

血流限制训练对脑卒中患者下肢功能影响的研究进展

潘冠琪¹,张慧洁¹,温晓妮²

【摘要】 脑卒中已成为我国成年人致死和致残的首要原因,约三分之二的脑卒中患者存在下肢功能障碍,严重影响患者的日常生活。近年来,血流限制训练(BFRT)作为一种低负荷、高效能的康复干预手段,在改善脑卒中患者下肢功能方面显现出积极效果。为评估BFRT对脑卒中患者下肢功能的改善作用,本研究采用主题词和自由词结合方式,系统检索PubMed、Web of Science、中国知网和万方数据库,检索时限为建库至2025年6月3日,对国内外相关研究成果予以综述,旨在为改善脑卒中患者下肢功能提供新策略。

【关键词】 血流限制训练;脑卒中;下肢功能

【中图分类号】 R49;R743.3 **【DOI】** 10.3870/zgkf.2026.05.006

Research progress in blood flow restriction training on lower limb function in stroke patients

Pan Guanqi¹,Zhang Huijie¹,Wen Xiaoni²

1. School of Exercise and Health Science, Xi'an Physical Education University, Xi'an, Shaanxi 710068, China;

2. Department of Sports Medicine, School of Exercise and Health Sciences, Xi'an Physical Education University

【Abstract】 Stroke has become the leading cause of death and disability among adults in China, and about two thirds of stroke patients have lower limb dysfunction, which seriously affects their daily life. In recent years, blood flow restriction training (BFRT), as a low-load and high-efficiency rehabilitation intervention, has shown positive effects in improving lower limb function in stroke patients. In order to evaluate the effect of BFRT on lower limb function in stroke patients, this study used a combination of subject terms and free terms to systematically search PubMed, Web of Science, CNKI and Wanfang Data, with a time limit from the establishment of the databases to June 3, 2025, to review the results of related research at home and abroad, with the aim of providing a new strategy for the improvement of lower limb function in stroke patients.

【Key words】 blood flow restriction training; stroke; lower limb function

脑卒中是我国成年人致死、致残的首要病因^[1]。三分之二的脑卒中患者遗留下肢肌力减退、步态异常及平衡障碍,其中近50%在接受常规康复6个月后仍存在步行功能受损^[2]。目前60%~70%一次重复最大力量(one repetition maximum,1RM)高负荷抗阻训练仍被认为是促进肌力和肌耐力恢复的有效手段^[3],但对普遍存在肌力下降、疼痛及易疲劳等问题的脑卒中患者而言,常难达预期效果且可能引发不良反应^[4]。因此,如何在低负荷状态下安全有效地改善脑卒中患者的下肢功能,已成为临床康复领域亟待解决的问题。血流限制训练(blood flow restriction train-

ing,BFRT)通过使用加压装置在肢体近端加压以限制部分动脉血流同时阻断静脉血回流的方法^[5],使得低负荷训练(20%~30%1RM)也能显著增强肌力与肌肉体积^[6]。近年来研究发现,BFRT对于老年人、慢性病及各种神经疾病患者的肌力、肌耐力以及日常活动表现也有显著改善^[7-9],尤其在脑卒中患者中,BFRT能够在不增加关节负荷的情况下,提供有效刺激,促进下肢肌力恢复和步态改善,并提升患者的平衡及日常活动能力。本文旨在系统回顾近年来国内外有关BFRT在脑卒中患者下肢功能改善方面的研究成果,并讨论其潜在机制、训练参数及安全性,为临床康复实践提供理论依据和指导。

1 方法

采用主题词和自由词结合方式,系统检索PubMed、Web of Science、中国知网和万方数据库。

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2020YFC2006904)

收稿日期:2025-03-20

作者单位:1. 西安体育学院运动与健康科学学院,西安710068;2. 西安体育学院运动与健康科学学院运动医学教研室

作者简介:潘冠琪(1999-),男,硕士,主要从事脑卒中康复方面的研究。

通讯作者:温晓妮,weniwani@163.com

检索时限为建库至 2025 年 6 月 3 日。英文检索策略: (blood flow restriction training OR BFRT) AND (stroke) AND (muscle power OR motor function OR balance function OR lower limb function); 中文检索策略: (血流限制训练) AND (脑卒中) AND (肌力 OR 运动功能 OR 平衡功能 OR 下肢功能); 文献纳入标准: 干预措施为 BFRT; BFRT 生理或分子作用机制的相关研究; 实验结局指标为下肢功能、肌力、平衡功能、步行能力; 语言为中文或英文。排除标准: 重复发表; 无法获取全文; 学位论文、会议论文。

2 BFRT 的作用机制

2.1 生理机制 BFRT 通过缺血缺氧环境以多重生理机制促进肌肉生长、血管生成、镇痛反应以及调节抑郁情绪, 增强肌力、改善脑卒中患者的运动功能。①缺血缺氧状态下, 乳酸等代谢产物在肌肉内迅速堆积, 刺激生长激素 (growth hormone, GH) 和胰岛素样生长因子 1 (insulin-like growth factor 1, IGF-1) 的释放^[10], 此外代谢产物的堆积还可导致肌细胞肿胀, 继而激活哺乳动物雷帕霉素靶蛋白 (mammalian target of rapamycin, mTOR) 和丝裂原活化蛋白激酶 (mitogen-activated protein kinase, MAPK) 通路, 促进蛋白合成并抑制蛋白水解^[11-12], 改善脑卒中患者患侧肢体功能、优化线粒体能量代谢、延缓肌肉疲劳, 继而实现偏瘫侧肌力和耐力的同步提升^[13-14]; ②BFRT 刺激Ⅲ和Ⅳ型传入神经并抑制 α 运动神经元, 增强快肌纤维募集^[15], 从而在后续康复训练中为患者的患侧肢体提供更强烈、更集中的训练刺激; ③BFRT 通过激活和上调血管内皮生长因子 1 和 2 (vascular endothelial growth factor 1 and 2, VEGF-1、VEGF-2)、缺氧诱导因子 1 α (hypoxia-inducible factor 1 alpha, HIF-1 α) 及一氧化氮合酶 (nitric oxide synthase, NOS) 来改善血管生成^[16], 对于脑卒中后因血供不足导致的肌肉萎缩和运动障碍提供了持续的营养供应, 加快患肢功能恢复; ④缺血缺氧状态可提升脑源性神经营养因子 (brain-derived neurotrophic factor, BDNF) 和 VEGF 水平, 对卒中患者的抑郁情绪产生积极影响, 解决卒中后患者主观体力负荷较低的问题, 提高患者的运动依从性^[17]; ⑤缺血缺氧状态促使 β -内啡肽的释放, 产生镇痛作用, 增强运动诱发的痛觉减退 (exercise-induced hypoalgesia, EIH), 改善患者运动耐受性^[18], 缓解训练中及训练后的疼痛感受, 使体质较弱、疼痛和运动耐受性有限的脑卒中患者也能得到更有效的康复。

2.2 神经机制 BFRT 能改善中枢神经系统的功能, 具体体现在以下四个方面: ①缺血缺氧状态下, BFRT

增强肌肉传入神经的反馈^[19]。局部代谢压力增强了肌肉传入神经的敏感性, 即使因脑卒中导致传入通路受损, BFRT 仍能通过放大本体感受器的信号输入, 促进脊髓及皮层对运动指令的整合与修复, 改善运动控制与协调性^[20]; ②BFRT 显著提高血乳酸 (blood lactic acid, BLA) 浓度, 进而促进 BDNF 基因表达, 增强神经元突触可塑性、轴突生长及皮层重组^[17, 21], 为脑卒中后神经恢复和功能重建奠定基础; ③脑卒中患者常存在 γ -氨基丁酸 (gamma-aminobutyric acid, GABA) 介导的抑制失衡, 皮质抑制增强、兴奋性受限。BFRT 通过缺血缺氧环境, 降低 GABA 浓度, 从而使短程皮质内抑制 (short interval intracortical inhibition, SICI) 减弱, 恢复皮质脊髓通路的兴奋性^[22-24]; ④BFRT 不仅能在短时间内显著提升受试者的运动诱发电位 (motor evoked potentials, MEP) 幅值, 增强皮质运动兴奋性, 同时还表现出比常规训练更显著的脑血流量增加幅度及对对侧初级运动皮层 (primary motor cortex, M1) 更强的激活作用, 提示 BFRT 对神经可塑性具有积极促进作用^[25]。不难看出, BFRT 可通过增强肌肉传入反馈、上调 BDNF 表达、降低 GABA 介导的皮质抑制及提升运动皮层激活, 调节脑卒中患者的皮质抑制/兴奋平衡, 促进中枢神经功能重建。当然, BFRT 的上述代谢—内分泌、血管生成与血流改善、神经可塑性及心理—镇痛等效应并非孤立发生, 而是呈现高度协同; 内分泌系统的激活与肌细胞信号放大相互促进, 血管的生成与改善为神经与肌肉提供持续营养支持, 大脑皮质兴奋性的提高及脑血流量的增加相辅相成, 运动诱发镇痛与抑郁改善则进一步巩固训练, 增加依从性。BFRT 以低负荷为切入点, 通过多层次、多通路的交互调控, 不仅降低了运动损伤的风险, 还通过机制互补的方式改善肌力、血管与神经功能等, 为脑卒中康复提供了一条安全、高效的康复路径。

3 BFRT 在脑卒中患者下肢功能中的临床应用

3.1 BFRT 在脑卒中患者下肢肌力中的应用 运动训练能够调节神经肌肉参数, 并协同改善脑卒中患者的心肺功能、认知功能、运动功能及平衡功能等^[26]。Aidar 等^[27] 也认为肌力与脑卒中患者的生活质量存在相关性, 是影响其能否重返社会的重要因素。近年来多项研究表明, BFRT 在脑卒中患者下肢肌力康复中展现出显著的应用价值。杜燕等^[28] 将 60 例老年脑卒中患者随机分为常规抗阻训练组与 BFRT 2 组, 结果显示 BFRT 组偏瘫侧肌力恢复及下肢运动功能改善方面均优于对照组。徐文静等^[29] 在相同常规康复治疗 and 20% 1RM 踏车运动的基础上, 将 58 例患者

随机分为 BFRT 组和对照组,研究再次证实 BFRT 能提高卒中患者下肢肌群的肌纤维募集能力和肌力,改善卒中患者下肢运动功能。Ahmed 等^[23]进一步发现,低负荷 BFRT 对缺血性卒中患者下肢肌肉力量的改善程度可与高负荷抗阻训练相当。Kostka 等^[30]则强调偏瘫侧屈膝肌的肌力是决定卒中患者下肢功能康复的重要因素,提示在 BFRT 应用中应优先针对屈膝肌训练,减少患侧与健侧之间的力量差异,进而促进下肢运动功能的恢复。尽管上述研究均证实 BFRT 在提高脑卒中患者下肢肌力方面具有显著效益,但对肌肉厚度的影响方面则未予涉及,而肌肉的体积在一定程度上决定了肌力的大小。事实上,Hill 等^[31]的研究发现,BFRT 对肌肉厚度的改善并不显著,这可能由于干预时间短且训练次数少,使得肌肉厚度的变化不明显。Ma 等^[32]的研究也发现 BFRT 在增加肌肉厚度方面并无统计学差异 $[-0.07, 95\%CI: (-0.25 \sim 0.12), I^2=0\%, P=0.87]$ 。其原因可能包括:①干预时长不足可能不会引起显著的肌肉肥大效应。研究显示,当训练周期超过 6 周时,肌肉厚度的改善更为明显^[33]。②袖带压力和宽度的差异也可能影响 BFRT 的效果,较高的袖带压力($\geq 160\text{mmHg}$)和较宽的袖带(13.5cm)对肌肉厚度的改善效果更佳。③脑卒中患者偏瘫侧本身基础运动能力的不足也可能对肌肉厚度的变化产生影响。④训练频率和负荷的设置也可能影响干预效果。频率较低(<3 次/周)和负荷较低的训练也不足以刺激肌肉肥大^[34]。综上不难发现,尽管 BFRT 可能对脑卒中患者的肌肉厚度影响微弱,但对脑卒中患者而言,仍不失为一种可替代高负荷抗阻运动且安全有效的下肢功能康复方案,同时也表明 BFRT 主要通过改善神经肌肉适应性和功能性重塑的神经机制而非显著的结构性肌肉肥大的生理机制发挥作用^[12,31]。

3.2 BFRT 在脑卒中患者平衡功能中的应用 在脑卒中患者的康复过程中,平衡能力的提升被认为是增强其独立生活能力的关键因素之一^[35]。研究表明,BFRT 在改善患者肢体功能障碍、提升躯干稳定性以及整体平衡能力方面具有显著优势。Wen 等^[36]对 46 例功能性踝关节不稳的患者进行的比较研究表明,BFRT 在改善踝关节肌力和平衡能力方面具有显著效果,干预早期对外翻肌力和动态平衡的提升尤为明显。孙良文等^[37]在对 80 例老年偏瘫患者进行随机分组研究中发现,全身振动训练及其联合 BFRT 均能有效改善卒中患者的平衡能力,但联合组与振动组之间差异无统计学意义,但在 3 个月随访中,联合组的平衡改善效果优于单纯全身振动组,提示 BFRT 对平衡功能的

改善可能具有持久性,但该研究未设立单独的 BFRT 组,因而无法判断联合干预是否优于单独的 BFRT。此外,脑卒中后偏瘫患者不仅需要增加患侧肢体肌力,还需提高对侧肢体肌力来帮助更好地维持身体平衡。Bowman 等^[38]研究发现,BFRT 对肢体近端和远端肌肉群的强化效果相似,且 BFRT 应用于一侧肢体时,非 BFRT 侧的肌力也有所增长。综上所述,BFRT 在脑卒中患者平衡功能康复中的应用不仅能够促进短期效果,很可能对长期平衡能力的维持也发挥着积极作用。

3.3 BFRT 在脑卒中患者步态和步行功能中的应用 脑卒中患者常因下肢肌力的不对称而产生步态异常并增加跌倒风险;且随着脑卒中后病程的演进及下肢肌力不对称性的逐渐加剧,患者的步行功能将进一步持续退化^[39]。BFRT 通过缺血缺氧环境可暂时降低皮质 GABA 浓度、增强皮质运动区的兴奋性,增加 MEP 幅值等,上调皮质—脊髓通路的可塑性,增加肌肉募集效率。在机制上,BFRT 增强了患侧下肢本体感觉输入、促进脊髓及皮层对步行指令的协同整合,优化步态的对称性与稳定性。多项临床试验证实 BFRT 对步行功能具有显著促进作用。一项针对多发性硬化患者的研究发现,30%闭塞压的低强度 BFRT 间歇步行运动能提升患者的定时 25 英尺步行测试中的步速^[40]。商健等^[41]将 BFRT 与悬吊训练相结合,联合组在 10 米步行测试、患侧支撑时间和双侧支撑时间及平衡测试中均表现出明显的优势,BFRT 联合悬吊训练可有效改善脑卒中患者前后身体最大位移、患侧支撑相和双侧支撑相占比,进而提高步速和步频,但因未设立 BFRT 单独组,无法直接比较联合训练与单独 BFRT 的效果。杜晋楠等^[42]则将 BFRT 与重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)联合应用于 60 例脑卒中患者,结果显示观察组(常规康复+rTMS+BFRT)在下肢运动功能、6 分钟步行距离等方面均显著优于对照组(常规康复+rTMS)。上述研究虽佐证了 BFRT 通过神经生理机制促进患者的功能获益,但由于研究设计及样本量的差异,仍需开展以神经生理机制为重点的高质量研究以补充或明确 BFRT 在脑卒中下肢功能治疗中的潜在机制^[43]。此外,还有研究发现 BFRT 能通过局部缺血和代谢应激,不仅强化了肌力和关节稳定性,还优化关节角度和双侧下肢协调并激活偏瘫侧髋、膝、踝的选择性活动,进一步改善了脑卒中患者的步态对称性和步行功能^[44-45]。因此,BFRT 为脑卒中患者步态及步行功能的恢复提供了一种有效的康复策略,有望在提高患者运动能力和生活质量方面发挥关键作用。

4 BFRT 在脑卒中患者下肢训练中的参数设置与注意事项

4.1 BFRT 在脑卒中患者下肢训练中的参数设置

研究显示, BFRT 中参数的差异会对疗效和安全性产生影响。①在阻断压力方面, 应基于患者大腿动脉闭塞压(arterial occlusion pressure, AOP)测量结果, 采用相对于 AOP 的 60%~80% 百分比压力^[4], 并结合肢体周长及袖带宽度调整绝对充气压力, 避免因袖带过窄或过宽引起的压迫不均和血流估算误差; ②关于袖带宽度与材质, 袖带宽度对阻断压力及局部血流限制程度影响显著, 较宽袖带($\geq 13.5\text{cm}$)在较低压力下即可实现有效阻断, 耐受性与安全性优于窄带^[32]。此外, Buckner 等^[46]研究发现在宽度相同、材质不同条件下, 以 40% AOP 强度训练, 力竭重复次数、峰值扭矩、肌肉厚度及激活度无显著差异(尼龙: $57 \pm 7\text{mmHg}$ 、弹性: $106 \pm 38\text{mmHg}$, $P < 0.001$), 提示袖带材质的不同似乎不会对 BFRT 的效果产生额外影响^[19]。因此在脑卒中患者进行下肢 BFRT, 袖带材质选择可依据临床可及性与舒适度进行; ③在训练强度设置上, 卒中患者 BFRT 强度通常设定为 1RM 的 20%~40%。较高强度虽能引发更显著的心血管和代谢反应, 但因不适感增加和运动量下降可能影响训练依从性; 较低强度则在保证脑卒中患者下肢获得足够训练刺激的同时, 提升安全性和耐受性^[47]; ④对于训练频率与持续时间, 建议每周 ≥ 3 次, 持续 ≥ 3 周, 以显著改善肌力和耐力。此外鉴于低强度 BFRT 可显著激活肌肉代谢反射继而诱发血压和交感神经活动的反射性升高, 因此及时结合患者康复进度动态调整训练方案, 并在训练期间持续监测心血管血流动力学指标, 及时应对潜在风险^[16]; ⑤在重复次数与组间休息方面, 可采用 4 组重复(30 次、15 次、15 次、15 次), 组间休息 30~60s^[19]。另有研究表明, 间歇性 BFRT 较连续 BFRT 可降低主观疲劳感, 临床实践中建议优先采用间歇性 BFRT^[48]; ⑥加压装置形式的研究与变革也为 BFRT 带来不同的结果。传统形式的单腔加压装置通常以单腔气囊完全环绕肢体, 充气后对肢体施加压力, 这种气囊系统与心血管和感知反应相互作用, 或会影响 BFRT 的耐受性或存在安全隐患。近来出现的以连续气囊组成的多腔系统加压装置与传统加压装置不同, 多腔加压装置充气后会留下最小压缩区域, 可降低加压装置阻断动脉血流的能力, 提高 BFRT 的安全性^[49]。但鉴于当前对多腔加压装置的研究相对匮乏, 未来亟需开展更多相关研究, 以便充分验证多腔加压装置在脑卒中患者康复过程中应用的潜在益处。综上

所述, 制定个体化、动态监控且安全可行的 BFRT 训练方案, 对于促进脑卒中患者下肢肌力和功能恢复具有重要意义。

4.2 BFRT 在脑卒中患者下肢训练中的注意事项

对脑卒中患者实施下肢 BFRT, 在产生最大化训练效应的同时, 又须严格保障个体安全。为此应对患者进行全面评估, 重点筛查以下绝对禁忌症: 深静脉血栓形成、严重心脏疾病(近期心肌梗死或充血性心力衰竭等)、严重高血压(收缩压 $\geq 180\text{mmHg}$ 或舒张压 $\geq 110\text{mmHg}$)、肢体开放性伤口、恶性肿瘤、严重动脉粥样硬化或外周动脉疾病、凝血功能障碍、血液循环障碍、下肢静脉曲张、肾功能损害。下列相对禁忌症则需在多学科团队监督下、结合个体化评估后方可谨慎实施: 高血压或糖尿病患者(需密切监测血压与血糖)、术后 < 12 周者(需评估伤口及愈合状态)、镰状细胞病或其他血液病(评估红细胞稳定性)、血液透析患者伴动静脉瘘(避开瘘管部位)、淋巴水肿或肢体肿胀, 以及既往横纹肌溶解症病史。鉴于卒中患者常伴高血压、高血脂、糖尿病等合并症, 在实施 BFRT 时应监测以下安全性指标并建立系统的监测方案: ①采用便携电子血压仪及脉搏血氧仪于患者训练前静息时、每组训练后及训练结束后测量血压、心率及血氧饱和度(peripheral oxygen saturation, SpO_2)并设定安全阈值, 当收缩压 $\geq 180\text{mmHg}$ 、舒张压 $\geq 110\text{mmHg}$, 或心率 > 100 每分钟心跳次数(beats per minute, bpm)、 $< 50\text{bpm}$, 或 $\text{SpO}_2 < 90\%$ 时, 应终止训练并对患者进行医学评估; ②采用红外皮温仪或触诊等评估患者训练前后的肢体皮肤颜色及温度并比较是否出现异样; ③采用 Borg 主观疲劳量表评估患者的疲劳程度; ④使用软尺于患者训练前后测量其大腿及小腿围度, 评估患者下肢是否出现异常肿胀, 若出现则暂停 BFRT; ⑤采用视觉模拟量表评估患者在训练时是否出现异常疼痛或疼痛加剧; ⑥设定明确的停训标准, 如患者出现恶心、头晕、意识模糊、面色苍白或发绀以及患者主动请求停止 BFRT 时, 应立即放松袖带、令患者平卧休息, 并根据需要呼叫医务人员持续监测生命体征^[6, 50-53]。通过从评估禁忌症到动态监测多个生理与主观指标的综合方案, 能够在严格保障个体安全的前提下, 充分发挥 BFRT 对脑卒中患者下肢功能康复的训练效应。

5 小结与展望

BFRT 作为一种低强度、高效率、耐受性好且成本较低的康复方案, 已在改善脑卒中患者下肢肌力、平衡功能和步行功能中显示积极效果。然而, 其临床应用仍存在不足之处。首先, 安全性问题不容忽视, 尤其是

在合并心血管疾病、高血压或血栓风险等的脑卒中患者中,局部血流限制可能引发严重不良事件。虽然目前尚未报道严重副作用,但部分研究观察到轻微不良反应,如短暂性麻木、肌肉瘀伤等,因此亟需制定统一的风险评估工具,以指导临床筛查与个性化康复策略的制定。BFRT在训练参数方面尚无统一标准,如最佳袖带压力、负荷百分比、训练强度、频率及组间休息时间等在不同研究中差异较大,影响结果的可比性和临床实践的规范化。此外,目前尚缺乏不同卒中亚型对BFRT反应差异的系统性研究,难以实现精准康复。关于BFRT的长期干预效果及作用机制也尚未明确,其对肌肉结构重建、神经功能恢复、认知功能等的持续影响仍需深入探索。现阶段临床中仍缺乏系统化的BFRT专业培训体系及统一的设备使用标准,限制了其安全、高效的临床实施。因此,为推动BFRT在脑卒中康复中的规范化、个体化和广泛应用,未来研究可重点关注以下五方面:制定标准化的风险评估工具和训练参数;加强对不同卒中亚型的适应性评估;探索与其他康复技术的联合干预效果;明确其长期疗效及神经机制;建立完善的专业培训体系与设备规范,以期脑卒中患者下肢功能恢复提供更加精细化、个体化和高效率的康复策略。

【参考文献】

- [1] 《中国脑卒中防治报告2021》编写组.《中国脑卒中防治报告2021》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2023, 20(11):783-793.
- [2] Veldema J, Gharabaghi A. Non-invasive brain stimulation for improving gait, balance, and lower limbs motor function in stroke [J]. J Neuroeng Rehabil, 2022, 19(1):84.
- [3] Patterson SD, Hughes L, Head P, et al. Blood flow restriction training: a novel approach to augment clinical rehabilitation: how to do it[J]. Br J Sports Med, 2017, 51(23):1648-1649.
- [4] Manago MM, Dunkle Z, Cohen ET, et al. Go With the Flow? Considerations for Blood Flow Restriction Training in People With Neurologic Conditions [J]. Phys Ther, 2025, 105(1): pzae159.
- [5] 苏明莉, 刘安国, 魏玉婷, 等. 前交叉韧带损伤后血流限制训练的康复研究现状[J]. 中国康复, 2025, 40(1):50-55.
- [6] Lorenz DS, Bailey L, Wilk KE, et al. Blood Flow Restriction Training[J]. J Athl Train, 2021, 56(9):937-944.
- [7] Silva JCG, Pereira Neto EA, Pfeiffer PAS, et al. Acute and Chronic Responses of Aerobic Exercise With Blood Flow Restriction: A Systematic Review[J]. Front Physiol, 2019, 10:1239.
- [8] Cohen ET, Cleffi N, Ingersoll M, et al. Blood-Flow Restriction Training for a Person With Primary Progressive Multiple Sclerosis: A Case Report[J]. Phys Ther, 2021, 101(3): pzaa224.
- [9] Skiba GH, Andrade SF, Rodacki AF. Effects of functional electro-stimulation combined with blood flow restriction in affected muscles by spinal cord injury[J]. Neurol Sci, 2022, 43(1):603-613.
- [10] 魏佳, 李博, 杨威, 等. 血流限制训练的应用效果与作用机制[J]. 体育科学, 2019, 39(4):71-80.
- [11] Martin PM, Bart RM, Ashley RL, et al. An Overview of Blood Flow Restriction Physiology and Clinical Considerations[J]. Curr Sports Med Rep, 2022, 21(4):123-128.
- [12] May AK, Russell AP, Della Gatta PA, et al. Muscle Adaptations to Heavy-Load and Blood Flow Restriction Resistance Training Methods[J]. Front Physiol, 2022, 13:837697.
- [13] Li Y, Yang W, Li J, et al. Relationship between serum insulin-like growth factor 1 levels and ischaemic stroke: a systematic review and meta-analysis[J]. BMJ Open, 2022, 12(6):e045776.
- [14] Melanis K, Stefanou MI, Themistoklis KM, et al. mTOR pathway- a potential therapeutic target in stroke[J]. Ther Adv Neurol Disord, 2023, 16:17562864231187770.
- [15] Wernbom M, Aagaard P. Muscle fibre activation and fatigue with low-load blood flow restricted resistance exercise-An integrative physiology review [J]. Acta Physiol (Oxf), 2020, 228(1): e13302.
- [16] Mannozi J, Al-Hassan MH, Kaur J, et al. Blood flow restriction training activates the muscle metaboreflex during low-intensity sustained exercise[J]. J Appl Physiol (1985), 2023, 135(2):260-270.
- [17] Du X, Chen W, Zhan N, et al. The effects of low-intensity resistance training with or without blood flow restriction on serum BDNF, VEGF and perception in patients with post-stroke depression[J]. Neuro Endocrinol Lett, 2021, 42(4):229-235.
- [18] Cervini GA, Rice M, Jasperse JL. Potential Local Mechanisms for Exercise-Induced Hypoalgesia in Response to Blood Flow Restriction Training[J]. Cureus, 2023, 15(8):e43219.
- [19] Patterson SD, Hughes L, Warmington S, et al. Blood Flow Restriction Exercise: Considerations of Methodology, Application, and Safety[J]. Front Physiol, 2019, 10:533.
- [20] Rossi FE, de Freitas MC, Zanchi NE, et al. The Role of Inflammation and Immune Cells in Blood Flow Restriction Training Adaptation: A Review[J]. Front Physiol, 2018, 9:1376.
- [21] El Hayek L, Khalifeh M, Zibara V, et al. Lactate Mediates the Effects of Exercise on Learning and Memory through SIRT1-Dependent Activation of Hippocampal Brain-Derived Neurotrophic Factor (BDNF) [J]. J Neurosci, 2019, 39(13):2369-2382.
- [22] Kjeldsen SS, Næss-Schmidt ET, Lee M, et al. Blood flow restriction exercise of the tibialis anterior in people with stroke: a preliminary study[J]. J Integr Neurosci, 2022, 21(2):53.
- [23] Ahmed I, Mustafaoglu R, Erhan B. The effects of low-intensity resistance training with blood flow restriction versus traditional resistance exercise on lower extremity muscle strength and motor function in ischemic stroke survivors: a randomized controlled trial [J]. Top Stroke Rehabil, 2024, 31(4):418-429.
- [24] Næss-Schmidt ET, Morthorst M, Pedersen AR, et al. Corticospinal excitability changes following blood flow restriction training of the tibialis anterior: a preliminary study [J]. Heliyon, 2017, 3(1):e00217.
- [25] Brandner CR, Warmington SA, Kidgell DJ. Corticomotor Excita-

- bility is Increased Following an Acute Bout of Blood Flow Restriction Resistance Exercise[J]. *Front Hum Neurosci*,2015,9:652.
- [26] Gambassi BB, Coelho-Junior HJ, Schwingel PA, et al. Resistance Training and Stroke: A Critical Analysis of Different Training Programs[J]. *Stroke Res Treat*,2017,2017:4830265.
- [27] Aidar FJ, de Oliveira RJ, de Matos DG, et al. A Randomized Trial Investigating the Influence of Strength Training on Quality of Life in Ischemic Stroke[J]. *Top Stroke Rehabil*, 2016, 23(2): 84-89.
- [28] 杜燕,陈雪梅,李丽. 血流限制联合抗阻训练对老年脑卒中偏瘫患者下肢功能的影响[J]. *吉林医学*, 2022, 43(3):800-802.
- [29] 徐文静,朱兴国,周婷,等. 血流限制联合低强度抗阻运动对脑卒中患者下肢功能及表面肌电的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2023,38(1):46-51.
- [30] Kostka J, Czernicki J, Pruszyńska M, et al. Strength of knee flexors of the paretic limb as an important determinant of functional status in post-stroke rehabilitation[J]. *Neurol Neurochir Pol*,2017,51(3):227-233.
- [31] Hill EC, Housh TJ, Smith CM, et al. Acute changes in muscle thickness, edema, and blood flow are not different between low-load blood flow restriction and non-blood flow restriction[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*,2021,41(5):452-460.
- [32] Ma F, He J, Wang Y. Blood flow restriction combined with resistance training on muscle strength and thickness improvement in young adults: a systematic review, meta-analysis, and meta-regression[J]. *Front Physiol*,2024,15:1379605.
- [33] Li N, Yang J, Liao Y. The effect of blood flow restriction training combined with electrical muscle stimulation on neuromuscular adaptation: a randomized controlled trial [J]. *Front Physiol*, 2023,14:1182249.
- [34] Yang K, Chee CS, Abdul Kahar J, et al. Effects of blood flow restriction training on physical fitness among athletes: a systematic review and meta-analysis[J]. *Sci Rep*,2024,14(1):16615.
- [35] Gath C, Lado V, Gianella M, et al. Association between the balance recovery and the independence after a severe stroke [J]. *Neurol Res*,Published online February 27, 2025;1-7.
- [36] Wen Z, Zhu J, Wu X, et al. Effect of Low-Load Blood Flow Restriction Training on Patients With Functional Ankle Instability: A Randomized Controlled Trial[J]. *J Sport Rehabil*,2023,32(8): 863-872.
- [37] 孙良文,韦春霞,刘森,等. 全身振动联合血流限制训练对老年脑卒中偏瘫患者运动功能及社区活动能力的影响[J]. *实用医学杂志*, 2024, 40(20):2874-2879.
- [38] Bowman EN, Elshaar R, Milligan H, et al. Proximal, Distal, and Contralateral Effects of Blood Flow Restriction Training on the Lower Extremities: A Randomized Controlled Trial [J]. *Sports Health*. 2019,11(2):149-156.
- [39] Lee Y, Kim GB, Shin S. Association Between Lower Limb Strength Asymmetry and Gait Asymmetry: Implications for Gait Variability in Stroke Survivors[J]. *J Clin Med*,2025,14(2):380.
- [40] Lamberti N, Straudi S, Donadi M, et al. Effectiveness of blood flow-restricted slow walking on mobility in severe multiple sclerosis: A pilot randomized trial[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2020, 30(10):1999-2009.
- [41] 商健,郭耀锐,白丽,等. 血流限制联合悬吊训练对脑卒中患者下肢功能和步行能力的影响[J]. *中国康复*, 2025, 40(1):11-15.
- [42] 杜晋楠,郭宝珍,王群有. 血流限制训练联合重复经颅刺激对脑卒中后下肢功能影响的疗效评价[J]. *中外医疗*,2022,41(12):23-26,35.
- [43] Cummings M, Madhavan S. Blood flow modulation to improve motor and neurophysiological outcomes in individuals with stroke: a scoping review[J]. *Exp Brain Res*, 2024, 242(12): 2665-2676.
- [44] Walden TP, Fairchild T, Girard O, et al. Blood flow restricted walking alters gait kinematics[J]. *Eur J Sport Sci*,2023,23(8): 1528-1537.
- [45] 冯雅丽,文方林,周谊,等. 血流限制联合运动训练对脑卒中患者下肢功能和步行能力的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2023, 38(3):331-336.
- [46] uckner SL, Dankel SJ, Counts BR, et al. Influence of cuff material on blood flow restriction stimulus in the upper body[J]. *J Physiol Sci*,2017,67(1):207-215.
- [47] Mattocks KT, Jessee MB, Counts BR, et al. The effects of upper body exercise across different levels of blood flow restriction on arterial occlusion pressure and perceptual responses[J]. *Physiol Behav*,2017,171:181-186.
- [48] Neto GR, Novaes JS, Salerno VP, et al. Acute Effects of Resistance Exercise With Continuous and Intermittent Blood Flow Restriction on Hemodynamic Measurements and Perceived Exertion [J]. *Percept Mot Skills*,2017,124(1):277-292.
- [49] Rolnick N, Kimbrell K, de Queiros V. Beneath the cuff: Often overlooked and under-reported blood flow restriction device features and their potential impact on practice—A review of the current state of the research[J]. *Front Physiol*,2023,14:1089065.
- [50] Huang R, Ma Y, Yang Z, et al. Hemodynamic analysis of blood flow restriction training: a systematic review[J]. *BMC Sports Sci Med Rehabil*,2025,17(1):46.
- [51] Whiteley R. Blood Flow Restriction Training in Rehabilitation: A Useful Adjunct or Lucy's Latest Trick[J]? *J Orthop Sports Phys Ther*,2019,49(5):294-298.
- [52] Anderson KD, Rask DMG, Bates TJ, et al. Overall Safety and Risks Associated with Blood Flow Restriction Therapy: A Literature Review[J]. *Mil Med*,2022,187(9-10):1059-1064.
- [53] Nascimento D da C, Rolnick N, Neto IV de S, et al. A Useful Blood Flow Restriction Training Risk Stratification for Exercise and Rehabilitation[J]. *Front Physiol*,2022,13:808622.