

# 血流限制性训练对脑卒中后肌肉力量康复的研究进展

方除维, 江海, 杨承卓\*

重庆医科大学附属康复医院康复医学科, 重庆

收稿日期: 2026年2月5日; 录用日期: 2026年2月27日; 发布日期: 2026年3月11日

## 摘要

绝大多数脑卒中患者发病后都会出现明显的肌肉力量下降, 导致肢体功能障碍, 严重影响生活治疗。血流限制性训练能明显改善肢体的肌肉力量, 研究表明其结合低负荷训练能够达到与大负荷训练相似的效果, 此外血流限制性训练安全性较高, 鲜有报道训练后出现不良事件, 从而被广泛运用在肢体力量训练中, 其中也包括脑卒中患者肌力康复训练。本文综述了血流限制训练的原理、作用机制, 分析其在脑卒中患者临床应用和进展, 简述了相关的训练方案和训练时安全注意事项, 以期能为血流限制性训练在脑卒中患者中的个性化训练及具体方案的优化提供新思路。

## 关键词

血流限制性训练, 脑卒中, 肌肉力量, 康复训练

## Research Progress on Blood Flow Restriction Training for Muscle Strength Rehabilitation after Stroke

Chuwei Fang, Hai Jiang, Chengzhuo Yang\*

Department of Rehabilitation Medicine, The Affiliated Rehabilitation Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: February 5, 2026; accepted: February 27, 2026; published: March 11, 2026

## Abstract

The majority of stroke patients experience significant muscle weakness following onset, leading to

\*通讯作者。

文章引用: 方除维, 江海, 杨承卓. 血流限制性训练对脑卒中后肌肉力量康复的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 1665-1673. DOI: 10.12677/acm.2026.163951

**limb dysfunction and severely impacting daily activities and treatment. Blood flow restriction training can significantly improve limb muscle strength. Research indicates that combining it with low-load training can achieve effects similar to those of high-load training. Additionally, blood flow restriction training is highly safe, with few reported adverse events following training, making it widely applied in limb strength training, including muscle strength rehabilitation training for stroke patients. This article reviews the principles and mechanisms of blood flow restriction training, analyzes its clinical application and progress in stroke patients, and briefly outlines related training protocols and safety precautions during training. The aim is to provide new insights for personalized training and the optimization of specific protocols for blood flow restriction training in stroke patients.**

## Keywords

**Blood Flow Restriction Training, Stroke, Muscle Strength, Rehabilitation Training**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

全球疾病负担(GBD) 2021 年脑卒中负担估计显示,在非传染性疾病(NCD)中,脑卒中仍然是第二大死亡原因和第三大死亡和残疾原因[1],在我国,脑卒中已经成为成年人死亡和残疾的首位原因[2]。肌力的下降是脑卒中患者最常见和最明显的功能障碍之一,因此如何改善脑卒中患者的肌力是帮助患者提高整体功能,恢复日常生活自理能力的关键[3][4]。血流限制性训练(Blood Flow Restriction Training, BFRT)被证明在改善肌肉力量方面具有潜在的优势[5]-[7],BFRT 是一种通过加压带限制肢体血液流动的训练方法,通过在上肢或下肢的近端部分上施加外部压力来实现血流限制,所施加的外部压力足以维持动脉流入,同时限制闭塞部位远端的静脉流出,先前的研究已经证明了低强度阻力训练结合 BFRT 在能有效增加肌肉力量[8]。在早期应用中,BFRT 有助于刺激肌肉生长,但随着其所带来的益处得到认可,其应用和使用的范围也随之传播。目前包括低负荷阻力训练、有氧运动、被动 BFRT 和神经肌肉刺激等各种形式。这些不同的模式已经在各种人口统计亚组中进行了研究,包括运动员和非运动员、健康和受伤人员、术前和术后的患者、年轻人和老年人。将 BFRT 引入脑卒中康复已经成为帮助脑卒中患者肌力恢复的热点治疗措施,为进一步了解 BFRT 的研究进展,本文就血流限制性训练对脑卒中后肌肉力量康复研究进行综述。

## 2. 血流限制性训练原理

日本的 Yoskiaki Sato 博士首次提出 BFRT 的概念,其主要是通过限制血液流向锻炼肌肉,提高训练效果,其唯一目的是增加肌肉质量[9]。BFRT 内容包括进行低强度阻力训练,同时将相对轻且灵活的袖带放置在下肢或上肢的近端部分,以提供适当的表面压力。BFRT 不会导致骨骼肌内的缺血,而是促进肢体肌肉组织内毛细血管中的血液汇集状态。在过去研究中,BFRT 已经被广泛应用于肌肉力量训练中,并被证明其效果优于单纯的运动训练[5]。大部分脑卒中患者发病后,其肢体力量会出现明显的下降,因此在后续的康复过程中肢体力量的训练成为脑卒中患者康复治疗过程的一个重要环节。研究表明[5][8],在对患者施行 BFRT 后,其肢体力量的恢复程度与速度均优于单纯的力量训练。此外,BFRT 并不需要投入大量的成本,且施行较为方便快捷,目前也被逐渐引入脑卒中患者的康复治疗方案中。

### 3. 血流限制训练的作用机制

目前认为, 血管闭塞的代谢应激和阻力训练或运动的机械张力导致肌肉肥大和力量的协同增加是 BFRT 主要的作用机制[10]-[12]。在细胞水平上, 代谢物、激素差异、细胞间信号传导、细胞肿胀和细胞内信号通路都与此有关[11][12][14]-[17]。代谢物在运动中积累, 是肌肉增生时必然产物, 被 BFRT 的相对缺血和缺氧条件放大。研究表明, 它们会诱导更早的外周介导的疲劳, 促进更多的运动单位募集, 这一事实表明, 低负荷下的 BFRT 具有与高负荷阻力训练相似的运动单位募集现象[13][18]。此外, 通常仅在较高强度下优先募集的 II 型快速收缩肌纤维在 BFRT 条件下在较低负荷下被激活, 这解释了低负荷 BFRT 为何比单独低负荷运动更能促进肌肉肥大[19]-[21]。然而, 更多的运动单位募集并不限于闭塞区域远端的肌肉。在上肢和下肢 BFRT 中, 与对照组相比, 更多的近端肌肉群[臀大肌、肩部(三角肌/肩袖)和胸大肌]具有更高水平的募集[22][23]。这一现象是对闭塞部位远端协同肌肉群早期疲劳的反应, 也是手术或损伤后止血带不能在近端应用 BFRT 的重要原因。BFRT 运动的超生理益处也可有部分原因是卫星细胞的增殖, 卫星细胞是肌肉结缔组织内负责肌肉生长和再生的多能干细胞。虽然卫星细胞最初被认为只在高阻力训练的环境中被激活, 但即使在 BFRT 的低负荷下, 它们的增殖也会增加, 肌肉蛋白质合成、肌核含量、肌纤维大小和肌肉力量也会增加[19] BFRT 期间和之后出现的生理适应, 这一现象被发现是由几种显著的细胞信号通路介导的。通过雷帕霉素途径的机制靶点刺激蛋白质翻译, 这在肌肉蛋白质合成和肥大中很重要[24]-[26], 似乎在 BFRT 的作用中起着重要作用[15][16], 而肌肉生长的负调节因子和肌肉纤维化的促进剂——肌肉生长抑制素已被证明在 BFRT 后下调[17][27][28]。

BFRT 对神经系统也有着较为深远的影响, Brandner 等[29]的开创性研究首次证实, 急性 BFR 抗阻训练可显著增强皮质运动兴奋性。Naess-Schmidt 等[30]针对脑卒中患者的初步研究中发现在脑卒中患者和健康人群中, BFR 训练后胫骨前肌的 MEP 振幅均增加, 提示 BFRT 可能通过增强皮质脊髓束兴奋性促进运动恢复。Colomer-Poveda 等[31]的研究探讨了 BFR 训练对脊髓运动神经元的影响, 他们研究得出 4 周低负荷 BFR 训练后, 比目鱼肌的 V 波(反映皮质脊髓束对运动神经元的驱动)和 H 反射(反映脊髓运动神经元兴奋性)发生变化, BFR 可能通过增强皮质驱动和改变运动神经元兴奋性来促进力量增长。Copithorne 等[32]的研究区分了 BFR 对皮质和脊髓水平的影响, 在低强度等长收缩期间, BFR 对皮质脊髓兴奋性的影响主要发生在脊髓上水平(皮质和皮质脊髓束), 而非脊髓水平。Frechette 等[33]研究了 BFR 对皮质静息期(cSP)的影响, 无 BFR 的运动后, cSP 持续时间减少, BFR 运动后, cSP 持续时间增加, 表明 BFR 可能通过独特的神经化学机制调节皮质兴奋性, 其机制可能涉及 GABA-A 和 GABA-B 受体活性。

尽管每种机制途径的确切贡献可能尚未完全了解, 但现有证据提供了重要的见解, 将有助于指导进一步的研究, 以优化康复工作。

## 4. 血流限制性训练在脑卒中后肌肉力量康复中的应用研究

### 4.1. 血流限制性训练临床研究进展

BFRT 已经被多次应用在脑卒中后患者的肌肉力量康复。陈等人[34]的研究将 71 例脑梗死合并肌少症的患者随机分成仅进行低强度抗阻训练的对照组和同时增加 BFRT 的观察组, 训练 12 周后发现观察组的握力、SPPB 评分及 MBI 评分、ASM、SMI 评分及 ASM、GH、IGF-1 高于对照组, 观察组 IL-6 低于对照组, 提示 BFRT 联合低强度抗阻训练能改善脑梗死合并肌少症老年患者的肌肉力量、体能及日常生活能力, 提高其骨骼肌质量, 促进合成代谢激素分泌并降低炎症因子水平。龚等人[35]在一项 52 例病例的研究中证明在施加 BFRT 之后, 脑卒中患者的股四头肌肌力明显高于没有施加 BFRT 的对照组, 说明 BFRT 疗法提高了患者下肢肌肉力量。Allison 等人[36]对 10 名脑卒中患者缺血性调节, 实验证明缺血性

调节使麻痹腿部力量增加  $10.6 \pm 8.5$  Nm, 而在假手术组中没有观察到差异。缺血性调节诱导的强度增加伴随着最大收缩期间肌肉 EMG 幅度增加  $31\% \pm 15\%$  和次最大收缩期间运动单位募集阈值降低 5%。肢体的缺血性调节已成为改善健康个体肌肉性能的有效策略, 但从未在神经人群中进行过测试。在这项研究中, 对慢性中风幸存者的麻痹腿进行局部缺血调节可以增加腿部力量和肌肉激活, 同时降低运动单位募集阈值。Li 等人[37]通过一项随机实验研究探讨了上肢缺血后处理作为急性脑卒中患者辅助治疗的疗效。结果显示, 这种干预措施可以改善患者的神经功能和肢体功能。更多的研究把 BFRT 运用在了肌肉骨骼损伤后的康复[20][38][39], 这些研究证实 BFRT 能够更加有效地提高肌肉力量, 减轻肌肉萎缩和肌肉流失等症状, 结合关于 BFRT 在脑卒中患者中的相关研究, 在后续的研究中可以更多的将 BFRT 引入脑卒中中的肌肉力量康复中, 为脑卒中患者康复提高新的治疗措施。

#### 4.2. 血流限制性训练的训练方案

到目前为止, 最常见的 BFRT 形式是阻力运动(BFR-RE), 其益处多项系统综述和荟萃分析得到证明[8][40]。从这些研究中可以清楚地看出, 低负荷 BFR-RE 在多个方面优于单独的低负荷阻力训练, 包括增强肌肉力量和大小, 并与单独的高负荷阻力训练相当。然而, 尽管低负荷 BFR-RE 在肌肉力量方面不一定优于高负荷阻力训练, 但在关节上的机械应力较小的情况下以更高频率训练的能力允许在术后、受伤和心脏康复患者、赛季运动员和老年人中广泛应用。与单独的低负荷训练相比, 用 BFRT 增强低负荷康复训练可以在肌肉力量方面产生更大的反应, 虽然力量增长的幅度似乎小于大负荷训练。然而, BFRT 结合低负荷训练是单独低负荷训练的更有效的替代方案, 可以作为大负荷训练的替代方案。因此, BFRT 结合低负荷训练可用作恢复大负荷运动过程中的渐进性临床康复工具。Coe 等人[41]的研究显示随着 BFRT 加入低负荷训练, 69% 的人群将获得更大的肌肉力量增益, 但目前并没有明确的文献表明这之间的具体机制, 其原因可能是由肌肉增生和神经适配驱动, 类似于在大负荷训练中观察到的, 其中的潜在机制也可能是相似的。此外, 在运动员相关的研究中, 同样发现了 BFRT 结合低负荷训练与单独的低负荷训练相比, 肌肉维度增加更大[38][42]。在患有临床肌无力的个体中比较 BFRT 结合低负荷训练和大负荷训练的研究显示出肌肉横截面积(CSA)有相近的增加[43], 这与之前的研究报道相一致[44]。尽管 BFRT 结合低负荷训练增加肌肉的力量和维度的具体机制并不明确, 但多数研究报道该训练方式与大负荷训练的效果相近。在住院患者或老年人中, 身体健康的这一组成部分可能是功能恢复的关键。与阻力训练相比, BFRT 与有氧运动(BFR-AE)的研究更加有限, 但与对照组相比, 有氧健身的标志物, 包括绝对和相对耗氧量( $VO_2$ )以及运动疲劳的时间, 都显示出更多的增加[45]。此外, 即使在已经接受过高训练的运动员中, 低强度运动与 BFRT 相结合也显示出类似的实质性改善[46]。

为了使 BFR-RE 实施起来简明、实用, 建议将 1 次重复最大值的 20% 至 40% 与 BFR 袖带压力设定在肢体闭塞压力(LOP)的 40% 至 80% 之间[47]。一般来说, 建议每组之间休息 30 至 60 秒, 主要原因是担心较长的时间和间歇性 BFR (缓解每组之间的袖带压力)可能会限制适应的压力。建议每周进行 2 至 3 次 BFR 训练, 这与每周 2 至 4 次标准阻力训练中骨骼肌肥大的建议一致[47]。在早期康复期时, 更积极的方案, 比如每天两次的 BFR 训练, 可能是加速恢复的合理选择, 不过这也需要考虑患者的耐受性。而对于 BFR-AE, 虽然通常认为应达到 50%  $VO_2$  的阈值才能提高有氧能力, 但 BFR-AE 的临床方案在 2 至 6 周内达到 40%  $VO_2$  最大值可能能够在短短 15 至 20 分钟内达到类似的效果[46][48]。这些影响被认为是由静脉回流的减少介导的, 可以通过心率的增加来补偿, 从而调整有氧适应的有效窗口。虽然不一定是 BFR-AE 的主要焦点, 但在各种研究中也注意到了力量、肌肉大小、糖原组成、毛细血管纤维密度和功能指标的改善[46][48]。

不同的运动方式选择会带来不同的运动效果, 在实施过程中需要针对患者的具体情况进行选择, 脑

卒中患者绝大多数病人身体都处于比较虚弱状态,更加需要依据患者的自身情况选择个性化的训练方案。对于严重痉挛(MAS $\geq$ 3级)的患者,建议在袖带放置前进行软组织松动术或肌肉能量技术(MET)预处理,Yu等的研究方案中,对脑卒中后痉挛患者采用近端上臂放置袖带(150 mmHg)进行肌肉能量技术结合BFR治疗[49]。Loenneke等指出,肢体周径和收缩压是预测BFR压力的关键因素,上肢最好置于近端上臂(肱骨近端1/3处),下肢置于近端大腿(股骨近端1/3处),脑卒中患者注意偏瘫侧上肢需先在肘关节伸展位测量周径,再调整至功能位放置袖带,下肢常伴有伸肌痉挛,放置袖带时需避免过度牵拉[50]。对于袖带的选择,Jessee等发现[51],袖带宽度影响动脉闭塞压,宽袖带(13.5 cm)比窄袖带需要更低压力,脑卒中患者推荐使用宽袖带( $\geq$ 10 cm)以减少局部压力集中,对于肢体周径 $<$ 25 cm的萎缩肢体,需使用专门的小号袖带。Jonsson等的系统综述指出[52],脑卒中患者常伴有偏瘫侧感觉障碍,这会影响BFR的安全性和耐受性监测,建议实施BFR前,使用轻触觉、针刺觉、温度觉测试评估感觉障碍程度,对于感觉减退患者,禁止依赖患者主观疼痛报告作为压力调整的唯一指标,必须采用客观监测手段(如多普勒超声确认动脉血流)。

## 5. 血流限制性训练的安全性与风险

尽管存在血流动力学紊乱和缺血再灌注损伤等风险[53],BFRT已被反复验证,并确认正确训练方式不会比传统运动模式带来更大的安全隐患[54]。日本的一项流行病学研究报告称,除皮肤擦伤外,上述任何不良反应的发生率较低[55]。目前,即使在健康人群中也没有完整的标准化建议。但是在几项研究中报道出现横纹肌病病例,尽管在上述研究中报道的发病率为0.008% [56]。一名肥胖的日本男性在仅进行了三组20次BFRT后就报道了这一点[57],然而,没有该男子训练时的运动负荷或闭塞压力的相关数据,并且该个体已经久坐多年。更有可能的原因是久坐不动的身体不习惯运动的压力或BFRT的不当使用。

BFRT通过部分阻断静脉回流创造缺血环境,理论上可能促进血栓形成。Nascimento等[58]的系统综述分析了BFR训练对凝血系统的影响,核心发现BFRT不会加剧凝血激活,也不会增强纤溶活性。Stavres等[59]的不完全性SCI患者可行性研究发现所有受试者完成训练,无自主神经反射异常或DVT形成迹象,D-二聚体水平未显著升高,该研究使用了不推荐临床使用的过高压力(125% AOP),但即使在此压力下也未观察到DVT。

横纹肌病出现更可能是伴随废用性肌萎缩而出现的,重要的是,治疗师在实施训练前应排除横纹肌病的潜在原因,如感染和长时间固定,并在整个训练期间实行包括肌肉损伤标志物(如血清肌酸激酶)的测量。这也强调了在以安全性和有效性为前提选择袖带压力时,更需要制定个性化的BFRT方法。

大多数研究并没有报道BFRT出现不良事件,包括一些血管疾病的发生,但在临床应用中,尤其是脑卒中患者,不良事件的风险可能会加剧,我们在实施训练时必须实时关注患者的反应,以预防不良事件的发生。

## 6. 总结和展望

BFRT作为热门的运动训练方法,经过许多研究证明将该方法与低负荷训练结合将达到与大负荷相似的效果,从而成为大负荷训练的替代训练之一。BFRT的简便、易于实行、操作方便,强度适中,与大多数脑卒中患者不能进行大负荷训练相匹配,因此也出现了大量将BFRT运用到脑卒中患者肌训练中,并取得一定的实验结果。尽管BFRT在肌肉力量康复中显示出显著优势,但其安全性仍需关注。虽然BFRT被证实是安全的,但在临床应用中,尤其是对于脑卒中患者,仍需谨慎,治疗师在实施BFRT时应排除潜在风险因素。

BFRT作为一种有效的康复手段,其在脑卒中后肌肉力量康复中的应用前景广阔。在后续的研究中,

研究者们可以进一步探究 BFRT 的最佳训练参数, 包括压力设置、训练频率、训练时间等, 以实现个体化的康复方案, 并开展长期随访研究, 评估 BFRT 对脑卒中患者远期功能恢复和生活质量的影响, 在更大样本量和更广泛人群中验证 BFRT 的安全性, 制定标准化的操作指南, 降低不良事件的发生率。此外, 还可以探索 BFRT 与其他康复技术(如神经反馈训练、虚拟现实康复)的联合应用, 以进一步提高康复效果。总之, BFRT 在脑卒中后肌肉力量康复中具有显著的潜力, 但仍需更多的研究来优化其应用方案, 确保其安全性和有效性。未来的研究应着重于深入探讨其作用机制、优化训练参数、评估长期效果以及制定标准化的操作指南, 以推动 BFRT 在临床康复中的广泛应用。

## 基金项目

重庆医科大学附属康复医院内科科研基金项目(RHCQMU2025006); 血流限制联合视觉反馈平衡训练对脑卒中患者的康复疗效观察(Skj2025006)。

## 参考文献

- [1] Feigin, V.L., Brainin, M., Norrving, B., Martins, S.O., Pandian, J., Lindsay, P., *et al.* (2025) World Stroke Organization: Global Stroke Fact Sheet 2025. *International Journal of Stroke*, **20**, 132-144. <https://doi.org/10.1177/17474930241308142>
- [2] 《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.
- [3] Irisawa, H. and Mizushima, T. (2022) Assessment of Changes in Muscle Mass, Strength, and Quality and Activities of Daily Living in Elderly Stroke Patients. *International Journal of Rehabilitation Research*, **45**, 161-167. <https://doi.org/10.1097/mrr.0000000000000523>
- [4] Gray, V., Rice, C.L. and Garland, S.J. (2012) Factors That Influence Muscle Weakness Following Stroke and Their Clinical Implications: A Critical Review. *Physiotherapy Canada*, **64**, 415-426. <https://doi.org/10.3138/ptc.2011-03>
- [5] Hughes, L., Paton, B., Rosenblatt, B., Gissane, C. and Patterson, S.D. (2017) Blood Flow Restriction Training in Clinical Musculoskeletal Rehabilitation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *British Journal of Sports Medicine*, **51**, 1003-1011. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097071>
- [6] Korkmaz, E., Dönmez, G., Uzuner, K., Babayeva, N., Torgutalp, Ş.Ş. and Özçakar, L. (2020) Effects of Blood Flow Restriction Training on Muscle Strength and Architecture. *Journal of Strength & Conditioning Research*, **36**, 1396-1403. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000003612>
- [7] de Lemos Muller, C.H., Farinha, J.B., Leal-Menezes, R. and Ramis, T.R. (2024) Aerobic Training with Blood Flow Restriction on Muscle Hypertrophy and Strength: Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Strength & Conditioning Research*, **38**, 1341-1349. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000004800>
- [8] Cognetti, D.J., Sheean, A.J. and Owens, J.G. (2022) Blood Flow Restriction Therapy and Its Use for Rehabilitation and Return to Sport: Physiology, Application, and Guidelines for Implementation. *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, **4**, e71-e76. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.09.025>
- [9] Sato, Y. (2005) The History and Future of KAATSU Training. *International Journal of KAATSU Training Research*, **1**, 1-5. <https://doi.org/10.3806/ijktr.1.1>
- [10] Goto, K., Ishii, N., Kizuka, T., *et al.* (2005) The Impact of Metabolic Stress on Hormonal Responses and Muscular Adaptations. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **37**, 955-963.
- [11] Suga, T., Okita, K., Morita, N., Yokota, T., Hirabayashi, K., Horiuchi, M., *et al.* (2009) Intramuscular Metabolism during Low-Intensity Resistance Exercise with Blood Flow Restriction. *Journal of Applied Physiology*, **106**, 1119-1124. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90368.2008>
- [12] Takarada, Y., Nakamura, Y., Aruga, S., Onda, T., Miyazaki, S. and Ishii, N. (2000) Rapid Increase in Plasma Growth Hormone after Low-Intensity Resistance Exercise with Vascular Occlusion. *Journal of Applied Physiology*, **88**, 61-65. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.2000.88.1.61>
- [13] Schoenfeld, B.J. (2010) The Mechanisms of Muscle Hypertrophy and Their Application to Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, **24**, 2857-2872. <https://doi.org/10.1519/jsc.0b013e3181e840f3>
- [14] Reeves, G.V., Kraemer, R.R., Hollander, D.B., Clavier, J., Thomas, C., Francois, M., *et al.* (2006) Comparison of Hormone Responses Following Light Resistance Exercise with Partial Vascular Occlusion and Moderately Difficult Resistance Exercise without Occlusion. *Journal of Applied Physiology*, **101**, 1616-1622. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00440.2006>

- [15] Fry, C.S., Glynn, E.L., Drummond, M.J., Timmerman, K.L., Fujita, S., Abe, T., *et al.* (2010) Blood Flow Restriction Exercise Stimulates mTORC1 Signaling and Muscle Protein Synthesis in Older Men. *Journal of Applied Physiology*, **108**, 1199-1209. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01266.2009>
- [16] Fujita, S., Abe, T., Drummond, M.J., Cadenas, J.G., Dreyer, H.C., Sato, Y., *et al.* (2007) Blood Flow Restriction during Low-Intensity Resistance Exercise Increases S6K1 Phosphorylation and Muscle Protein Synthesis. *Journal of Applied Physiology*, **103**, 903-910. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00195.2007>
- [17] Laurentino, G.C., Ugrinowitsch, C., Roschel, H., Aoki, M.S., Soares, A.G., Neves, M., *et al.* (2012) Strength Training with Blood Flow Restriction Diminishes Myostatin Gene Expression. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **44**, 406-412. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318233b4bc>
- [18] Hwang, P.S. and Willoughby, D.S. (2019) Mechanisms behind Blood Flow-Restricted Training and Its Effect toward Muscle Growth. *Journal of Strength and Conditioning Research*, **33**, S167-S179. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002384>
- [19] Wernbom, M., Apro, W., Paulsen, G., Nilsen, T.S., Blomstrand, E. and Raastad, T. (2013) Acute Low-Load Resistance Exercise with and without Blood Flow Restriction Increased Protein Signalling and Number of Satellite Cells in Human Skeletal Muscle. *European Journal of Applied Physiology*, **113**, 2953-2965. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2733-5>
- [20] Takarada, Y., Sato, Y. and Ishii, N. (2002) Effects of Resistance Exercise Combined with Vascular Occlusion on Muscle Function in Athletes. *European Journal of Applied Physiology*, **86**, 308-314. <https://doi.org/10.1007/s00421-001-0561-5>
- [21] Yasuda, T., Brechue, W.F., Fujita, T., Shirakawa, J., Sato, Y. and Abe, T. (2009) Muscle Activation during Low-Intensity Muscle Contractions with Restricted Blood Flow. *Journal of Sports Sciences*, **27**, 479-489. <https://doi.org/10.1080/02640410802626567>
- [22] Bowman, E.N., Elshaar, R., Milligan, H., Jue, G., Mohr, K., Brown, P., *et al.* (2020) Upper-Extremity Blood Flow Restriction: The Proximal, Distal, and Contralateral Effects—A Randomized Controlled Trial. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, **29**, 1267-1274. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.02.003>
- [23] Dankel, S.J., Jessee, M.B., Abe, T. and Loenneke, J.P. (2015) The Effects of Blood Flow Restriction on Upper-Body Musculature Located Distal and Proximal to Applied Pressure. *Sports Medicine*, **46**, 23-33. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0407-7>
- [24] Baar, K. and Esser, K. (1999) Phosphorylation of p70(S6k) Correlates with Increased Skeletal Muscle Mass Following Resistance Exercise. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, **276**, C120-C127. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.1999.276.1.c120>
- [25] Bodine, S.C., Stitt, T.N., Gonzalez, M., Kline, W.O., Stover, G.L., Bauerlein, R., *et al.* (2001) Akt/mTOR Pathway Is a Crucial Regulator of Skeletal Muscle Hypertrophy and Can Prevent Muscle Atrophy *in Vivo*. *Nature Cell Biology*, **3**, 1014-1019. <https://doi.org/10.1038/ncb1101-1014>
- [26] Reynolds, T.H., Bodine, S.C. and Lawrence, J.C. (2002) Control of Ser2448 Phosphorylation in the Mammalian Target of Rapamycin by Insulin and Skeletal Muscle Load. *Journal of Biological Chemistry*, **277**, 17657-17662. <https://doi.org/10.1074/jbc.m201142200>
- [27] Kawada, S. and Ishii, N. (2005) Skeletal Muscle Hypertrophy after Chronic Restriction of Venous Blood Flow in Rats. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **37**, 1144-1150. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000170097.59514.bb>
- [28] Drummond, M.J., Fujita, S., Takashi, A., Dreyer, H.C., Volpi, E. and Rasmussen, B.B. (2008) Human Muscle Gene Expression Following Resistance Exercise and Blood Flow Restriction. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **40**, 691-698. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318160ff84>
- [29] Brandner, C.R., Warmington, S.A. and Kidgell, D.J. (2015) Corticomotor Excitability Is Increased Following an Acute Bout of Blood Flow Restriction Resistance Exercise. *Frontiers in Human Neuroscience*, **9**, Article No. 652. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00652>
- [30] Næss-Schmidt, E.T., Morthorst, M., Pedersen, A.R., Nielsen, J.F. and Stubbs, P.W. (2017) Corticospinal Excitability Changes Following Blood Flow Restriction Training of the Tibialis Anterior: A Preliminary Study. *Heliyon*, **3**, e00217. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00217>
- [31] Colomer-Poveda, D., Romero-Arenas, S., Vera-Ibáñez, A., Viñuela-García, M. and Márquez, G. (2017) Effects of 4 Weeks of Low-Load Unilateral Resistance Training, with and without Blood Flow Restriction, on Strength, Thickness, V Wave, and H Reflex of the Soleus Muscle in Men. *European Journal of Applied Physiology*, **117**, 1339-1347. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3622-0>
- [32] Copithorne, D.B., Rice, C.L. and McNeil, C.J. (2020) Effect of Blood Flow Occlusion on Corticospinal Excitability during Sustained Low-Intensity Isometric Elbow Flexion. *Journal of Neurophysiology*, **123**, 1113-1119. <https://doi.org/10.1152/jn.00644.2019>
- [33] Frechette, M.L., Cook, S.B., Scott, B.R., Tan, J. and Vallence, A. (2025) Post-Exercise Neural Plasticity Is Augmented

- by Adding Blood Flow Restriction during Low Work Rate Arm Cycling. *Experimental Physiology*, **110**, 877-887. <https://doi.org/10.1113/ep092113>
- [34] 陈雪梅, 余广兰. 血流限制联合低强度抗阻运动在脑梗死合并肌少症老年患者的应用研究[J]. 神经损伤与功能重建, 2023, 18(1): 23-27.
- [35] 龚健婷, 吕仁华, 李青, 等. 血流限制性训练联合头针治疗中风患者平衡功能的临床研究[J]. 湖南中医药大学学报, 2025, 45(3): 480-485.
- [36] Hyngstrom, A.S., Murphy, S.A., Nguyen, J., Schmit, B.D., Negro, F., Gutterman, D.D., *et al.* (2018) Ischemic Conditioning Increases Strength and Volitional Activation of Paretic Muscle in Chronic Stroke: A Pilot Study. *Journal of Applied Physiology*, **124**, 1140-1147. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01072.2017>
- [37] Li, Y., Liang, K., Zhang, L., Hu, Y., Ge, Y. and Zhao, J. (2018) Upper Limb Ischemic Postconditioning as Adjunct Therapy in Acute Stroke Patients: A Randomized Pilot. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, **27**, 3328-3335. <https://doi.org/10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2018.07.039>
- [38] Ohta, H., Kurosawa, H., Ikeda, H., Iwase, Y., Satou, N. and Nakamura, S. (2003) Low-Load Resistance Muscular Training with Moderate Restriction of Blood Flow after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, **74**, 62-68. <https://doi.org/10.1080/00016470310013680>
- [39] Bryk, F.F., dos Reis, A.C., Fingerhut, D., Araujo, T., Schutzer, M., Cury, R.d.P.L., *et al.* (2016) Exercises with Partial Vascular Occlusion in Patients with Knee Osteoarthritis: A Randomized Clinical Trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, **24**, 1580-1586. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4064-7>
- [40] Centner, C., Wiegel, P., Gollhofer, A. and König, D. (2018) Effects of Blood Flow Restriction Training on Muscular Strength and Hypertrophy in Older Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, **49**, 95-108. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0994-1>
- [41] Coe, R. (2002) It's the Effect Size, Stupid: What Effect Size Is and Why It Is Important.
- [42] Ozaki, H., Miyachi, M., Nakajima, T. and Abe, T. (2010) Effects of 10 Weeks Walk Training with Leg Blood Flow Reduction on Carotid Arterial Compliance and Muscle Size in the Elderly Adults. *Angiology*, **62**, 81-86. <https://doi.org/10.1177/0003319710375942>
- [43] Libardi, C., Chacon-Mikahil, M., Cavaglieri, C., Tricoli, V., Roschel, H., Vechin, F., *et al.* (2015) Effect of Concurrent Training with Blood Flow Restriction in the Elderly. *International Journal of Sports Medicine*, **36**, 395-399. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1390496>
- [44] Wernbom, M., Augustsson, J. and Raastad, T. (2008) Ischemic Strength Training: A Low-Load Alternative to Heavy Resistance Exercise? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **18**, 401-416. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2008.00788.x>
- [45] Formiga, M.F., Fay, R., Hutchinson, S., Locandro, N., Ceballos, A., Lesh, A., *et al.* (2020) Effect of Aerobic Exercise Training with and without Blood Flow Restriction on Aerobic Capacity in Healthy Young Adults: A Systematic Review with Meta-Analysis. *International Journal of Sports Physical Therapy*, **15**, 175-187. <https://doi.org/10.26603/ijsp20200175>
- [46] Abe, T., Kearns, C.F. and Sato, Y. (2006) Muscle Size and Strength Are Increased Following Walk Training with Restricted Venous Blood Flow from the Leg Muscle, Kaatsu-Walk Training. *Journal of Applied Physiology*, **100**, 1460-1466. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01267.2005>
- [47] Patterson, S.D., Hughes, L., Warmington, S., Burr, J., Scott, B.R., Owens, J., *et al.* (2019) Blood Flow Restriction Exercise: Considerations of Methodology, Application, and Safety. *Frontiers in Physiology*, **10**, Article No. 533. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00533>
- [48] Park, S., Kim, J.K., Choi, H.M., Kim, H.G., Beekley, M.D. and Nho, H. (2010) Increase in Maximal Oxygen Uptake Following 2-Week Walk Training with Blood Flow Occlusion in Athletes. *European Journal of Applied Physiology*, **109**, 591-600. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1377-y>
- [49] Yu, L., Xue, P., Qian, L., Feng, W. and Yao, Q. (2025) Blood Flow Restriction Training Combined with Muscle Energy Technology for Upper Limb Functional Recovery in Poststroke Spasticity: A Randomised Controlled Trial Protocol at a Tertiary Hospital in Jiaying, China. *BMJ Open*, **15**, e092848. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-092848>
- [50] Loenneke, J.P., Allen, K.M., Mouser, J.G., Thiebaud, R.S., Kim, D., Abe, T., *et al.* (2014) Blood Flow Restriction in the Upper and Lower Limbs Is Predicted by Limb Circumference and Systolic Blood Pressure. *European Journal of Applied Physiology*, **115**, 397-405. <https://doi.org/10.1007/s00421-014-3030-7>
- [51] Jessee, M.B., Buckner, S.L., Dankel, S.J., Counts, B.R., Abe, T. and Loenneke, J.P. (2016) The Influence of Cuff Width, Sex, and Race on Arterial Occlusion: Implications for Blood Flow Restriction Research. *Sports Medicine*, **46**, 913-921. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0473-5>
- [52] Jønsson, A.B., Krogh, S., Laursen, H.S., Aagaard, P., Kasch, H. and Nielsen, J.F. (2024) Safety and Efficacy of Blood

- 
- Flow Restriction Exercise in Individuals with Neurological Disorders: A Systematic Review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **34**, e14561. <https://doi.org/10.1111/sms.14561>
- [53] Waclawovsky, G. and Lehnen, A.M. (2015) Hemodynamics of Aerobic and Resistance Blood Flow Restriction Exercise in Young and Older Adults. *European Journal of Applied Physiology*, **116**, 859-860. <https://doi.org/10.1007/s00421-015-3318-2>
- [54] Manini, T.M. and Clark, B.C. (2009) Blood Flow Restricted Exercise and Skeletal Muscle Health. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, **37**, 78-85. <https://doi.org/10.1097/jes.0b013e31819c2e5c>
- [55] Nakajima, T., Kurano, M., Iida, H., Takano, H., Oonuma, H., Morita, T., *et al.* (2006) Use and Safety of KAATSU Training: Results of a National Survey. *International Journal of KAATSU Training Research*, **2**, 5-13. <https://doi.org/10.3806/ijktr.2.5>
- [56] Iversen, E. and Røstad, V. (2010) Low-Load Ischemic Exercise-Induced Rhabdomyolysis. *Clinical Journal of Sport Medicine*, **20**, 218-219. <https://doi.org/10.1097/jsm.0b013e3181df8d10>
- [57] Tabata, S., Suzuki, Y., Azuma, K. and Matsumoto, H. (2016) Rhabdomyolysis after Performing Blood Flow Restriction Training: A Case Report. *Journal of Strength and Conditioning Research*, **30**, 2064-2068. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000001295>
- [58] Nascimento, D.d.C., Petriz, B., da Cunha Oliveira, S., Leite Vieira, D.C., Schwerz Funghetto, S., Silva, A.O., *et al.* (2019) effects of Blood Flow Restriction Exercise on Hemostasis: A Systematic Review of Randomized and Non-Randomized Trials. *International Journal of General Medicine*, **12**, 91-100. <https://doi.org/10.2147/ijgm.s194883>
- [59] Stavres, J., Singer, T.J., Brochetti, A., Kilbane, M.J., Brose, S.W. and McDaniel, J. (2018) The Feasibility of Blood Flow Restriction Exercise in Patients with Incomplete Spinal Cord Injury. *PM&R*, **10**, 1368-1379. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2018.05.013>