

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

周慧敏¹ 李森^{2,3} 刘琦^{2,3} 宋广侠¹ 陈自华^{2,3} 王成科⁴ 朱欢^{2,3*}

(¹徐州工业职业技术学院体艺部, 徐州 221000; ²湖北民族大学体育学院, 恩施土家族苗族自治州 445000;

³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;

⁴广西幼儿师范高等专科学校运动与健康系, 南宁 530000)

摘要 该综述以微血管舒张功能和微血管密度为切入点, 从运动类型、运动强度等角度总结运动对高血压患者微血管功能的影响, 同时揭示运动改善微血管功能的潜在机制, 为运动疗法在高血压患者的应用提供证据支撑。研究表明, 长期规律性的中低强度的有氧运动、抗阻运动及血流限制抗阻运动均能显著改善高血压患者微血管功能。另外, 调节血管舒缩和血管增生因子、脂肪代谢因子水平和改善自主神经系统功能是运动提高高血压患者微血管功能潜在的机制。微血管功能评价指标和评价方式不足、运动方式单一且缺乏干预效果对比、干预对象病情单一等是目前相关研究存在的主要问题。针对这些问题, 建议后续研究从肌氧饱和度、运动状态下微血管功能的变化两个方面强化微血管功能的评价, 并重点以2级和3级高血压患者为研究对象, 深入探讨有氧联合抗阻运动、血流限制训练、高强度间歇等运动模式的干预效果, 并比较不同运动方式的干预效果。

关键词 高血压; 有氧运动; 抗阻运动; 微血管舒张; 微血管密度

Research Progress and Future Prospects on the Intervention Effects of Different Exercise Methods on Microvascular Function in Patients with Hypertension

ZHOU Huimin¹, LI Miao^{2,3}, LIU Qi^{2,3}, SONG Guangxia¹, CHEN Zihua^{2,3}, WANG Chengke⁴, ZHU Huan^{2,3*}

(¹Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221000, China; ²School of Sports of Hubei Minzu University,

Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China; ³the Sports Science Research Center of Hubei

Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China;

⁴Department of Sports and Health, Guangxi Normal College of Education, Nanning 530000, China)

Abstract This review focuses on microvascular dilation function and microvascular density as the entry points. It summarizes the effects of exercise on microvascular function in patients with hypertension from the perspectives of exercise type and exercise intensity, and also reveals the potential mechanisms by which exercise improves microvascular function, providing evidence support for the application of exercise therapy in patients with hypertension. Previous studies have demonstrated that long-term regular moderate-intensity aerobic exercise, resistance exercise, and blood flow restriction resistance exercise can significantly improve the microvascular function of patients with hypertension. In addition, regulating vascular dilation and contraction factors, fat metabolism factors, and improving the autonomic nervous system function are potential mechanisms for exercise to enhance the microvascular function of patients with hypertension. The deficiencies in microvascular function evaluation indica-

收稿日期: 2025-12-30 接受日期: 2026-03-05

湖北省自然科学基金(批准号: 2025AFD659)资助的课题

*通信作者。Tel: 18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com

Received: December 30, 2025 Accepted: March 5, 2026

This work was supported by Hubei Provincial Natural Science Foundation (Grant No.2025AFD659)

*Corresponding author. Tel: +86-18817873692, E-mail: 1207105091@qq.com

tors and evaluation methods, the single exercise mode and lack of intervention effect comparison, and the single condition of the intervention subjects are the main problems in current related research. To address these issues, it is suggested that subsequent research should strengthen the evaluation of microvascular function from two aspects: muscle oxygen saturation and changes in microvascular function under exercise conditions, and focus on 2nd and 3rd grade hypertension patients as research subjects to deeply explore the intervention effects of aerobic combined with resistance exercise, blood flow restriction training, and high-intensity intermittent exercise patterns, and compare the intervention effects of different exercise modes.

Keywords hypertension; aerobic exercise; resistance exercise; microvascular dilation; microvascular density

微血管由微动脉、微静脉、毛细血管等直径小于20 μm 的血管组成,其主要功能是确保氧气输送到细胞内,以支持细胞的活动^[1]。微血管还能调节血管与组织之间的物质交换,并促进激素和营养物质向细胞的输送。因此,微血管在维持细胞正常功能和人体健康中发挥重要作用。微血管功能障碍是诱发心血管疾病的重要因素,尤其是高血压。研究指出,微血管功能障碍(如血管舒张功能下降、血管稀疏等)不仅是诱发高血压的重要病因,而且是高血压典型的病理性特征^[1-3]。微血管是形成循环外周阻力的主要场所,其中70%由微小动脉引起,因此微血管功能障碍成为以血管阻力升高(如高血压)为特征疾病的主要发病机制。微血管功能障碍使组织灌注不足并出现缺氧现象,触发机体代偿机制(如提高舒张压)以增加血流灌注量^[4]。高血压会进一步降低血管内皮依赖性舒张功能,加剧患者高血压病情,并以此形成恶性循环。因此,微血管功能障碍与高血压之间相互影响,二者存在复杂的因果关系。

此外,高血压患者静息状态下的微血管功能障碍还会降低患者的运动耐受能力。有研究指出,为了适应运动时机体的代谢需求,高血压患者和健康人群微血管血流量都会显著升高,但高血压患者微血管血流量的增幅有限,且明显低于健康人群^[5-6]。由于微血管血流量的增幅下降,运动过程中高血压患者骨骼肌等组织和血液的物质交换效率会下降,造成细胞能量供应障碍以及缺氧的发生,进而使运动能力下降。因此,改善高血压患者微血管功能不仅能有效调控血压,且能提高患者的运动耐受能力。现有的研究表明,规律性的运动干预能从微血管舒张功能、微血管密度等方面改善高血压患者微血管功能^[5]。然而,通过对相关文献梳理,发现运动对高血压患者微血管功能的干预效果存在差异,

其原因可能与运动方式、运动强度等因素有关。如不同运动方式在动作模式、作用部位、血管的刺激程度等方面具有差异性,进而导致干预效果的差异性。有研究指出,相较于传统抗阻运动模式,血流限制联合抗阻运动能以更小的运动强度获得更佳的干预效果^[7-8]。另外,不同强度的运动也会对高血压患者微血管功能产生不同的干预效果^[9-10]。此外,对于运动改善高血压患者微血管功能的机制,相关研究主要从一氧化氮(nitric oxide, NO)、内皮素-1(endothelin-1, ET-1)、血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)等血管因子角度进行研究,研究视角较为单一^[11-15]。除上述血管因子外,脂肪代谢因子、自主神经系统功能等可能也发挥重要作用。

基于以上问题,本研究以微血管舒张功能和微血管密度为切入点,从运动类型、运动强度等角度总结运动对高血压患者微血管功能的影响,本综述以微血管舒张功能和微血管密度为切入点,从运动类型、运动强度等角度总结运动对高血压患者微血管功能的影响,同时揭示运动改善微血管功能的潜在机制,为运动疗法在高血压患者的应用提供证据支撑。

1 运动对高血压患者微血管功能的影响

对于高血压患者,微血管内皮依赖性血管舒张功能下降是典型的病理特征^[1,16]。伴随着微血管舒张功能下降,外周血管阻力明显增大。外周阻力增大会降低血流速度,导致向外周流动的血液减少,造成动脉内的血液总量增加,引起血压升高。此外,微血管密度下降也是高血压患者微血管功能障碍的重要特征,尤其是骨骼肌组织^[13,15,17]。即使在高血压发病早期,高血压患者微循环通路功能下降和毛细血管密度降低^[18]。微血管密度下降将进一步增大外周阻力,加

重高血压症状,最终导致终末器官损伤^[18]。微血管密度下降还会减缓运动后血压的恢复速度。有研究指出,在高血压患者进行递增强度运动后(bruce方案)的1 min恢复期,毛细血管密度和舒张压的变化存在显著负相关^[19]。综上,高血压患者体内存在微血管舒张功能和微血管密度下降的现象。针对高血压患者微血管功能障碍,运动干预是有效的改善策略(表1)。

1.1 运动类型对高血压患者微血管功能的影响

1.1.1 有氧运动对高血压患者微血管功能的影响
有氧运动对高血压患者微血管内皮依赖性舒张功能的干预效果得到多位学者的证实。但不同学者采用的有氧运动项目有所不同。胡庆华等^[11]和HURLEY等^[21]学者采用了单一有氧运动方式对患者进行运动干预。胡庆华等^[11]研究得出,12周24式太极拳运动(55%~65%最大心率,60 min/次,3~5次/周)能显著提高中老年1级高血压患者的微血管舒张功能(局部皮肤热刺激法,44 °C)。2007年,皮肤温度和激光多普勒血流灌注量测定(局部皮肤热刺激法)被国际外周动脉疾病诊疗的多学会专家共识列为诊断和疗效判断的主要指标^[20]。相比于其他方法,该方法的患者依从性和测量结果的重复性更好。另外,HURLEY等^[21]以老年1级高血压患者为研究对象,发现12周步行上坡运动(基础心率+50%~70%心率储备,40 min/次,4次/周)能提高老年1级高血压患者比目鱼肌微血管反应性充血能力,但增幅小于血压正常的老年人。该研究不仅揭示了有氧运动能改善高血压患者微血管舒张反应,且佐证了高血压患者微血管舒张能力的下降。另外,该研究采取了递增强度的运动模式,1~3周为50%心率储备,4~12周为70%心率储备。对于老年高血压患者,该运动模式的运动初期能提高老年人对运动强度的适应能力,而运动后期则能进一步增强运动干预效果(产生持续性的效果)。

有氧运动还能通过促进毛细血管新生逆转高血压诱发微血管稀疏现象。HERRERA等^[22]研究发现,8周有氧运动(60%最大有氧能力,60 min/次,7次/天)能增大高血压大鼠毛细血管密度以及毛细血管与肌纤维的比例。张昆茹等^[14]得出类似结论,8周无负重游泳运动(90 min/次,5次/周)能提高幼年自发性高血压大鼠腓肠肌微血管数量以及微血管与腓肠肌细胞的比值。目前高血压的发病越来越年轻化,及早采取干预措施能避免高血压对器官的持续性伤

害。因此,该研究结果为运动改善青年高血压群体微血管功能提供了研究证据支持。姜娜^[15]也得出相似结论,8周游泳训练(60~120 min/次,6次/周)能增大高血压大鼠比目鱼肌的肌纤维横截面积和微血管密度。该研究的运动量采取了递增模式,1~2周为60 min/次,3~6周为90 min/次,5~6周为120 min/次。随着运动干预的进行,大鼠的运动能力会提高,实验后期需要更高的运动量才能对微血管产生有效的刺激。因此,该运动方案的设计更加科学合理。

GLIEMANN等^[13]以临床高血压患者为研究对象得出类似结论,8周有氧踏车(60 min/次,3~4次/周)运动能促进高血压患者股外侧肌毛细血管新生,增大毛细血管密度。YUAN等^[17]将运动时间延长到10周,发现有氧跑步运动(12~15 m/min,30~60 min/次,5次/周)能逆转高血压大鼠腓肠肌毛细血管数量稀疏。此外,有氧运动还能促进高血压患者其他组织中微血管的生成。LIANG等^[23]研究发现,12周中等强度的有氧自行车运动(75%最大摄氧量,45 min/次,5次/周)能显著提高原发性1级高血压患者皮肤皮下微血管密度和视网膜毛细血管密度,同时增强内皮祖细胞的血管生成能力。内皮祖细胞具有显著的血管生成能力,能够参与新生血管的形成。上述研究均采用了单一有氧运动项目,研究结果明确了该运动项目对高血压患者微血管功能的干预效果。

另有研究采用复合型有氧运动模式对患者进行运动干预。PASQUALINI等^[24]研究发现,8周步行结合自行车运动(65%~80%最大心率,45 min/次,4次/周)能改善久坐超重1级高血压患者皮肤微血管内皮依赖性血管舒张反应,且其变化先于血压降低发生。该研究认为,微血管内皮依赖性舒张反应可以作为非药物治疗高血压患者疗效的生物标志物。宋丹丹等^[25]进一步增加有氧运动项目,发现30天散步、慢跑、骑自行车、太极拳等复合式有氧运动(运动强度为170-心率,1天/次)能在药物治疗的基础上进一步改善1级高血压患者甲襞微循环功能,并降低血压。但该研究对患者施加了多种运动方式,因此也不能明确运动干预效应主要是由哪种运动所致的。有研究指出,6种传统中医身心运动对中老年高血压患者血管内皮功能的干预效果存在差异,其中导引养生术在调节NO和ET-1上效果最突出,而太极、八段锦对血脂的调节作用最显著^[26]。另外,该研究结果仅能代表基础状态下人体微循环功能的变

表1 运动对高血压患者微血管功能干预效果的研究

Table 1 Study on the intervention effects of exercise on microvascular function in hypertension patients

序列号 Serial number	作者(年份) Author (year)	研究对象 Research subjects	训练方案 Training protocol	主要结果指标 Main outcome measures	主要结论 Main conclusions
1	HU, et al (2021) ^[11]	Middle-aged and elderly patients with grade 1 hypertension	12-week 24-form Tai Chi exercise (55%-65% of maximum heart rate, 60 min per session, 3-5 sessions per week)	Microvascular vasodilation function	Significantly improved
2	HURLEY, et al (2019) ^[21]	Elderly patients with grade 1 hypertension	12-week uphill walking exercise (resting heart rate+50%-70% heart rate reserve, 40 min per session, 4 sessions per week)	Soleus muscle microvascular reactive hyperemia capacity	Significantly improved
3	HERRERA, et al (2016) ^[22]	Spontaneously hypertensive rats	8-week aerobic exercise (60% of maximum aerobic capacity, 60 min per session, 7 sessions per day)	Capillary density and capillary-to-muscle fiber ratio	Both increased significantly
4	ZHANG, et al (2017) ^[14]	Juvenile spontaneously hypertensive rats	8-week weightless swimming exercise (90 min per session, 5 sessions per week)	Gastrocnemius microvascular count and microvessel-to-gastrocnemius myocyte ratio	Both increased significantly
5	JIANG, et al (2015) ^[15]	Spontaneously hypertensive rats	8-week swimming training (60-120 min per session, 6 sessions per week)	Cross-sectional area of soleus muscle fibers and microvascular density	Both increased significantly
6	GLIEMANN, et al (2015) ^[13]	Hypertensive patients	8-week aerobic cycling (60 min per session, 3-4 sessions per week)	Vastus lateralis capillary density	Increased significantly
7	YUAN, et al (2021) ^[17]	Spontaneously hypertensive rats	10-week aerobic running exercise (12-15 meters per minute, 30-60 min per session, 5 sessions per week)	Gastrocnemius capillary density	Increased significantly
8	LIANG, et al (2021) ^[23]	Patients with essential grade 1 hypertension	12-week moderate-intensity aerobic cycling (75% of maximum oxygen uptake, 45 min per session, 5 sessions per week)	Cutaneous and retinal capillary density	Both increased significantly
9	PASQUALINI, et al (2010) ^[24]	Sedentary overweight patients with grade 1 hypertension	8-week combined walking and cycling exercise (65%-80% of maximum heart rate, 45 min per session, 4 sessions per week)	Microvascular endothelium-dependent vasodilation response	Significantly improved
10	SONG, et al (2015) ^[25]	Patients with grade 1 hypertension	30-day combined aerobic exercises including walking, jogging, cycling and Tai Chi (exercise intensity: 170 heart rate, 1 session per day)	Nailfold microcirculation function	Significantly improved
11	LI, et al (2025) ^[27]	Patients with grade 1 hypertension	2-month upper limb resistance band exercise (50%-70% of 1RM, 2-3 sessions per week)	Peripheral vascular resistance	Decreased significantly
12	BANKS, et al (2024) ^[28]	Patients with grade 1 hypertension	9-week resistance exercise (bench press, dumbbell squat, 10RM, 3 sessions per week)	Peripheral vascular resistance	Decreased significantly
13	TAN, et al (2022) ^[7]	Spontaneously hypertensive rats	8-week moderate-intensity ladder climbing resistance exercise (30%-60% of 1RM, 5 sessions per week), high-intensity resistance exercise (50%-80% of 1RM, 5 sessions per week) and blood flow restriction combined with resistance exercise (30%-60% of 1RM, 5 sessions per week)	Myocardial microvascular density	All three increased significantly, with blood flow restriction combined with resistance exercise yielding a better intervention effect

续表1

序号 Serial number	作者(年份) Author (year)	研究对象 Research subjects	训练方案 Training protocol	主要结果指标 Main outcome measures	主要结论 Main conclusions
14	TAN, et al (2025) ^[8]	Spontaneously hypertensive rats	8-week moderate-intensity resistance exercise (35%-55% of 1RM, 5 sessions per week), high-intensity resistance exercise (55%-75% of 1RM, 5 sessions per week) and blood flow restriction combined with resistance exercise (35%-55% of 1RM, 5 sessions per week)	Gastrocnemius microvascular density	All three increased significantly, with blood flow restriction combined with resistance exercise yielding a better intervention effect
15	FERNANDES, et al (2012) ^[29]	Spontaneously hypertensive rats	10-week swimming resistance exercise (4% body weight load on the tail, 60 min per session, 5 sessions per week)	Soleus muscle capillary density	Increased significantly
16	LIANG, et al (2019) ^[30-31]	Patients with grade 1 hypertension	12-week resistance training (stationary bike resistance platform mode, 70% of maximum exercise tolerance, 45 min per session, 5 sessions per week)	Microvascular count	Increased significantly
17	LOPES, et al (2019) ^[33]	Hypertensive patients	6-month resistance exercise at 30% of 1RM (3 months of low-intensity resistance exercise+1 month of rest+3 months of blood flow restriction combined with resistance exercise, 1 session per week)	Forearm cutaneous microvascular vasodilation response capacity	Significantly improved

化,无法反映出微血管舒张功能和反应性的大小。对于高血压患者而言,微血管舒张功能障碍是导致血压升高的关键病因,仅测量静息状态下甲襞微循环功能不能科学反映出患者外周血管阻力的变化。因此该研究在微血管功能的评价方式上也存在局限性,即均未通过局部刺激评价微血管的舒张功能。

虽然PASQUALINI等^[24]和宋丹丹等^[25]得出有氧运动能提高高血压患者微血管功能,但均对患者施加了复合型有氧运动项目,未探讨单一有氧运动项目的干预效果。因此不能明确运动干预效应主要是由哪种运动所致的。同时,上述研究未比较在同等运动量下复合型运动项目和单一运动项目的干预效果,因此不能明确其干预效果是不同运动项目的叠加效应还是不同项目间的协同增强所致。针对这一问题,建议后续研究重点比较复合型有氧运动模式和单一运动模式的干预效果,明确复合型有氧运动模式的干预效果是何种原因所致。

综上所述,8~12周有氧运动(单一项目)能显著改善高血压患者微血管功能,而对于复合型有氧运动模式的干预效果,还需更多的研究证据支撑。另外,现有的研究结果主要针对1级轻度高血压患

者。当患者处于2级和3级高血压状态时,有氧运动是否仍具有较好的干预效应尚不明确。微血管功能障碍是导致高血压产生的重要诱因以及高血压的重要病理特征,随着病情的加重,微血管功能障碍会加剧。此时可能需要更高剂量的有氧运动干预才能显著改善患者微循环功能。此外,针对微血管密度的干预研究,主要以高血压动物模型为主,人体研究成果较少,因此该方面的研究存在临床转化不足的问题。

1.1.2 抗阻运动对高血压患者微血管功能的影响
对于高血压患者,抗阻运动也能改善微血管舒张功能,降低外周血管阻力。循环系统的外周血管阻力主要指小动脉和微动脉对血流的阻力情况,是影响血压的关键因素。因此,外周血管阻力能反映微小动脉舒张能力的变化。李文雅等^[27]研究发现,2个月上肢弹力带抗阻运动[50%~70%单次最大重复重量(one repetition maximum, 1RM), 2~3次/周]能在药物治疗的基础上进一步降低1级高血压患者外周血管阻力。此外,两组患者治疗期间运动副作用发生率及不良心血管事件发生率均无显著差异。这提示,对于高血压患者,弹力带抗阻运动是一种较为安全

的运动模式, 患者的依从性较好。相比于器械抗阻运动, 弹力带抗阻运动在运动强度方面具有较强的灵活性和安全性, 且能针对不同部位制定抗阻训练动作。BANKS等^[28]将运动时间延长到9周, 发现抗阻运动(握推、哑铃深蹲, 10RM, 3次/周)也能降低1级高血压患者外周血管总阻力, 并提高血流介导的血管扩张功能。但该研究采取的器械抗阻运动具有一定的安全风险, 尤其当患者血压处于2级或3级水平时风险水平会显著提高。因此, 高血压患者应注意器械抗阻潜在的运动安全问题。

目前, 有关抗阻运动对高血压患者微血管密度的研究较少, 且主要以动物模型为主。谭朝文等^[7]以自发性高血压大鼠为研究对象, 发现8周中等强度的爬梯抗阻运动(30%~60% 1RM, 5次/周)以及高强度抗阻运动(50%~80% 1RM, 5次/周)均能改善心肌微血管稀疏。该团队的另一研究得出相似结论, 8周中等强度抗阻运动(35%~55% 1RM, 5次/周)以及高强度抗阻运动(55%~75% 1RM, 5次/周)均能促进腓肠肌微血管的生成, 提高微血管密度^[8]。FERNANDES等^[29]得出类似结论, 10周游泳抗阻运动(4%的尾部体重负荷, 60 min/次, 5次/周)能改善自发性高血压大鼠比目鱼肌毛细血管稀疏。由此可见, 抗阻运动能促进高血压大鼠不同组织的毛细血管新生。此外, LIANG等^[30-31]以1级高血压患者为研究对象, 发现12周功率自行车阻力训练(70%最大运动耐量, 45 min/次, 5次/周)能促进患者微血管新生, 并提高患者运动耐量、氧摄入量及左心舒张功能。传统的器械抗阻训练是将运动负荷直接作用在骨骼肌等组织, 其应力冲击会增大安全风险。功率自行车抗阻模式并不是将阻力负荷直接作用到骨骼肌, 对机体的应力冲击程度较小, 因此其安全性更高。另外, 该训练模式还可以通过自行车的显示屏对患者的运动信息进行实时监控。但该种抗阻训练模式也存在局限性, 其主要针对臀部和下肢肌群, 对上肢和躯干肌群的刺激不够。因此, 在使用功率自行车阻力训练时, 应额外设计针对上肢和躯干的抗阻训练。

综上, 8~12周的抗阻运动也能显著改善高血压患者的微血管功能。但不同研究在抗阻运动方式上存在差异, 如器械抗阻、弹力带抗阻、负重抗阻、自行车阻力训练等。不同抗阻运动方式在运动模式、运动强度以及作用部位等方面不尽相同, 会产生不

同的干预效应。但目前尚未有研究比较不同抗阻运动方式对高血压患者微血管功能的干预效果。因此, 建议后续研究对比不同的抗阻运动方式对高血压患者微血管功能的干预效果, 并对运动安全性、患者依从性等进行综合评估。

1.1.3 血流限制联合抗阻运动对高血压患者微血管功能的影响

虽然抗阻运动也能改善高血压患者微血管功能, 但往往需要较高的运动强度。而对于高龄或者病情较重的患者, 难以实施高强度抗阻运动干预。针对这一问题, 有研究提出采用血流限制联合低强度抗阻运动对高血压患者进行干预。血流限制运动作为一种新的训练方式, 是指将血流限制带(或袖带)放置在四肢(手臂或腿部)近端, 使用加压空气泵来限制静脉从骨骼肌流出, 同时保持动脉流入, 达到限制血流的目的^[32]。

LOPES等^[33]研究发现, 6个月30% 1RM的抗阻运动(3个月低强度抗阻运动+1个月休息+3个月血流限制联合抗阻运动, 1次/周, 30~40 min/次)可显著提高1例91岁肌肉减少症的高血压患者前臂皮肤微血管舒张反应能力(局部皮肤热刺激), 并降低患者血压。该研究虽然仅对患者施加了每周1次的运动训练, 但其仍能显著提高患者微血管反应性。其原因可能与患者微血管内皮细胞对运动刺激的敏感性有关。对于91岁的高龄老年人, 其体力活动水平明显降低。由于长时间缺乏运动刺激, 身体对运动刺激的敏感性较强, 因此即使每周仅1次的运动干预也能对微血管产生有效的刺激。此外, 该研究中的抗阻运动模式可能也起到了重要作用。在试验后期, 该研究采用了血流限制联合低强度抗阻训练。这种模式能通过缺血再灌注等方式对微血管产生特异性干预效果, 且具有运动强度小、安全性等优点。多项研究指出, 血流限制联合低强度抗阻训练能有效降低高血压患者血压, 且效果优于传统的抗阻训练^[7-8, 34-35]。血流限制训练对血管不仅具有生理刺激, 且存在机械刺激, 两种刺激会产生相关叠加的效应, 从而产生更加显著的降压效果。

血流限制联合低强度抗阻训练也能促进微血管新生。谭朝文等^[7-8]研究指出, 相比于高强度抗阻运动(8周, 50%~80% 1RM, 5次/周), 血流限制联合抗阻运动(8周, 30%~40%动脉闭塞压)能以更低的运动强度(30%~60% 1RM)对高血压大鼠腓肠肌和心肌微血管密度产生更加显著的干预效果。运动前,

血流限制联合抗阻运动对受试者进行了血流限制,使人体肌肉组织进入局部缺血缺氧状态。在运动过程中,施加抗阻运动会进一步促进肌肉组织缺氧。缺氧通过提高VEGF的表达水平促进毛细血管新生。但上述研究的研究对象是高血压大鼠,研究结果不能直接应用于临床患者。对于血流限制联合抗阻运动,加压力、加压位置、袖带宽度等都是影响血流限制抗阻运动的重要因素,而上述因子在动物模型和人体试验中有着较大的区别。另外,上述动物实验所采取的抗阻运动动作较为单一。单一运动模式会弱化血流剪切应力对微血管内皮细胞的刺激,影响内皮细胞对NO等的生成和释放能力。

综上,血流限制联合抗阻运动是改善高血压患者微血管功能的潜在有效方式。但目前相关研究成果较少且以动物模型为主,临床研究不足,因此尚不能形成有力的定论。基于血流限制联合低强度抗阻运动对高血压患者微血管功能的潜在干预效果以及应用优势,建议相关学者在后续的研究中重点探讨该运动模式对患者微血管功能的影响。

1.2 运动强度对高血压患者微血管功能的影响

由于在运动过程中可能存在急性心血管反应(如血压短暂性升高),因此应谨慎设计高血压患者的运动强度。目前,有氧运动的强度主要有55%~65%最大心率^[11]、65%~80%最大心率^[24]、基础心率+50%~70%心率储备^[21]、170-心率^[25]等。上述运动强度均被证实能显著改善高血压患者微血管功能。但对于不同病情或年龄的患者,建议采取更具针对性的运动强度。上述运动强度中,其心率区间从大到小依次为65%~80%最大心率、55%~65%最大心率、170-心率、基础心率+50%~70%心率储备。对于中度、高度高血压患者或老龄患者,建议采取170-心率、基础心率+50%~70%心率储备等相对温和的运动强度,避免因运动强度过大造成安全隐患。对于轻度或年轻患者,可采取65%~80%最大心率、55%~65%最大心率等运动强度,以强化运动干预效果。

但随着运动强度的进一步增大,即使是有氧运动强度可能也会对微血管功能产生负面影响。叶芳等^[9]研究指出,8周中等强度跑台运动(18~20 m/min)能通过降低氧化应激水平提高大鼠微血管内皮依赖性舒张功能,但高强度跑台运动(26~28 m/min)可上

调氧化应激水平,加剧微血管内皮功能紊乱。刘国纯等^[10]得出相似结论,14周中等强度运动(5次/周,60 min/次,20 m/min,约人类50%最大摄氧量)通过AMPK-SIRT3通路提高高血压大鼠内皮依赖性血管舒张功能,而高强度运动(26 m/min,约人类65%最大摄氧量)则产生相反的效应。以上研究均揭示,运动强度较大则会加剧微血管功能障碍。由此可见,运动对高血压患者微血管功能的干预效果与运动强度有关。当运动强度过大时,血流产生的振荡型剪切应力比例会增加。振荡型剪切应力会损伤内皮细胞结构,使其失去生成NO等血管因子的结构基础。此外,较大的运动强度会提高患者的氧化应激反应,继而进一步损伤内皮细胞功能。因此,在设置递增强度的有氧运动时,应根据患者的运动耐受能力、心肺功能等水平严格控制运动强度的上限。

对于抗阻运动,相关研究的运动强度主要为30%~60% 1RM^[7-8]、50%~70% 1RM^[27]、50%~80% 1RM^[7-8]等。但有研究指出,进行65% 1RM阻力训练,会提高高血压患者体内的氧化应激水平,加重血管内皮功能障碍^[36]。不同的研究结果可能与患者的身体机能状态有关。即使是相同的运动强度,但当患者运动耐受能力下降时,这会使患者处于无氧状态,使自由基大量产生并损伤内皮细胞功能。因此,在制定高血压患者抗阻运动强度时,不仅要考虑运动强度的大小,而且要关注患者骨骼肌等组织的运动耐受能力。另外,对于血流限制联合抗阻运动,30% 1RM的抗阻运动强度便能显著改善患者微血管功能。该结论也得到了多位学者的证实,马晓缓^[37]、董新春^[35]、CEZAR^[38]、ZHAO^[34]等多位学者均证实,血流限制下30% 1RM的抗阻运动能显著降低高血压患者血压,且效果优于传统高强度抗阻运动。

综合考量抗阻运动的安全性和有效性,建议运动强度不超过65% 1RM。如采取血流限制联合抗阻运动,运动强度可降低为30% 1RM(采取70%~80%的动脉闭塞压)。但在血流限制训练抗阻运动过程中要关注患者的不良反应。血流限制抗阻训练可能会造成受试者肌肉酸痛、疼痛等不良反应,影响运动依从性。针对这一问题,可监控患者在运动期间的心率波动、收缩压波动、Borg呼吸困难评分等指标的变化(抗阻运动的安全监控指标),以确保运动的安全性^[39-40]。

1.3 运动时间、频率及运动周期对高血压患者微血管功能的影响

对于高血压患者的运动时间、临床研究和动物研究存在差异。对于高血压患者,运动时间主要介于40~60 min/次^[11-13,21-24,30-31]。而在动物实验中,运动时间介于60~120 min/次^[14-15,22]。相比于高血压动物模型,高血压患者的病情更为复杂,往往是遗传、饮食、环境等多种因素共同所致。另外,高血压患者可能还具有糖尿病、动脉硬化等基础疾病,其整体健康水平、运动耐受能力等弱于高血压动物模型。因此,基于对患者运动耐受能力、疲劳消除速率以及运动安全等因素综合考量,建议高血压患者单次运动时间不超过60 min/次。

对于有氧运动频率,相关研究主要为3~5次/周^[11,13-14,17,21,23-24],但也有部分研究为6~7次/周^[15,22,25]。综合考量干预效果的有效性和患者身体机能的恢复速度,建议高血压患者每周的有氧运动维持在3~5次。另外,对于抗阻运动频率,相关研究主要为2~5次/周^[7-8,27-31]。抗阻运动的干预效应不仅体现在微血管功能方面,而且对骨骼肌有特异性的干预效果。对于高血压患者尤其是老年患者,肌肉量流失是普遍现象,其不仅会降低老年人日常生活能力,而且会进一步加重高血压症状。权雅文^[41]指出,老年肌少症与高血压之间存在显著相关性,同时肌少型肥胖可进一步提高患高血压的风险。一项针对949名老年人的研究,发现在老年人群中更强的下肢肌肉力量和更低的高血压发病风险独立相关^[42]。以上研究提示,提高骨骼肌功能是改善高血压患者微血管舒张功能和血压的重要干预目标。基于这一目标,建议高血压患者每周保持2次以上的抗阻运动(间隔2~3天或隔天进行)。

对于运动周期,8~12周的有氧运动(单一项目)^[11,13-15,17,21-24]或抗阻运动^[7-8,27-29]均能显著改善高血压患者微血管功能。但随着干预时间的延长,运动干预效果是否更好尚不明确。因此,运动对高血压患者微血管功能的“时间-剂量”效应关系有待于进一步研究明确。基于现有的研究成果,建议后续研究探讨小于8~12周、8~12周、大于8~12周等运动周期对高血压患者微血管功能的干预效果,并对干预效果进行对比。

2 运动改善高血压患者微血管功能的潜在机制

2.1 调节血管舒缩和血管增生因子表达

NO是一种气体血管扩张剂,能介导血管产生强

烈的舒张反应。内源性NO生成能力下降是导致微血管舒张功能降低的关键原因。动脉闭塞后反应性充血(post-occlusive reactive hyperaemia, PORH)、局部皮肤热刺激等是评价微血管内皮依赖性舒张功能的常用方法^[43-44]。虽然两种方式的作用机制有所差异,但内源性NO都起到了重要作用。在局部皮肤热刺激中,加热使交感神经兴奋,引起去甲肾上腺素等神经递质释放,后者与内源性受体结合后能提高NO合成酶的活性,促进内源性NO生成^[20]。在PORH中,当被压迫的血管恢复通血后,血流量明显增大。在高血流剪切应力的刺激下,内皮细胞释放大量的NO。

除NO外,ET-1也是导致微血管舒张功能降低的重要因素。ET-1是强效的血管收缩因子,能引起血管产生强烈的收缩反应。有研究指出,ET-1每升高1 pg/mL,收缩压可能增加1 mmHg,高血压患者ET-1水平可达正常人的两倍^[26]。由此可见,ET-1所产生的缩血管效应会对血管外周阻力产生重要影响,并介导血压的升高。NO和ET-1的动态平衡在维持正常的血管内皮细胞功能中发挥重要作用。ET-1通过其受体能促进NO的释放,而NO则经GMP途径抑制ET-1产生,从而使ET-1与NO的合成和释放处于动态平衡^[45]。运动能通过调控高血压患者NO、ET-1因子水平改善微血管功能。胡庆华等^[11]研究得出,12周24式太极拳运动能促进中老年1级高血压患者内源性NO的生成,提高微血管舒张功能。蔡增博等^[12]研究发现,3个月有氧运动能显著降低中青年高血压病人ET-1水平,并提高NO、内皮型一氧化氮合酶(endothelial nitric oxide synthase, eNOS)水平。动物实验也表明长期有氧运动能提高高血压大鼠eNOS的表达水平,促进NO生成^[10,14]。此外,抗阻运动和血流限制联合抗阻运动也能调控eNOS、ET-1的表达,但联合干预效果更佳^[7-8]。

运动促进内源性NO的生成主要与血流剪切应力有关。血流速度是影响血流剪切应力的关键因素。运动会使血流速度增大,继而使内皮细胞表面血流剪切应力随之增大。内皮细胞能通过膜受体感知血流动力学和血源性信号的变化,然后通过PI3K/Akt与MEK-ERK1/2等通路促使内源性NO产生,同时抑制ET-1的释放^[46]。相比于单纯的抗阻或有氧运动,血流限制联合抗阻运动过程中的“缺血-再灌注”现象能产生更大的血流剪切应力,促使内皮细胞释放更

高剂量的NO。此外,血流限制联合抗阻运动产生的代谢物质的舒血管效应、血管肌源性反应等也能进一步促进内源性NO的产生。当扩散至邻近的血管平滑肌以后,NO会激活平滑肌可溶性鸟氨酸活化酶,并催化生成环磷酸鸟苷(cyclic guanosine monophosphate, cGMP)。cGMP能够激活环鸟苷酸依赖的蛋白激酶G(protein kinase G, PKG)。PKG通过活化细胞膜上钾通道,然后通过磷酸化肌质网上的受磷蛋白和三磷酸肌醇受体相关的PKG-I底物等途径降低细胞内Ca²⁺浓度,使肌球蛋白轻链激酶失活,导致肌球蛋白和肌动蛋白的结合力下降,横桥解离,引起平滑肌细胞舒张。综上,运动干预可通过增大血流剪切应力,提高内皮细胞的NO生成能力,继而提高微血管舒张功能。

除NO、ET-1外,VEGF也是影响高血压患者微血管功能的重要血管因子。高血压患者体内的微血管稀疏现象与VEGF、血管内皮生长因子受体-2等表达异常有关^[47]。运动能通过提高高血压患者VEGF的表达水平,促进毛细血管新生,提高微血管密度。GLIEMANN等^[13]研究指出,8周有氧运动能调节高血压患者VEGF、血管内皮生长因子受体-2的表达,促进骨骼肌毛细血管新生。张昆茹等^[14]研究发现,8周无负重游泳运动通过增加VEGF及eNOS的表达水平及上调PI3K/Akt信号通路提高幼年自发性高血压大鼠骨骼肌微血管数量。姜娜^[15]的动物实验也得出相似结论,8周游泳训练通过调节比目鱼肌VEGF、PI3K、Akt等蛋白表达水平改善比目鱼肌微血管稀少的现象。FERNANDES等^[29]也得出有氧运动能通过提高自发性高血压大鼠VEGF和NO水平改善毛细血管稀疏。此外,抗阻运动和血流限制联合抗阻运动也能通过调控VEGF的表达促进外周微血管的生成,但血流限制联合抗阻运动的干预效果更好^[17-8]。这是因血流限制联合抗阻运动能造成更深的缺氧刺激,显著促进缺氧诱导因子的表达。缺氧诱导因子能激活VEGF基因的转录,从而促进VEGF表达。

综上,长期规律性的运动能通过调控VEGF、eNOS、ET-1等血管因子的表达,减轻高血压诱导的微血管功能障碍。

2.2 调节脂肪代谢因子水平

脂肪代谢因子水平异常是导致血管损伤、硬化的重要原因。如氧化性低密度脂蛋白能直接损伤血

管内皮细胞,抑制NO的释放,导致微血管舒张功能下降。有研究指出,甘油三酯(triglyceride, TG)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)等指标升高是导致高血压患者血管增生、硬化的危险因素^[48]。杨爽等^[49]研究发现,血清同型半胱氨酸、LDL-C等与老年高血压患者外周血管阻力密切相关。李榕等^[50]进一步研究发现,高血脂通过氧化/硝基化作用使血管内皮依赖式舒张功能显著下降。以上研究提示,血脂水平异常是导致血管舒张功能下降的重要原因。运动干预能有效调节高血压患者血脂水平。徐美琪等^[51]研究指出,太极拳等传统养生运动和现代有氧运动均能显著调节高血压患者TC、TG、LDL-C水平,但前者干预效果更好。抗阻运动也能有效降低高血压患者TC、TG、LDL-C水平^[52]。在抗阻运动基础上联合有氧运动对高血压患者血压和血脂水平的干预效果均优于单一的抗阻运动^[53]。但也有研究指出,有氧运动和抗阻运动对高血压患者TC、TG、LDL-C的干预效果无显著差异^[54]。由此可见,不同运动方式均能有效调控高血压患者血脂水平,但干预效果是否存在差异尚存在争议。

脂肪所分泌的脂联素(adiponectin, APN)也是运动调控高血压患者微血管功能的重要因素。APN是由脂肪细胞合成和分泌的细胞因子,具有胰岛素增敏、抗动脉粥样硬化和抗炎特性的脂肪因子。有研究指出,APN与内皮依赖性血管舒张功能呈独立正相关,低APN血症使内皮依赖性血管扩张功能明显受损^[55]。低APN血症还能通过抑制胰岛素Akt-eNOS-NO信号通路以及促进ERK1/2-ET-1信号通路使微血管舒张功能下降^[56]。此外,还有研究指出APN通过mRNA稳定性、eNOS丝氨酸位点(Ser1179)磷酸化等途径参与eNOS活性的调节,进而影响微血管内皮依赖性舒张功能^[24]。因此,提高高血压患者APN水平能促进内源性NO的产生,进而改善微血管内皮依赖性舒张功能。

长期运动干预能提高高血压患者ANP水平。PASQUALIN等^[24]研究发现,8周步行结合自行车运动能改善1级高血压患者微血管内皮依赖性血管舒张功能和升高APN水平,且两者存在正相关关系。动物实验表明,8周无负重游泳运动能提高高血压大鼠血清APN含量和活性,并降低ET-1含量,对预防和降低高血压具有积极的作用^[57]。相比于单一的有氧

运动(健步走), 有氧联合抗阻运动对受试者 APN 水平和血管内皮舒张功能的干预效果更好^[58]。此外, 陶云飞等^[59]研究发现, 抗阻运动和血流限制联合抗阻运动均能有效调控青年男性肥胖者瘦素/APN 水平, 但联合运动组的干预效果更好。其原因可能是血流限制联合抗阻训练能更好地调控机体能量代谢水平、炎症反应及交感神经功能, 而这些变化能进一步促进 APN 的释放。以上研究表明, 不同运动方式均能调控高血压患者 APN 水平, 而 ANP 可能通过调控 Akt-eNOS-NO、ERK1/2-ET-1 等信号以及促进 eNOS 丝氨酸位点 (Ser1179) 磷酸化等途径提高 eNOS 活性, 促进内源性 NO 的产生, 进而提高微血管舒张功能。

2.3 调节自主神经系统功能

交感神经和副交感神经功能对血管舒缩能力有着重要的影响。交感神经通过释放肾上腺素、去甲肾上腺素等神经递质使血管收缩。同时, 交感神经过度激活能通过神经体质抑制血管内皮细胞合成 NO, 加重高血压患者内皮功能障碍^[60]。此外, 交感神经的异常激活还能通过免疫系统、体液代谢等途径介导血压升高及相关靶器官损害^[61]。副交感神经则通过释放乙酰胆碱使血管舒张。两者功能失衡会使微血管出现舒缩功能障碍, 成为诱发高血压的重要因素^[62]。长期规律性的运动能有效调控高血压患者自主神经功能。HERRERA 等^[22]研究发现, 8 周有氧运动通过调节自主神经功能等途径改善骨骼肌微循环功能。付嘉豪等^[63]研究发现, 12 周太极拳运动和健美操运动均能改善原发性高血压患者自主神经系统功能。王京峰等^[64]的荟萃分析指出, 有氧运动能有效改善高血压患者交感神经系统功能, 且间歇有氧运动的干预效果更显著。相比于单一的有氧运动或抗阻运动, 有氧联合抗阻运动对高血压患者自主神经功能的干预效果更好^[65]。张胜利^[66]得出类似结论, 12 周有氧运动和有氧运动联合抗阻运动有助于改善原发性高血压患者的自主神经功能, 但后者干预效果更佳。以上研究表明, 不同运动方式均能有效改善高血压患者自主神经功能, 但有氧联合抗阻运动的干预效果更好。

综上所述, 长期规律性的运动可能通过调节血管舒缩和增生因子、脂肪代谢因子和自主神经系统功能等改善高血压患者微血管功能。在这个过程中, 调控微血管内皮细胞对 NO 的生成可能是上述机制

共同的作用路径。建议后续研究进一步探讨 NO 在不同机制路径中的具体作用, 深入揭示运动改善高血压患者微血管功能的机制。

3 研究不足和研究展望

3.1 微血管功能的评价指标存在局限性

目前, 相关研究主要通过微血管舒张功能和微血管密度评价高血压患者微血管功能, 鲜有研究关注患者微血管血流氧合状态的变化。在体力活动过程中, 肌肉组织的氧合水平是影响运动耐受能力的关键因素。微血管舒张功能和微血管密度只能间接反映肌细胞氧合水平, 并不能直接代表微血管向肌细胞等输送氧气的的能力。由于高血压患者存在微血管内皮功能和血流动力学障碍, 运动中肌细胞可能存在供氧障碍。SCHULZE 等^[67]研究发现, 与健康大鼠相比, 肺动脉高压大鼠出现微循环血流动力学障碍, 骨骼肌整体氧气含量和运动耐受能力显著下降。DIMOPOULOS 等^[68]也发现, 肺动脉高压患者外周肌肉微循环功能明显受损, 组织氧饱和度降低, 反应性充血时间减慢。此外, 红细胞流变特性的变化也对高血压患者供氧能力产生明显影响。氧化应激、NO 生物可用性下降会降低高血压患者红细胞的变形能力, 使血流速度下降, 进而降低微血管向肌细胞的供氧能力。有研究显示, 高血压患者血液流动有显著的瘀堵现象, 流速显著变慢, 其红细胞的变形性和聚集性较健康者均有显著变化^[69]。

综上, 由于微血管功能障碍和血流流变学异常, 高血压患者肌细胞可能存在供氧障碍, 导致氧合水平下降。另外, 由于运动后的疲劳消除与肌细胞的氧合水平也有着密切的关系, 因此高血压患者在运动后可能存在疲劳消除慢、耗时久等特点。上述变化会严重影响高血压患者从事运动或体力活动的能力, 并与高血压之间形成恶性循环。目前, 基于近红外光谱的肌氧饱和度监测技术是监测肌肉氧合状态的常用手段, 其能敏感、实时反映出安静状态下肌细胞的供氧水平的变化。近年来, 作者团队采用微血管反应性、经皮氧分压及肌氧饱和度等指标联合评估人体微血管功能。该指标体系从微血管血流动力学、血流氧合状态两个方面对人体微血管功能进行评价, 已在 2 型糖尿病^[70]、肥胖人群^[71-72]、运动员^[45]等人群中推广应用。因此, 建议在微血管舒张功能和血管密度的基础上, 将肌氧饱和度作为评价高血

压患者微血管功能的新指标。

3.2 微血管功能的评价方式存在局限性

目前,多数研究主要通过观察安静或静息状态下患者的血流灌注量反映微血管功能的变化。但当患者病情较轻或者处于患病的初始阶段时,静息微血管可能并未表现出明显的功能障碍。由于人体多数时间处于活动状态,因此静息状态下微血管功能的大小不能全面反映微血管功能的变化。多项研究显示,运动性高血压与高血压疾病(尤其是隐匿性高血压)的发生、心血管疾病的发生风险有着密切关系,其在预测高血压发生风险和识别隐匿性高血压等方面具有优势^[73-76]。由于微血管功能障碍是诱导高血压发生的关键因素,因此运动性高血压的发生可能与微血管功能障碍有直接关联。针对这一问题,有学者提出将运动性微血管功能障碍作为评价高血压患者微血管功能的新方式^[5]。

在相同的运动负荷刺激下,高血压患者骨骼肌的微血管血流量的增幅也显著降低(相对于健康人群)^[77]。另外,动物实验得出相似结论,肺动脉高压大鼠运动时骨骼肌的血流量相对于功率输出明显降低(相比于健康大鼠),且血浆乳酸水平明显升高^[67]。该研究提示,肺动脉高压患者存在外周肌肉功能障碍,且运动耐受性下降。微血管反应性下降还会增大高血压患者在运动时的血压升高幅度。DIPLA等^[78]研究表明,大强度运动时为达到与正常血压者相似的肌肉氧合水平,高血压患者需要更大的血压升高幅度。因此,建议将运动状态下微血管血流量的增幅作为评价高血压患者微血管功能的重要方式,并将其作为评价轻度高血压患者微血管功能障碍的补充方式。

3.3 运动方式单一且缺乏干预效果对比

目前,相关研究主要探讨有氧运动和抗阻运动对高血压患者微血管功能的影响,但缺乏两种运动方式干预效果的对比,影响患者对最佳运动方式的选择。同时,多项研究指出,有氧联合抗阻运动对高血压患者的血压调节作用优于单一的抗阻或有氧运动^[66,79,81]。由此推测,有氧联合抗阻运动可能是改善高血压患者微血管功能更加有效的方式。但目前有关有氧联合抗阻运动对高血压患者微血管功能的干预研究较少,建议后续研究重点探讨有氧联合抗阻运动对高血压患者微血管功能的干预效果。但在抗阻运动部分,建议后续研究将安全性更高的抗阻

运动模式(如渐进强度的弹力带抗阻运动模式)应用到高血压患者微血管功能的干预研究中,以丰富运动干预方式。另外,作为一种新型运动模式,血流限制训练在心血管疾病康复领域展现出潜在的应用前景。该运动模式能对微血管功能产生针对性和特异性的干预效果,同时还兼具运动强度小、运动损伤风险低等优点。因此,血流限制训练可能是改善高血压患者更为有效的运动模式。但出于加压设备、训练技术、运动安全性、依从性等因素的考量,目前血流限制训练在高血压患者中的应用较少,因此该运动模式能否在高血压患者中推广应用仍需更多的研究进行支撑。此外,高强度间歇性运动作为一种具有“省时高效”特点的运动方式,也被应用于高血压患者的运动干预,并显示出积极的降压效果。但目前尚未发现有关该运动方式对高血压患者微血管功能的干预研究^[81-82]。

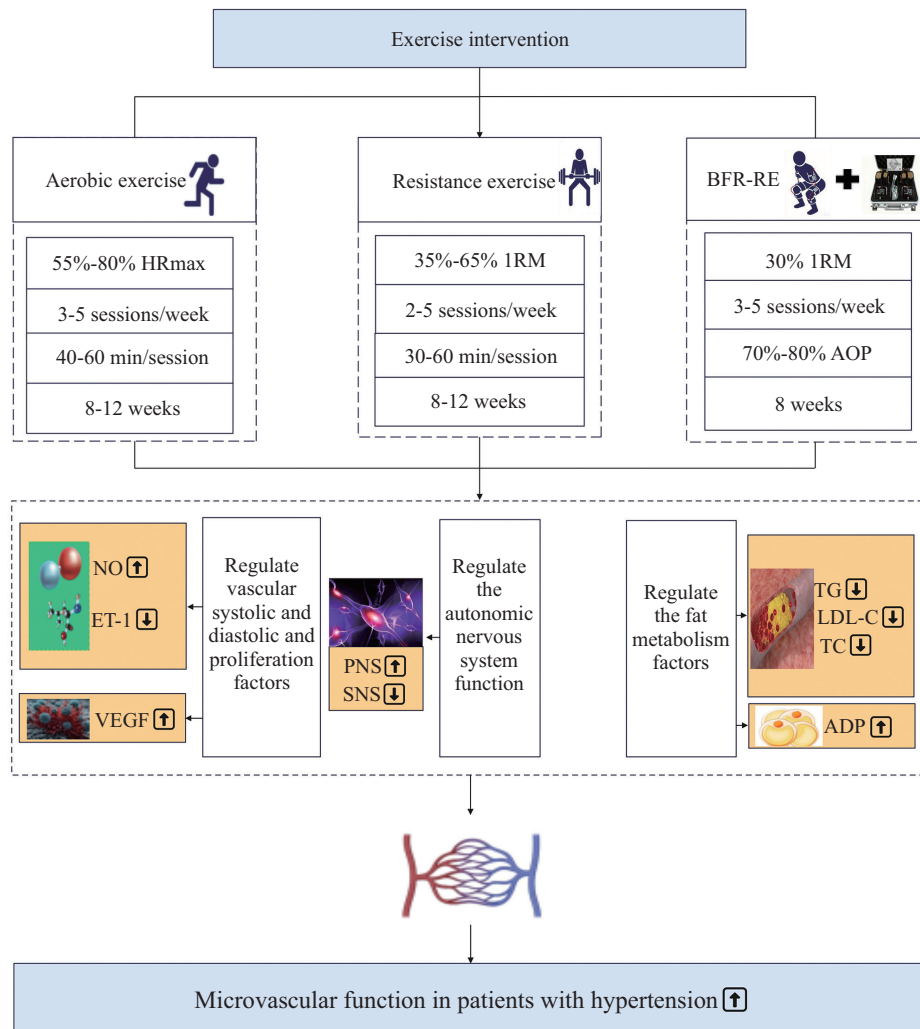
综上,建议后续研究重点探讨有氧联合抗阻训练、血流限制运动、高强度间歇性等运动模式对高血压患者微血管功能的干预效果(图1),为患者提供更有效、更具针对性的运动方案参考。另外,现有的研究主要以1级(轻度)高血压患者为研究对象,少有研究探讨运动对2级和3级患者的干预效果。因此,未来还需探讨不同运动模式对2级和3级高血压患者微血管功能的干预效果。

4 结论与建议

长期规律性的中低强度的有氧运动、抗阻运动及血流限制抗阻运动均能显著改善高血压患者微血管功能。另外,调节血管舒缩和血管增生因子、脂肪代谢因子水平以及自主神经系统功能。微血管功能评价指标和评价方式不足、运动方式单一且缺乏干预效果对比、干预对象病情单一等是目前相关研究存在的主要问题。针对这些问题,建议后续研究从肌氧饱和度、运动状态下微血管功能的变化两个方面强化微血管功能的评价,并重点以2级和3级高血压患者为研究对象,深入探讨有氧联合抗阻运动、血流限制训练、高强度间歇等运动模式的干预效果,并比较不同运动方式的干预效果。

参考文献 (References)

- [1] DURANTE A, MAZZAPICCHI A, BAIARDO REDAELLI M. Systemic and cardiac microvascular dysfunction in hypertension



仅根据现有的相关研究成果推荐以上训练方案,对于最佳的训练方案还需更多的研究。

The above training program is recommended based only on existing related research findings, and more researches are needed to determine the optimal training program.

图1 运动对高血压患者微血管功能的干预效果及潜在机制

Fig.1 Effects of exercise on microvascular function in hypertensive patients and potential mechanisms

- [J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(24): 13294-309.
- [2] 张鑫月, 贾振华, 常丽萍. 高血压微血管发病机制研究进展[J]. *中华高血压杂志*(ZHANG X Y, JIA Z H, CHANG L P. Research progress on pathogenesis of microvasculature in hypertension [J]. *Chinese Journal of Hypertension*), 2014, 22(8): 718-22.
- [3] 吕玲春, 沈珈谊, 韦铁民. 高血压与微循环障碍相关性的研究进展[J]. *温州医科大学学报*(LYU L C, SHEN J Y, WEI T M. Research progress on correlation between hypertension and microcirculation disturbance [J]. *Journal of Wenzhou Medical University*), 2021, 51(11): 933-7.
- [4] 赵莉, 李荣硕, 汤江江, 等. 微循环障碍可能是单纯舒张期高血压的始动因素和核心环节[J/OL]. *空军军医大学学报*, 1-7. [2025-12-08]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1526.R.20251105.1722.004>.
- [5] 王成科, 朱欢, 董微微, 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*(WANG C K, ZHU H, DONG H H, et al. Research progress on intervention effect and possible mechanism of exercise on microvascular reactivity in patients with hypertension [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*), 2021, 22(9): 726-31.
- [6] TRIANTAFYLLOU G A, DIPLA K, TRIANTAFYLLOU A, et al. Measurement and changes in cerebral oxygenation and blood flow at rest and during exercise in normotensive and hypertensive individuals [J]. *Curr Hypertens Rep*, 2020, 22(9): 71-81.
- [7] TAN Z W, ZHAO Y, ZHENG Y C, et al. The effect of blood flow-restricted low resistance training on microvascular circulation of myocardium in spontaneously hypertensive rats [J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 829718-29.
- [8] 谭朝文, 赵彦, 朱浩, 等. 血流限制抗阻训练对早期自发性高血压大鼠外周微血管稀疏的影响[J]. *中国体育科技*(TAN C W, ZHAO Y, ZHU H, et al. Effect of blood flow restricted resistance training on peripheral microvascular rarefaction in early spontaneously hypertensive rats [J]. *China Sport Science and Technology*), 2025, 61(9): 34-45.

- [9] 叶芳, 柏平, 曾凡星, 等. 不同强度运动对自发性高血压大鼠血管内皮结构及功能影响的氧化应激机制[J]. 体育科学(YE F, BAI P, ZENG F X, et al. Oxidative stress mechanism of different intensity exercise on vascular endothelial structure and function in spontaneously hypertensive rats [J]. *China Sport Science*), 2016, 36(12): 58-66.
- [10] 刘国纯, 常青, 罗梦婷, 等. 不同强度运动调控AMPK-SIRT3通路对自发性高血压大鼠血管功能的影响[J]. 中国康复医学杂志(LIU G C, CHANG Q, LUO M T, et al. Effect of different intensity exercise regulating AMPK-SIRT3 pathway on vascular function in spontaneously hypertensive rats [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*), 2022, 37(8): 1030-8.
- [11] 胡庆华, 乾佑玲, 刘晓丽, 等. 12周太极拳运动对中老年轻度高血压患者微血管反应性的影响及机制[J]. 中国应用生理学杂志(HU Q H, QIAN Y L, LIU X L, et al. Effect and mechanism of 12-week Tai Chi exercise on microvascular reactivity in middle-aged and elderly patients with mild hypertension [J]. *Chinese Journal of Applied Physiology*), 2021, 37(6): 683-7.
- [12] 蔡增博, 石影, 孟晓敏. 有氧运动干预对中青年高血压病人血管内皮功能及血压波动性的影响[J]. 中西医结合心脑血管病杂志(CAI Z B, SHI Y, MENG X M. Effect of aerobic exercise intervention on vascular endothelial function and blood pressure variability in middle-aged and young hypertensive patients [J]. *Chinese Journal of Integrative Medicine on Cardio-Cerebrovascular Disease*), 2026, 24(3): 418-23.
- [13] GLIEMANN L, BUCESS R, NYBERG M, et al. Capillary growth, ultrastructure remodelling and exercise training in skeletal muscle of essential hypertensive patients [J]. *Acta Physiol*, 2015, 214(2): 210-20.
- [14] 张昆茹, 屈爱静, 杜丽. 游泳运动改善幼年自发性高血压大鼠腓肠肌微血管稀少的作用及机制[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版)(ZHANG K R, QU A J, DU L. Effect and mechanism of swimming exercise on improving gastrocnemius microvascular rarefaction in young spontaneously hypertensive rats [J]. *Journal of Shaanxi Normal University, Natural Science Edition*), 2017, 45(3): 119-224.
- [15] 姜娜. 有氧运动改善高血压大鼠比目鱼肌微血管稀少的作用及机制[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [16] 童成成, 贺常萍. 有氧运动和抗阻运动治疗原发性高血压的机制[J]. 中华高血压杂志(TONG C C, HE C P. Mechanisms of aerobic exercise and resistance exercise in the treatment of essential hypertension [J]. *Chinese Journal of Hypertension*), 2018, 26(11): 1084-9.
- [17] YUAN L Y, DU P Z, WEI M M, et al. Aerobic exercise attenuates pressure overload-induced cardiac dysfunction through promoting skeletal muscle microcirculation and increasing muscle mass [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2021, 2021: 8279369-79.
- [18] TSIIOUFIS C, DIMITRIADIS K, KATSIKI N, et al. Microcirculation in hypertension: an update on clinical significance and therapy [J]. *Curr Vasc Pharmacol*, 2015, 13(3): 413-7.
- [19] LIATAKIS I, DIMITRIADIS K, MANTA E, et al. The relationship between blood pressure and heart rate response during exercise testing with microcirculation indices [J]. *High Blood Press Cardiovasc Prev*, 2025, 32(2): 217-22.
- [20] 宋丹丹, 李玉珍, 郭渝成, 等. 健康国人皮肤温度、血流灌注量及局部加热效应[J]. 微循环学杂志(SONG D D, LI Y Z, GUO Y C, et al. Skin temperature, blood perfusion volume and local heating effect in healthy Chinese people [J]. *Chinese Journal of Microcirculation*), 2013, 23(3): 28-30,79,83.
- [21] HURLEY D M, WILLIAMS E R, CROSS J M, et al. Aerobic exercise improves microvascular function in older adults [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2019, 51(4): 773-81.
- [22] HERRERA N A, JESUS I, SHINOHARA A L, et al. Exercise training attenuates dexamethasone-induced hypertension by improving autonomic balance to the heart, sympathetic vascular modulation and skeletal muscle microcirculation [J]. *J Hypertens*, 2016, 34(10): 1967-76.
- [23] LIANG J, ZHANG X, XIA W, et al. Promotion of aerobic exercise induced angiogenesis is associated with decline in blood pressure in hypertension: result of EXCAVATION-CHN1 [J]. *Hypertension*, 2021, 77(4): 1141-53.
- [24] PASQUALINI L, SCHILLACI G, INNOCENTE S, et al. Lifestyle intervention improves microvascular reactivity and increases serum adiponectin in overweight hypertensive patients [J]. *Nutr Metab Cardiovasc*, 2010, 20(2): 87-92.
- [25] 宋丹丹, 朱秀勤, 师兰香, 等. 护理干预对原发性高血压患者甲襞微循环的影响[J]. 转化医学杂志(SONG D D, ZHU X Q, SHI L X, et al. Effect of nursing intervention on nail fold microcirculation in patients with essential hypertension [J]. *Journal of Translational Medicine*), 2015, 4(5): 285-9.
- [26] LI H, LIN X, LI X, et al. Effects of six Chinese mind-body exercise therapies on glycolipid metabolism and vascular endothelial function in hypertensive patients [J]. *iScience*, 2025, 28(6): 112682-99.
- [27] 李文雅, 刘博韬, 苗天杰, 等. 中强度抗阻运动指导联合阿托伐他汀对高血压合并冠心病患者心率储备及外周血管阻力的影响[J]. 现代医药卫生(LI W Y, LIU B T, MIAO T J, et al. Effect of moderate-intensity resistance exercise guidance combined with atorvastatin on heart rate reserve and peripheral vascular resistance in patients with hypertension complicated with coronary heart disease [J]. *Journal of Modern Medicine & Health*), 2025, 41(10): 2310-5.
- [28] BANKS N F, ROGERS E M, STANHEWICZ A E, et al. Resistance exercise lowers blood pressure and improves vascular endothelial function in individuals with elevated blood pressure or stage-1 hypertension [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2024, 326(1): H256-69.
- [29] FERNANDES T, NAKAMUTA J S, MAGALHÃES F C, et al. Exercise training restores the endothelial progenitor cells number and function in hypertension: implications for angiogenesis [J]. *J Hypertens*, 2012, 30(11): 2133-43.
- [30] LIANG J, WEI W, XIA W, et al. Effect of exercise on improving microvascular rarefaction in patients with hypertension: primary results of EXCAVATION-CHN1 [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 73(9S1): 1860.
- [31] LIANG J, XIA W, TONG X, et al. Moderate intensity exercise attenuates hypertensive microvascular rarefaction through enhancing the function of endothelial progenitor cells [J]. *J Amer Coll Cardiol*, 2019, 73(9S1): 2090.
- [32] 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(PENG Y, HU J P, ZHU H. Effect of low-load blood flow restriction and high-intensity resistance exercise on thigh microcirculation

- tion function in young male athletes [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2025, 29(2): 393-401.
- [33] LOPES K G, BOTTINO D A, FARINATTI P, et al. Strength training with blood flow restriction: a novel therapeutic approach for older adults with sarcopenia? A case report [J]. *Clin Interv Aging*, 2019, 14: 1461-9.
- [34] ZHAO Y, ZHENG Y, MA X, et al. Low-intensity resistance exercise combined with blood flow restriction is more conducive to regulate blood pressure and autonomic nervous system in hypertension patients-compared with high-intensity and low-intensity resistance exercise [J]. *Front Physiol*, 2022, 13: 833809-17.
- [35] 董新春, 黄志祥. 体医融合背景下血流限制训练对原发性高血压的影响[C]//中国体育科学学会. 第五届全民健身科学大会论文摘要集(DONG X C, HUANG Z X. Effect of blood flow restriction training on essential hypertension under the background of integration of sports and medicine [C]//China Sport Science Society. Abstracts of the 5th National Science Congress on Fitness for All), 2024: 210-1.
- [36] SPRANGER M D, KRISHNAN A C, LEVY P D, et al. Blood flow restriction training and the exercise pressor reflex: a call for concern [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2015, 309(9): H1440-52.
- [37] 马晓缓, 赵彦, 郑玉婵. 加压训练对高血压患者血管内皮功能的影响[J]. *湖北体育科技*(MA X H, ZHAO Y, ZHENG Y C. Effect of compression training on vascular endothelial function in patients with hypertension [J]. *Hubei Sports Science*), 2021, 40(4): 341-4,354.
- [38] CEZAR M A, DESÁ C A, CORRALO V S, et al. Effects of exercise training with blood flow restriction on blood pressure in medicated hypertensive patients [J]. *Motriz*, 2016, 22(2): 9-17.
- [39] 顾一帆, 吴茜, 汪夏云, 等. 早期床上抗阻运动对胃肠道肿瘤患者术后康复护理的影响[J]. *中华护理杂志*(GU Y F, WU Q, WANG X Y, et al. Effect of early in-bed resistance exercise on postoperative rehabilitation nursing in patients with gastrointestinal tumors [J]. *Chinese Journal of Nursing*), 2023, 58(12): 1462-8.
- [40] 成人肺高血压患者运动康复中国专家共识[J]. *中国介入心脏病学杂志*(Chinese expert consensus on exercise rehabilitation for adult patients with pulmonary hypertension [J]. *Chinese Journal of Interventional Cardiology*), 2021, 29(8): 421-32.
- [41] 权雅文. 老年肌少症与高血压相关性的荟萃分析[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2024.
- [42] LUO W, ZHANG Y, LIU X, et al. Association between health-related physical fitness and incident hypertension among the elderly in Wuhan: a seven-year cohort study [J]. *BMC Public Health*, 2025, 27: 44.
- [43] 唐元梁, 李桂香, 姚立平, 等. 皮肤微血管调节功能无创检测技术进展[J]. *中国医疗设备*(TANG Y L, LI G X, YAO L P, et al. Advances in non-invasive detection techniques for cutaneous microvascular regulation function [J]. *China Medical Equipment*), 2022, 37(6): 153-7.
- [44] 徐菲菲, 郭渝成, 刘秀华. 皮肤微血管功能检测的研究进展[J]. *微循环学杂志*(XU F F, GUO Y C, LIU X H. Research progress in detection of skin microvascular function [J]. *Chinese Journal of Microcirculation*), 2014, 24(3): 71-6.
- [45] 朱欢. 高压氧干预对国家钢架雪车运动员微循环功能的影响及运动性疲劳消除效果研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2023.
- [46] 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*(LI M, WEN F, FU B L, et al. Research progress on intervention effect and potential mechanism of vertical vibration training on microvascular function in type 2 diabetes mellitus patients [J]. *Chinese Journal of Cell Biology*), 2025, 47(6): 1453-63.
- [47] DE CIUCEIS C, RIZZONI D, PALATINI P. Microcirculation and physical exercise in hypertension [J]. *Hypertension*, 2023, 80(4): 730-9.
- [48] 蔡晓菁. 基于CDFI探究高血压患者颈动脉病变与血脂、血压变异性的关系[J]. *心血管病防治知识*(CAI X J. Exploration on the relationship between carotid artery lesions, blood lipid and blood pressure variability in hypertensive patients based on CDFI [J]. *Chinese Journal of Cardiovascular Prevention and Treatment*), 2023, 13(11): 18-20.
- [49] 杨爽, 白莎, 王恒, 等. 老年高血压患者心功能、外周血管阻力与血清Hcy、血脂水平的相关性研究[J]. *中国循证心血管医学杂志*(YANG S, BAI S, WANG H, et al. Correlation study of cardiac function, peripheral vascular resistance with serum Hcy and blood lipid levels in elderly hypertensive patients [J]. *Chinese Journal of Evidence-Based Cardiovascular Medicine*), 2021, 13(1): 47-50.
- [50] 李榕, 王文清, 张海锋, 等. 高血脂通过氧化/硝基化双重作用介导大鼠血管内皮功能失调[J]. *中国病理生理杂志*(LI R, WANG W Q, ZHANG H F, et al. Hyperlipidemia mediates vascular endothelial dysfunction in rats through dual effects of oxidation/nitration [J]. *Chinese Journal of Pathophysiology*), 2010, 26(8): 1494-7.
- [51] 徐美琪, 李宁川. 中老年高血压患者血脂运动干预的Meta分析[J]. *体育科技文献通报*(XU M Q, LI N C. Meta-analysis of exercise intervention on blood lipid in middle-aged and elderly hypertensive patients [J]. *Bulletin of Sport Science & Technology*), 2022, 30(10): 257-61,265.
- [52] 王锐, 朱航佳, 李万浪, 等. 抗阻运动联合渐进放松训练在老年原发性高血压患者中的效果[J]. *中国老年学杂志*(WANG R, ZHU H J, LI W L, et al. Effect of resistance exercise combined with progressive relaxation training in elderly patients with essential hypertension [J]. *Chinese Journal of Gerontology*), 1652-4.
- [53] 周颖, 李江霞, 牛会康, 等. 不同运动对原发性高血压患者血压及血脂影响的Meta分析[J]. *湖北体育科技*(ZHOU Y, LI J X, NIU H K, et al. Meta-analysis of effects of different exercises on blood pressure and blood lipid in patients with essential hypertension [J]. *Hubei Sports Science*), 2023, 42(8): 709-15.
- [54] 赵兰. 有氧运动和抗阻运动干预原发性高血压低危患者的效果研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [55] 孙慧, 吴永全, 严松彪. 脂联素与血管内皮细胞功能障碍的相关性[J]. *中国动脉硬化杂志*(SUN H, WU Y Q, YAN S B. Correlation between adiponectin and vascular endothelial cell dysfunction [J]. *Chinese Journal of Arteriosclerosis*), 2011, 19(11): 952-6.
- [56] 邢文娟. 长期有氧运动改善阻力血管胰岛素抵抗延缓动脉血压升高及其机制[D]. 西安: 第四军医大学, 2016.
- [57] 殷安平. 运动对SHR大鼠脂联素、胰岛素抵抗及肿瘤坏死因子 α 的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2010.
- [58] 刘一平, 李建卫, 王志红, 等. 24周运动对糖耐量减低者血管内

- 皮舒张功能与脂联素水平的影响[C]//中国体育科学学会. 第九届全国体育科学大会论文摘要汇编(LIU Y P, LI J W, WANG Z H, et al. Effects of 24-week exercise on vascular endothelial diastolic function and adiponectin level in subjects with impaired glucose tolerance [C]//China Sport Science Society. Abstracts of the 9th National Sports Science Congress), 2011: 603.
- [59] 陶云飞. 血流限制抗阻运动对青年男性肥胖者瘦素/脂联素和能量代谢的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2025.
- [60] 孙彩红, 张强, 杨丽红, 等. 原发性高血压患者自主神经功能与血清一氧化氮的相关性[J]. 临床心血管病杂志(SUN C H, ZHANG Q, YANG L H, et al. Correlation between autonomic nervous function and serum nitric oxide in patients with essential hypertension[J]. Journal of Clinical Cardiology), 2018, 34(2): 147-51.
- [61] 吴金峰, 尹新华. 高血压交感神经相关发病机制[J]. 临床与病理杂志(WU J F, YIN X H. Sympathetic nerve-related pathogenesis of hypertension [J]. Journal of Clinical and Pathological Research), 2021, 41(1): 210-5.
- [62] 郭瑛, 孙育民, 黄芳, 等. 自主神经功能与高血压研究进展[J]. 贵州医药(GUO Y, SUN Y M, HUANG F, et al. Research progress of autonomic nervous function and hypertension [J]. Guizhou Medical Journal), 2023, 47(2): 178-9.
- [63] 付嘉豪, 陈在浩, 刘林利, 等. 太极拳与健身操运动对原发性高血压患者自主神经系统的影响[J]. 中华高血压杂志(中英文)(FU J H, CHEN Z H, LIU L L, et al. Effects of Tai Chi and aerobics on autonomic nervous system in patients with essential hypertension [J]. Chinese Journal of Hypertension), 2024, 32(8): 763-71.
- [64] 王京峰, 毛苏杰, 夏帆, 等. 间歇及持续有氧运动对高血压患者自主神经系统影响的荟萃分析[J]. 中华高血压杂志(中英文)(WANG J F, MAO S J, XIA F, et al. Meta-analysis of effects of intermittent and continuous aerobic exercise on autonomic nervous system in hypertensive patients [J]. Chinese Journal of Hypertension), 2026, 34(2): 143-58.
- [65] 王久亮, 郝利霞. 有氧运动和抗阻运动对原发性高血压患者自主神经功能干预效果对比研究[J]. 神经损伤与功能重建(WANG J L, HAO L X. Comparative study on intervention effects of aerobic exercise and resistance exercise on autonomic nervous function in patients with essential hypertension [J]. Neural Injury and Functional Reconstruction), 2016, 11(6): 560-1,568.
- [66] 张胜利. 不同运动方式对原发性高血压患者自主神经功能和血压的影响[J]. 河南医学研究(ZHANG S L. Effects of different exercise modes on autonomic nervous function and blood pressure in patients with essential hypertension [J]. Henan Medical Research), 2019, 28(13): 2363-5.
- [67] SCHULZE K M, WEBER R E, HORN A G, et al. Effects of pulmonary hypertension on microcirculatory hemodynamics in rat skeletal muscle [J]. Microvasc Res, 2022, 141: 104334-56.
- [68] DIMOPOULOS S, TZANIS G, MANETOS C, et al. Peripheral muscle microcirculatory alterations in patients with pulmonary arterial hypertension: a pilot study [J]. Respir Care, 2013, 58(12): 2134-41.
- [69] 熊伟, 刘剑刚, 季颖, 等. 老年高血压患者血液流动性可视化及红细胞流变学特点的临床研究[J]. 中国临床医生杂志(XIONG W, LIU J G, JI Y, et al. Clinical study on blood fluidity visualization and erythrocyte rheology characteristics in elderly hypertensive patients [J]. Chinese Journal of Clinicians), 2020, 48(1): 41-4.
- [70] 彭永, 朱欢, 刘尧峰, 等. 24周太极拳结合弹力带抗阻运动对2型糖尿病患者足背微循环功能的影响[J]. 首都体育学院学报(PENG Y, ZHU H, LIU Y F, et al. Effect of 24-week Tai Chi combined with resistance band exercise on dorsal foot microcirculation function in type 2 diabetes patients [J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports), 2023, 35(1): 77-85.
- [71] 肖哲, 朱欢, 胡江平, 等. 10周有氧运动和有氧结合抗阻运动对肥胖大学生微循环功能的影响及机制研究[J]. 中国全科医学(XIAO Z, ZHU H, HU J P, et al. Effect and mechanism of 10-week aerobic exercise and aerobic combined with resistance exercise on microcirculation function in obese college students [J]. Chinese General Practice), 2022, 25(19): 2349-55,2362.
- [72] YANG R, WAN L, ZHU H, et al. The effect of 12 week-maximum fat oxidation intensity (FATmax) exercise on microvascular function in obese patients with nonalcoholic fatty liver disease and its mechanism [J]. Gen Physiol Biophys, 2023, 42(3): 251-62.
- [73] 路玖玖, 张瑜. 运动性高血压研究进展[J]. 中华高血压杂志(中英文)(LU J J, ZHANG Y. Research progress on exercise-induced hypertension [J]. Chinese Journal of Hypertension), 2025, doi: 10.16439/j.issn.1673-7245.2025-0009.
- [74] ZAFRIR B, AKER A, ASAF Y, et al. Blood pressure response during treadmill exercise testing and the risk for future cardiovascular events and new-onset hypertension [J]. J Hypertens, 2022, 40(1): 143-52.
- [75] HOLZEMER N F, SILVEIRA L J, KAY J, et al. Submaximal exercise response is associated with future hypertension in patients with coarctation of the aorta [J]. Pediatr Cardiol, 2023, 44(6): 1209-25.
- [76] EGBE A C, MIRANDA W R, JAIN C C, et al. Prognostic implications of exercise-induced hypertension in adults with repaired coarctation of aorta [J]. Hypertension, 2022, 79(12): 2796-805.
- [77] VELASCO A, SOLOW E, PRICE A, et al. Differential effects of nebivolol vs. metoprolol on microvascular function in hypertensive humans [J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2016, 311(1): H118-42.
- [78] DIPLA K, TRIANTAFYLLOU A, KOLETOS N, et al. Impaired muscle oxygenation and elevated exercise blood pressure in hypertensive patients: links with vascular stiffness [J]. Hypertension, 2017, 70(2): 444-51.
- [79] 刘海浪, 于春杨, 耿金, 等. 不同运动模式对正常高值血压患者的血压及心肺耐力的影响[J]. 心血管病防治知识(LIU H L, YU C Y, GENG J, et al. Effects of different exercise modes on blood pressure and cardiopulmonary endurance in patients with high-normal blood pressure [J]. Chinese Journal of Cardiovascular Prevention and Treatment), 2023, 13(28): 3-6.
- [80] 刘子彰, 牟彩莹. 不同运动模式对老年高血压患者血压控制的改善效应的系统综述[C]//湖北省体育科学学会. 第三届湖北省体育科学大会论文摘要集(LIU Z Z, MU C Y. A systematic review of the improvement effects of different exercise modes on blood pressure control in elderly hypertensive patients [C]//Hubei Sports Science Society. Abstracts of the 3rd Hubei Sports Science Congress), 2025: 23-4.
- [81] 王丹. 高强度间歇训练在原发性高血压患者康复治疗中的应

- 用效果[J]. 中国民康医学(WANG D. Application effect of high-intensity interval training in rehabilitation treatment of patients with essential hypertension [J]. Medical Journal of Chinese People's Health), 2022, 34(9): 63-6.
- [82] 鄧季焯, 王甜甜, 任爽, 等. 高强度间歇运动通过调控氧化应激改善原发性高血压患者内皮祖细胞功能[J]. 环境与职业医学 (ZHI J X, WANG T T, REN S, et al. High-intensity interval exercise improves endothelial progenitor cell function in essential hypertension patients by regulating oxidative stress [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine), 2025, 42(2): 179-87.