

血流限制联合运动训练在脑卒中康复的应用效果及机制探讨

张睿博 谢琴*

宁夏大学体育学院 宁夏银川 750021

摘要: 目的: 本文旨在探讨血流限制联合运动训练(BFR-ET)在康复领域的应用效果及作用机制。方法: 通过检索Web of Science、PubMed和中国知网数据库,以“血流限制训练”“脑卒中”“康复”“blood flow restriction”“stroke”“rehabilitation”等为关键词,回顾文献,重点叙述了BFR-ET在脑卒中患者康复的应用研究进展,并探讨其潜在机制。结果 BFR-ET在低强度训练下可模拟高强度训练效果,显著促进肌肉力量和功能恢复,改善心血管功能,调节自主神经系统,且具有较高患者接受度。结论: BFR-ET在脑卒中康复中展现出显著临床效应,未来研究应进一步验证其长期疗效,优化个体化方案,提升应用安全性和疗效。

关键词: 血流限制训练; 运动训练; 脑卒中; 康复; 应用效果; 机制探讨

引言

血流限制训练(Blood Flow Restriction, BFR)最早由日本学者Sato提出,起源于加压训练(KAATSU Training)^[1]。通过在肢体近端施加适度压力,限制静脉回流,减少肌肉中的氧气供应。基于这一机制,血流限制联合运动训练(Blood Flow Restriction Combined with Exercise Training, BFR-ET)能够在低强度训练(20-30%1RM)下模拟高强度训练的效果^[2]。近年来,BFR-ET在肌肉骨骼、神经损伤和心脑血管疾病等康复中展现了潜力^[3]。通过增强神经肌肉激活和代谢应激,BFR-ET能够显著促进运动功能恢复、改善心血管功能和认知功能,并且减少关节和软组织的损伤风险^[4]。本文旨在系统探讨BFR-ET在脑卒中康复领域的应用效果,并分析其潜在的作用机制,以期为未来的临床应用与科研提供具有指导意义的参考与启示。

1 BFR-ET在脑卒中康复领域的应用效果

脑卒中是一种急性脑血管疾病,卒中患者存在不同程度的运动功能障碍,严重影响日常生活活动能力^[5]。

Brunnstrom分期是脑卒中运动功能评级的重要指标之一,BFR-ET在脑卒中康复中需要患者能够完成或在协助下完成主动活动,所以绝大多数的研究者选择了三期及以上的患者。采取了短则3周长则12周的实验周期,观察受试者的短期效果。运动形式方面多使用弹力带或哑铃进行抗阻训练、固定器械或自重训练。负荷强度方面基本采取中低强度的抗阻训练来观察患者上下肢功能的变化。孔健达^[6]等

人的研究中表明,为了使实验具有安全性和可操作性,血流限制训练应用于老年人的方案建议为:负荷在20%-50%1RM,每次重复20-75次,每周训练2-3次,袖带加压值上肢不超过140 mmHg,下肢不超过180 mmHg。但这一结论主要针对肌少症患者,针对脑损伤患者的血流限制训练频度和组间间隔的研究还需更多探讨,同时袖带加压值的最适选择亦需要进一步研究。

冯雅丽和杜燕^[7,8]的研究均表明,BFR-ET能够显著提高脑卒中患者的肌肉力量和耐力,尤其在改善步态稳定性和日常活动能力方面效果显著,组合训练能够在短期内提升患者的步态稳定性和行走能力。Anwer等人^[9]发现BFR用于上肢抗阻训练能够提升脑卒中患者的上肢肌肉力量和手部精细动作能力。除了肢体功能方面,贾月新^[10]等人对20名大学生采取血流限制联合低强度抗阻训练,结果显示,受试者瘦体重、1RM、膝关节等速肌力和动脉弹性都有显著性增加。动脉弹性提升可以降低动脉硬化风险,改善血液循环,减轻心脏负担,增强血管反应性,并提高患者的运动耐受性。对于老年人来说,这些益处不仅有助于预防心血管并发症,还能改善脑部供血,促进康复过程中的身体功能恢复,从而提升老年脑卒中患者的生活质量。BFR-ET对认知功能益处的研究引起了越来越多的关注。柏星和Jørgensen等人^[11,12]的研究均表明,通过在肢体端产生局部缺氧刺激,能够在短时间内引发大脑的氧气短缺,从而激活一系列神经生物学机制。这些机制包括促进与认知功能改善相关的生物活性分子

水平的显著提高。但这只能说明其对认知功能改善的益处，BFR-ET改善脑卒中病人认知功能应在未来的研究中借助功能性近红外光谱或磁共振成像等设备进一步探索其应用效果。

2 血流限制联合运动训练 (BFR-ET) 的作用机制

2.1 BFR-ET 对肌肉蛋白质合成及生长的适应机制

BFR-ET的肌肉适应机制主要通过局部缺氧与代谢应激激活肌肉蛋白合成途径，从而促进肌肉的生长与适应性。局部血流限制导致的缺氧环境会增加肌肉中乳酸及其他代谢产物的积累，引起肌细胞的渗透压增加，从而导致细胞肿胀，通过激活mTOR信号通路，刺激蛋白质合成并抑制蛋白质分解^[10]。此外，BFR-ET能够增加胰岛素样生长因子-1 (IGF-1)的分泌，IGF-1是肌肉生长的重要调节因子，其通过激活PI3K/Akt信号通路促进肌肉蛋白质合成并抑制蛋白质降解。研究显示，BFR-ET在低强度条件下与传统高强度抗阻训练相比，通过增加代谢应激、提高氧利用率及增加肌纤维的招募，依然能够有效增加IGF-1水平，从而促进肌肉增生与修复^[3]。

2.2 BFR-ET 对神经系统的激活与适应机制

BFR-ET的神经适应机制涉及神经肌肉传导功能的优化、运动单位的招募及神经可塑性的增强^[8,12]。神经系统为克服局部缺氧而增加运动神经元兴奋性，使得更多运动单位被激活，尤其在低负荷情况下，这种现象尤为显著。通过肌电图(EMG)观察，BFR-ET显示出显著增加EMG信号振幅的效果，反映了肌肉激活程度显著提高与神经驱动密切相关，表明BFR-ET能够有效提升神经系统对肌肉的控制能力^[11]。此外，增加的EMG信号不仅表现在训练过程中，还可在训练后的一段时间内持续存在，引发长期的神经适应性改变，从而提升肌肉力量及功能。

2.3 BFR-ET 在心血管功能调节中的作用

BFR-ET在心血管功能调节方面展现了显著的积极作用，特别是在改善心脏泵血功能和血管健康上。通过局部血流限制，BFR-ET在肌肉组织内创造了缺氧环境，改变了血流动力学特性，增加了代谢应激，这种缺氧和代谢应激增加了血管内皮生长因子(VEGF)的表达，促进血管生成及肌肉血液供应的改善，有助于血管的重塑和扩展。内皮细胞在剪切应力的作用下释放了一氧化氮(NO)，这可以改善血管的舒张功能，降低动脉硬化的风险，尤其对老年人和慢性

病患者有益。此外，BFR-ET还能够增强代谢应激下的内皮依赖性血管舒张反应，显著提高反应性充血指数(RHI)，降低脉搏波速度(ba-PWV)，进而增强血管弹性和微循环功能，改善局部血流量和氧供，这对于伤病恢复和长期康复十分有益^[8,12]。

2.4 BFR-ET 在抗炎与免疫系统调节中的作用机制

BFR-ET的抗炎与免疫调节机制也是其重要作用途径之一。尽管BFR训练可能引起局部代谢应激，但BFR-ET并未引发显著的全身性炎症反应。相反，其可能通过调节促炎与抗炎因子平衡，减轻慢性炎症。BFR-ET能显著增加抗炎细胞因子水平，如IL-10等，通过抑制促炎细胞因子的表达，减轻炎症反应。另一方面，BFR-ET还可增强自然杀伤细胞(NK细胞)及T淋巴细胞活性，对免疫系统整体功能起到积极作用。在慢性肌肉骨骼疾病及慢性肾病患者中，BFR-ET显示出显著的抗炎效果，通过上调抗炎因子并抑制促炎因子，有助于减少慢性炎症负担并延缓疾病进展。

2.5 BFR-ET 对激素调节的影响机制

BFR-ET通过增加代谢应激和缺氧能显著提高生长激素(GH)和胰岛素样生长因子-1(IGF-1)的水平^[4]。GH是一种促进肌肉蛋白质合成的重要激素，其增加使得在低强度训练下也能实现显著的肌肉适应效果。GH的增加不仅直接促进了蛋白质合成，还能间接刺激IGF-1的释放，从而进一步促进肌肉生长与修复。IGF-1在BFR-ET过程中也显著增加。IGF-1信号通路的激活，促进肌细胞的增殖和分化。

3 结论

BFR-ET在脑卒中康复中展现出显著的临床效应。通过低负荷、高效能的训练模式，BFR-ET在显著减少患者生理负担的同时，能够实现与高强度训练相当的效果。未来的研究应重点关注进一步验证BFR-ET的长期疗效。此外，改进训练监测技术以及优化个体化康复方案的设计，可能显著提升BFR-ET的应用安全性和疗效，从而为更多患者提供更加精准且高质量的康复治疗选择。

参考文献:

- [1] SATO Y. The history and future of KAATSU Training[J]. Training Research, 2005.
- [2] FARUP J, DE PAOLI F, BJERG K, et al. Blood flow restricted and traditional resistance training performed to fatigue produce equal muscle hypertrophy[J]. Scandinavian Journal of

Medicine & Science in Sports, 2015.

[3] CENTNER C, WIEGEL P, GOLLHOFER A, et al. Effects of Blood Flow Restriction Training on Muscular Strength and Hypertrophy in Older Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis.[J]. Sports Medicine, 2018.

[4] SCOTT B R, LOENNEKE J P, SLATTERY K M, et al. Exercise with Blood Flow Restriction: An Updated Evidence-Based Approach for Enhanced Muscular Development[J]. Sports Medicine, 2014.

[5] 江滨. 现阶段我国脑卒中流行特征及防治现状对全科医疗服务的启示和建议 [J]. 中国全科医学, 2019, 22: 3653-3661.

[6] 孔健达, 解瑛傲, 陈世娟, 等. 血流限制训练干预老年肌少症: 生物学机制和应用方案建议 [J]. 中国组织工程研究, 2024, 28: 3743-3750.

[7] 冯雅丽. 血流限制联合运动训练对脑卒中患者躯体功能与步态影响的研究 [D]. 西南大学, 2023.

[8] 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: 800-802.

[9] ANWER S, WARIS A, GILANI S O, et al. Rehabilitation of Upper Limb Motor Impairment in Stroke: A Narrative Review

on the Prevalence, Risk Factors, and Economic Statistics of Stroke and State of the Art Therapies.[J]. Healthcare, 2022.

[10] 贾月新, 田赛赛, 祁晓红, 等. 低强度抗阻结合血流限制训练 12 周青年人人体成分、肌肉力量及动脉弹性功能 [J]. 中国组织工程研究, 2025, 29: 2521-2527.

[11] 柏星, 王国军, 王少堃. 血流限制训练改善认知功能的机制及应用方案 [J]. 中国组织工程研究, 2023, 27: 4577-4585.

[12] JØRGENSEN S L, KIERKEGAARD-BRØCHNER S, BOHN M B, et al. Effects of blood-flow restricted exercise versus conventional resistance training in musculoskeletal disorders—a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation, 2023.

作者简介: 张睿博 (2001-09), 男, 汉族, 内蒙古鄂尔多斯人, 职称: 无, 学历: 硕士研究生, 研究方向: 科学运动与健康促进。

谢琴 (1974-10), 女, 宁夏永宁人, 学历: 硕士研究生, 职称: 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为体育教学和运动康复。

基金项目: 宁夏大学研究生教育教学改革与创新能力提升 (项目编号: 030700002409)