chronic diseases [J]. Bulletin of Sport Science & Technology, 2024, 32(2): 236-241.

[24] 刘琦, 朱欢, 王康锋, 等. 有氧运动对肿瘤组织微血管功能的干预研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2025, 47(8): 2056-2064.
Liu Q, Zhu H, Wang K F, et al. Research progress on the intervention of aerobic exercise on microvascular function in tumor tissue [J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2025, 47(8): 2056-2064.

[25] 杨新蔚, 温少瑾, 豆传辉. 渐进抗阻运动与关节腔内PRP注射联合治疗对膝关节骨性关节炎患者微循环及功能恢复的影响[J]. 大健康, 2024(16): 154-156.
Yang X W, Wen S J, Dou C H. Effects of progressive resistance exercise combined with intra-articular platelet-rich plasma injection on microcirculation and functional recovery in patients with knee osteoarthritis [J]. Da Jiankang, 2024(16): 154-156.

[26] Laver L, Filardo G, Sanchez M, et al. The use of injectable orthobiologics for knee osteoarthritis: a European ESSKA-ORBIT consensus. Part 1-blood-derived products (platelet-rich plasma) [J]. Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy, 2024, 32(4): 783-797.

[27] 李雪莹, 程志新. 锻炼与针刺组合对退行性膝关节炎微循环血流灌注量的影响[J]. 武汉体育学院学报, 2019, 53(1): 98-100.
Li X Y, Cheng Z X. Effects of exercise combined with acupuncture on microcirculatory blood perfusion of degenerative knee arthritis [J]. Journal of Wuhan Institute of Physical Education, 2019, 53(1): 98-100.

[28] 王振涛, 王银平, 许艳琴, 等. 辨证取穴针刺联合运动疗法对老年膝关节骨性关节炎患者关节功能及下肢微循环的影响[J]. 中国老年学杂志, 2021, 41(4): 818-821.
Wang Z T, Wang Y P, Xu Y Q, et al. Effects of acupuncture based on syndrome differentiation combined with exercise therapy on joint function and lower-limb microcirculation in older patients with knee osteoarthritis [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2021, 41(4): 818-821.

[29] 高昕蕊, 齐雪莹, 郑妍. 有氧运动联合抗阻训练改善老年膝关节骨性关节炎的研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2026, 46(9): 1723-1727.
Gao X R, Qi X Y, Zheng Y. Research progress on aerobic exercise combined with resistance training for older patients with knee osteoarthritis [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2026, 46(9): 1723-1727.

[30] 朱欢, 胡庆华, 彭爱萍, 等. 长期太极拳运动对中老年人膝关节皮肤微血管反应性、经皮氧分压的影响[J]. 中国应用生理学杂志, 2020, 36(4): 321-323,384.
Zhu H, Hu Q H, Peng A P, et al. Effects of long-term Tai Chi exercise on knee joints skin microvascular reactivity and transcutaneous oxygen partial pressure in middle and old aged people [J]. Chinese Journal of Applied Physiology, 2020, 36(4): 321-323, 384.

[31] Wang X Y, Chen Z Y, Liang Y, et al. Effects of exercise on balance function in people with knee osteoarthritis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. Healthcare, 2025, 13(11): 1312-1329.

[32] 王成科, 朱欢, 董徽徽, 等. 运动对高血压患者微血管反应性的干预效应及可能机制研究进展[J]. 中国预防医学杂志, 2021, 22(9): 726-731.
Wang C K, Zhu H, Dong H H, et al. Research progress on the effects of exercise interventions on microvascular reactivity in patients with hypertension and possible mechanisms [J]. Chinese Preventive Medicine, 2021, 22(9): 726-731.

[33] Zeng C Y, Wang X F, Hua F Z. HIF-1α in osteoarthritis: from pathogenesis to therapeutic implications [J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 927126-927143.

[34] 李淼, 文凡, 付贝伦, 等. 垂直振动训练对2型糖尿病患者微血管功能的干预效应及潜在机制研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2025, 47(6): 1453-1463.
Li M, Wen F, Fu B L, et al. Research progress on the intervention effects and potential mechanism of vertical vibration training on microvascular function in type 2 diabetic patients [J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2025, 47(6): 1453-1463.

[35] Adams J A, Martínez A. Editorial: non-pharmacologic sustained endothelial shear stress: an evolving clinical paradigm [J]. Frontiers in Physiology, 2021, 12: 790022-790025.

[36] 文凡, 朱欢, 胡庆华, 等. 8周有氧运动及有氧联合全身振动训练改善肥胖大学生的微循环功能[J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(34): 8994-9001.
Wen F, Zhu H, Hu Q H, et al. Eight-week aerobic exercise and aerobic exercise combined with full-body vibration training improve the microcirculation function of obese college students [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2026, 30(34): 8994-9001.

[37] Betik A, Parker L, Kaur G, et al. Whole-body vibration stimulates microvascular blood flow in skeletal muscle [J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2021, 53(2): 375-383.

[38] 范祎, 李敏, 高晴, 等. 全身振动训练联合八段锦运动对膝骨关节炎患者运动功能及RhoA/ROCK炎症通路的影响[J]. 分子诊断与治疗杂志, 2025, 17(10): 1968-1971.
Fan Y, Li M, Gao Q, et al. Effects of whole-body vibration training combined with Baduanjin exercise on motor function and the RhoA/ROCK inflammatory pathway of patients with knee osteoarthritis [J]. Journal of Molecular Diagnostics and Therapy, 2025, 17(10): 1968-1971.

[39] 于田鹏, 董建俐, 董惠珍, 等. 老年全膝关节置换患者运动恐惧、自我超越、应对方式与功能锻炼依从性的相关性研究[J]. 中国实用护理杂志, 2026, 42(15): 1177-1184.
Yu T P, Dong J L, Dong H Z, et al. Relationships of kinesiophobia, self-transcendence, coping styles, and adherence to functional exercise in older patients undergoing total knee arthroplasty [J]. Chinese Journal of Practical Nursing, 2026, 42(15): 1177-1184.

[40] 单鑫海, 朱欢, 陈自华, 等. 血流限制训练对运动员最大摄氧量的影响及其作用机制研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2026, 48(6): 1700-1713.
Shan X H, Zhu H, Chen Z H, et al. Research progress on the effects of blood flow restriction training on athletes maximal oxygen uptake and its mechanisms [J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2026, 48(6): 1700-1713.

[41] 彭永, 胡江平, 朱欢. 低负荷血流限制和高强度抗阻运动对男性运动青年大腿微循环功能的影响[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(2): 393-401.
Peng Y, Hu J P, Zhu H. Effects of low-load blood flow restriction exercise and high-intensity resistance exercise on the thigh microcirculation function of athletic young men [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2025, 29(2): 393-401.

[42] Jacobs E, Stroobant L, Witvrouw E, et al. Sustained benefits of blood flow restriction therapy in knee osteoarthritis rehabilitation: 1-year follow-up of a randomised controlled trial [J]. British Journal of Sports Medicine, 2025, 59(21): 1481-1489.

[43] Ferraz R B, Gualano B, Rodrigues R, et al. Benefits of resistance training with blood flow restriction in knee osteoarthritis [J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2018, 50(5): 897-905.

[44] 张达宽, 韩立宝, 李永杰, 等. 不同水平血流限制结合低强度抗阻训练对膝骨关节炎患者疼痛、肌肉激活及平衡功能的影响

[J]. 中国康复医学杂志, 2026, 41(8): 1277-1286.
Zhang D K, Han L B, Li Y J, et al. Effects of different levels of blood flow restriction combined with low-intensity resistance training on pain, muscle activation, and balance function in patients with knee osteoarthritis [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2026, 41(8): 1277-1286.

[45] Mapp P I, Walsh D A. Mechanisms and targets of angiogenesis and nerve growth in osteoarthritis [J]. Nature Reviews Rheumatology, 2012, 8(7): 390-398.

[46] Abella V, Scotece M, Conde J, et al. Leptin in the interplay of inflammation, metabolism and immune system disorders [J]. Nature Reviews Rheumatology, 2017, 13(2): 100-109.

[47] Mobasheri A, Castro-Domínguez F, Gualillo O, et al. Targeting synovial inflammation in knee osteoarthritis: translational insights for diagnosis and therapy [J]. Journal of Orthopaedic Translation, 2026, 56: 101012-101027.

[48] Banecki K M R M, Dora K A. Endothelin-1 in health and disease [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(14): 11295-11415.

[49] Kapoor M, Martel-Pelletier J, Lajeunesse D, et al. Role of proinflammatory cytokines in the pathophysiology of osteoarthritis [J]. Nature Reviews Rheumatology, 2011, 7(1): 33-42.

[50] Marcu K B, Otero M, Olivotto E, et al. NF-κB signaling: multiple angles to target OA [J]. Current Drug Targets, 2010, 11(5): 599-613.

[51] 陈自华, 朱欢, 李淼, 等. 血流限制训练对高血压的干预效应的研究进展[J]. 中华高血压杂志(中英文), 2026, DOI: 10.16439/j.issn.1673-7245.2026-0051.
Chen Z H, Zhu H, Li M, et al. Research progress of blood flow restriction training on blood pressure intervention in hypertensive patients [J]. Chinese Journal of Hypertension, 2026, DOI: 10.16439/j.issn.1673-7245.2026-0051.