

# 血流限制联合视觉反馈平衡训练在脑卒中后下肢康复的应用：机制整合与临床展望

鞠黔陵, 江海\*

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1月27日; 录用日期: 2026年2月22日; 发布日期: 2026年2月28日

## 摘要

脑卒中后下肢康复的有效性对患者的生活质量和独立性具有重要影响。近年来, 血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT)与视觉反馈平衡训练(visual feedback balance training, VFBT)作为新兴的康复方法, 逐渐受到关注。本文旨在综述BFRT与VFBT在脑卒中后康复中的相关研究, 探讨其潜在的生理学与神经科学机制, 并评估其在改善脑卒中患者下肢功能, 特别是步行能力方面的临床前景, 以期对相关理论研究和临床应用提供参考与借鉴。

## 关键词

血流限制训练(BFRT), 视觉反馈平衡训练(VFBT), 脑卒中康复, 下肢功能, 协同机制

## Application of Blood Flow Restriction Combined with Visual Feedback Balance Training in Lower Limb Rehabilitation after Stroke: A Mechanistic Integration and Clinical Prospect

Qianling Ju, Hai Jiang\*

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

Received: January 27, 2026; accepted: February 22, 2026; published: February 28, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 鞠黔陵, 江海. 血流限制联合视觉反馈平衡训练在脑卒中后下肢康复的应用: 机制整合与临床展望[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 105-113. DOI: 10.12677/acm.2026.163768

## Abstract

The effectiveness of lower limb rehabilitation after stroke has a significant impact on the quality of life and independence of patients. In recent years, blood flow restriction training (BFRT) and visual feedback balance training (VFBT) have gradually gained attention as emerging rehabilitation methods. This article aims to review the relevant research on BFRT and VFBT in post-stroke rehabilitation, explore their potential physiological and neurological mechanisms, and evaluate their clinical prospects in improving lower limb function, especially walking ability, in stroke patients, in order to provide reference and guidance for relevant theoretical research and clinical applications.

## Keywords

Blood Flow Restriction Training, Visual Feedback Balance Training, Stroke Rehabilitation, Lower Limb Function, Mechanistic Integration

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

脑卒中是导致成人残疾的主要原因之一，尤其是下肢功能障碍，有数据显示 50%至 70%的脑卒中幸存者在卒中后 2 至 4 年内仍会出现偏瘫下肢功能障碍[1]。血流限制训练(Blood Flow Restriction Training, BFRT)和视觉反馈平衡训练(Visual Feedback Balance Training, VFBT)是近年来发展起来的两种新兴康复技术，分别在改善肌肉力量和平衡功能方面表现出显著的效果。BFRT 是通过使用特制的加压带，在进行低负荷的力量训练时部分限制血流，在低负荷的条件下模拟高强度训练的生理效应，从而促进肌肉的生长和改善肌肉力量[2]。此外，BFRT 可以在康复过程中有效减少关节压力，降低心血管风险，为中风患者提供了一种安全有效的康复方案[3][4]。VFBT 则通过提供实时的视觉信息，帮助患者在进行平衡训练时改善其身体姿态和稳定性，从而改善患者的步行功能和日常生活能力[5]-[7]。本文将对现有的 BFRT 和 VFBT 进行综述，旨在探讨两者的协同机制，并展望其在未来脑卒中下肢康复中的应用，为进一步的研究和实践提供科学依据。

## 2. BFRT 在脑卒中下肢康复中的独立证据

### 2.1. BFRT 的生理学机制

低负荷训练结合 BFRT 能够诱导肌肉肥大和力量增长，其机制主要涉及代谢应激、激素分泌和卫星细胞的激活。BFRT 训练通过部分限制血流，使肌肉在较低的负荷下感受到类似于高强度训练的生理压力，从而促进肌肉的生长和力量提升。这种方法能够激活肌肉中的卫星细胞，促进肌肉再生和修复，同时增加合成代谢相关激素如生长激素和睾酮的分泌，从而进一步促进肌肉的生长与适应。此外，低负荷结合 BFRT 的训练模式也能够提高肌肉的代谢适应性、促进快肌纤维招募增加、促进蛋白合成并抑制蛋白水解，从而刺激肌肉生长、增加肌肉力量[8]。

同时 BFRT 可以显著提升神经营养因子水平和有效增加血管内皮生长因子(Vascular Endothelial Growth Factor, VEGF)表达。研究表明，采用 120~160 mmHg 压力进行低强度抗阻训练时，血清脑源性神

经营养因子(Brain-derived Neurotrophic Factor, BDNF)浓度显著升高, 其增幅与 80% 1-RM 高强度训练相当。BDNF 通过调节突触可塑性和神经元存活, 促进运动神经网络重组, 这对卒中后运动功能恢复至关重要。VEGF 作为血管新生的关键调控因子, 通过促进毛细血管网络重建, 改善局部组织灌注与氧合能力。这种血管适应性变化有利于卒中后缺血半暗带的血流恢复和代谢支持[9]。

## 2.2. BFRT 在卒中下肢康复中的临床研究

血流限制训练(BFRT)凭借“低负荷、高效益”的独特优势, 在脑卒中后下肢康复领域的临床证据不断积累, 其核心价值体现在肌力提升、功能改善及安全性保障的多维层面。研究显示, BFRT 能够有效改善卒中患者的肌肉力量、步行速度和耐力。Ahmed I 等[10]采用 BFRT 的低强度阻力训练组在六分钟步行测试中, 与高强度训练组相比, 虽未达到统计学显著差异, 但在步行距离和步速方面仍展现出更好的趋势, 同时在改善焦虑、抑郁情绪方面也同步获益。

脑卒中后疲劳(post stroke fatigue, PSF)是脑卒中后常见的并发症, 显著损害患者的平衡功能, 慢性 PSF 与平衡表现之间存在显著的负相关关系[11], 疲劳感会加剧患者对跌倒的恐惧, 导致其采取更为谨慎、甚至僵化的姿势控制策略, 这种因恐惧而产生的行为改变, 会进一步限制平衡功能的适应性和灵活性[12], Boyne P 等研究表明, 疲劳状态可能限制了患者从动态训练中获益的程度, 从而影响其平衡功能的适应性恢复[13]。Cummings M 等[14]的研究也证实了 BFRT 在改善临床表现和步态参数方面的有效性, 并且在训练后患者的肌肉疲劳感有所降低, 进一步支持了 BFRT 作为卒中康复的一种前景广阔的干预手段。

## 2.3. BFRT 的安全性及适用人群

在应用 BFRT 时, 需要关注一些安全性问题, 包括血压和血栓风险等。研究指出, 虽然 BFRT 在促进肌肉恢复和功能改善方面具有良好的效果, 但对于有严重心血管疾病的卒中患者, 应谨慎评估其适用性。在选择适合的卒中患者进行 BFRT 时, 医生需确保患者没有明显的心血管疾病史或其他可能导致不良事件的并发症[15]。此外, 临床实践中也应重视对患者的监测, 确保在训练过程中随时评估其生理反应, 以最大限度降低潜在的风险[16]。同时 BFRT 实施过程中应注意训练强度及加压程度[17]。整体来看, BFRT 在适当筛选的患者中使用是安全的, 并且可以作为卒中后下肢康复的重要方法之一。

## 3. VFBT 在脑卒中平衡康复中的独立证据

### 3.1. VFBT 的神经科学基础

VFBT 在脑卒中患者的康复中被认为具有重要的神经科学基础。研究表明, 视觉反馈可以通过激活小脑-前庭-视觉通路, 促进运动学习和平衡控制的重塑。这一机制的关键在于视觉信息的整合能力, 能够改善患者的运动表现和动态平衡能力。具体而言, VFBT 通过提供实时的视觉信息, 使患者在进行运动训练时能够感知到自身的运动效果, 从而促进神经元的再塑和运动模式的调整。镜像神经元系统的激活被认为在这一过程中起到了关键作用, 这种系统有助于患者在观察他人运动时, 能够更好地理解和模仿运动, 从而实现运动功能的恢复[8]。此外, 神经影像学研究表明, VFBT 能够增强运动相关皮层的激活, 进一步支持运动再学习和神经可塑性的观点。通过这种方式, 患者的运动控制能力得以提高, 进而改善其平衡能力, 降低跌倒风险[18]。

### 3.2. VFBT 在卒中后平衡康复中的临床效果

VFBT 在脑卒中患者的平衡康复中显示出显著的临床效果。多项研究表明[19]-[21], VFBT 能够显著改善卒中患者的静态和动态平衡能力, 降低跌倒的风险。具体来说, VFBT 通过提供视觉反馈, 帮助患者

在进行平衡训练时, 实时调整其重心和姿势, 进而提高其稳定性和移动能力。Zheng K [22]等一项随机对照试验显示, 接受 VFBT 训练的患者在巴氏指数(Barthel Index, BI)和 Fugl-Meyer 评估(Fugl-Meyer Assessment, FMA)评分均显著高于对照组, 表明 VFBT 能改善患者的日常生活活动和运动功能。此外, VFBT 的应用不仅限于特定的训练环境, 其灵活性使其适用于多种康复场景, 包括家庭和社区康复, 这为患者提供了更为广泛的康复选择。总体而言, VFBT 通过增强患者的平衡控制能力, 促进了其功能恢复, 并为卒中后康复提供了更多的可能性。

### 3.3. VFBT 的技术进展与个性化应用

随着虚拟现实(Virtual Reality, VR)和可穿戴设备的引入, VFBT 的技术进展显著提升了其精准性和趣味性。虚拟现实技术的应用使得康复训练更加生动和互动, 能够吸引患者的注意力, 提高其参与度, 从而增强康复效果[23]。Lee SH 等[24]通过 VR 设备进行的视觉反馈训练能够有效改善患者的运动协调性和整体平衡能力。此外, 可穿戴设备的使用使得患者在日常生活中的运动表现得以实时监测, 数据反馈可以为治疗师提供个性化的训练建议, 进一步优化康复方案[25] [26]。综上, 结合先进的技术手段, VFBT 不仅能够满足患者的个体需求, 还能提升康复的效果和患者的满意度。VFBT 的技术进展与个性化应用为脑卒中患者的平衡康复开辟了新的视角和路径。

## 4. BFRT 与 VFBT 协同作用的生理学与神经科学理论基础

### 4.1. 代谢与神经可塑性的协同效应

BFRT 和 VFBT 在康复中展现出协同作用, 这一现象可通过代谢应激和神经可塑性的交互作用来解释。BFRT 通过限制血流促进局部的代谢应激, 增加乳酸生成, 而乳酸的积累已被证明能够刺激脑源性神经营养因子(BDNF)的分泌[27]。BDNF 是促进神经可塑性的关键因子, 通过增强突触生成、神经发生和长时程增强作用来支持神经系统的恢复。此外, BFRT 还可能通过激活 mTOR 信号通路, 促进肌肉的合成代谢与修复, 从而为神经系统的康复提供必要的代谢支持[28]。VFBT 则通过提高运动控制能力, 进一步促进神经可塑性, 帮助患者在运动中获得反馈并调整体态, 从而改善运动功能。由此可知, BFRT 与 VFBT 联合作用能够更有效地促进脑和肌肉的协同恢复, 增强神经肌肉功能恢复的效果。

### 4.2. 运动控制与肌肉功能的整合

BFRT 与 VFBT 的结合使用不仅能增强肌肉功能, 还能改善运动控制能力, 从而共同提升步行效率及稳定性。BFRT 训练通过增加肌肉的力量和耐力, 使得运动更加有效, 而 VFBT 通过提供即时反馈, 帮助患者更好地理解 and 调整他们的运动模式, 增强平衡与协调能力。这种训练方式被证明可以显著改善老年人和中风患者的步态稳定性[29]。因此, 结合 BFRT 和 VFBT 的训练能够使运动控制的提升与肌肉功能的改善相辅相成, 最终提升患者的整体运动能力, 特别是在步行和日常活动中的表现。

### 4.3. 潜在分子机制与信号通路

在 BFRT 和 VFBT 的协同作用中, 胰岛素样生长因子-1 (Insulin-like Growth Factor 1, IGF-1)和血管内皮生长因子(VEGF)等因子发挥了重要作用。IGF-1 是促进肌肉生长和修复的关键因子, 它能够通过促使细胞增殖和分化来增强肌肉的再生能力[30]。研究表明, BFRT 可引发 IGF-1 的分泌, 增强肌肉的修复和生长。与此同时, VEGF 在促进血管生成和改善局部血流中也扮演着核心角色。BFRT 通过增加局部代谢产物的浓度, 刺激 VEGF 的释放, 从而改善供血状况, 支持肌肉和神经组织的生长[31]。在 VFBT 中, 适当的视觉反馈可以增强对这些生长因子的响应, 使得在康复过程中, IGF-1 和 VEGF 的协同作用更加显

著。因此, 这些分子机制不仅为 BFRT 与 VFRT 的结合提供了生理学基础, 也为临床康复策略的优化提供了潜在的方向。

## 5. 联合疗法在卒中下肢功能康复中的独特价值与潜在优势

### 5.1. 步行相关功能的改善

联合疗法在卒中后下肢功能康复中展现出显著的优势, 尤其是在步行相关功能的提升上。研究表明, 相较于单一疗法, 联合疗法能够更显著地改善步速、步长和步态对称性。例如, 运动想象疗法联合视觉反馈训练[32]、视觉反馈训练联合减重训练[15]、视觉反馈平衡训练联合功能性电刺激治疗[33]等。这表明联合疗法在促进步行能力方面, 可能通过多重机制协同作用, 从而实现更理想的康复效果。

步行的改善不仅体现在速度和步长的增加上, 还包括步态的对称性, 这对于卒中患者的功能独立性至关重要。步态对称性改善可以帮助患者更好地适应日常生活, 减少跌倒风险。研究显示, 有效的康复训练结合视觉反馈能够促进步态的对称性, 其机制可能与神经可塑性和运动学习的增强有关[34]。因此, 联合疗法通过优化运动模式, 进而提升步行能力, 展现出其独特的价值。因此可推测, 血流限制的情况下进行视觉反馈平衡训练, 相较于单一的视觉反馈平衡训练, 能表现出更优的临床效果。研究表明, 该联合训练有望在安全范围内, 通过血流限制诱导的代谢应激促进肌肉恢复与肥大, 同时利用视觉反馈优化神经肌肉控制与平衡能力, 从而可能加速功能恢复并降低再损伤风险[35], 且是一种安全、有效的训练方法[36]。

### 5.2. 患者依从性与接受度

在评估联合疗法的可行性和患者偏好时, 患者的依从性和接受度是关键因素。研究指出, 患者明显感知到联合疗法可以明显提升治疗效果和提高生活质量, 因此患者对联合疗法的接受度较高。例如, 结合 VR 和传统治疗的干预方案就显示出较高的患者依从性, 患者普遍报告了治疗后的生活质量改善[30]。患者的自我效能感也影响患者的治疗依从性, 提高患者的自我效能感, 例如通过教育和支持, 提高他们对治疗效果的信心, 可以显著提高治疗的依从性[37]。因此, 制定个体化的康复计划, 考虑患者的偏好和需求, 将有助于提升联合疗法的可行性和患者的接受度, 从而进一步提高治疗效果。

### 5.3. 长期功能预后的影响

联合疗法在卒中后康复中的独特价值还体现在其对长期功能预后的积极影响上。研究表明, 联合疗法通过双重机制帮助延缓肌肉萎缩和平衡功能的退化[38]。例如, 结合电针和运动疗法的方案显示出在促进神经生长因子(Nerve Growth Factor, NGF)和 BDNF 释放方面的协同作用, 这些因子在神经再生和肌肉功能恢复中起着重要的作用[39]。长期的康复治疗对卒中患者的生活质量和独立性具有重要影响。研究发现, 积极的康复干预可以显著改善患者的日常生活能力[40]。因此, 联合疗法不仅在短期内改善患者的功能状态, 更能为其长期康复提供支持, 降低二次卒中的风险, 从而提升患者的生存质量。

综上所述, 联合疗法在卒中下肢功能康复中展现出独特的价值和潜在优势, 尤其是在步行功能改善、长期预后影响以及患者依从性方面, 为未来的临床实践提供了重要的指导。

## 6. 未来临床研究与实践的指引

### 6.1. 制定联合疗法的标准化方案框架

在制定 BFRT 与 VFRT 联合疗法的标准化方案框架时, 参数设置与疗程设计是关键要素。BFRT 的压力强度通常应设定在 60% 到 80% 的最大腿部血流量, 以确保有效的肌肉刺激, 同时避免因过高的压力

导致的血管损伤[41]。对于训练频率, 建议每周至少进行 2 到 3 次的 BFRT 训练, 以实现最佳的康复效果。VFRT 方面, 训练的频率也建议与 BFRT 相结合, 每次训练应持续 20 到 30 分钟, 以提高患者的平衡能力和运动协调性。疗程的设计应考虑到患者的具体情况, 通常为 8 到 12 周的持续训练, 这段时间内应定期评估患者的平衡能力和下肢功能, 以调整训练计划并确保疗效[42]。此外, 标准化方案还应包括患者的选择标准、训练内容、进度记录和结果评估方法, 以促进临床实践的一致性和可重复性。

## 6.2. 关键研究问题与不足

在未来的研究中, 明确 BFRT 与 VFRT 联合应用的协同机制及最佳剂量效应至关重要。当前文献显示, 不同卒中亚型在康复训练中的反应存在显著差异, 特别是在运动能力与神经功能恢复方面[43]。研究应聚焦于探索不同类型卒中患者对联合疗法的反应差异, 以便为不同患者制定个性化的康复方案。此外, 应进一步探讨 BFRT 与 VFRT 的最佳组合比例及训练时长, 以找出最有效的干预策略, 从而优化患者的康复效果。这些研究不仅能为后续研究提供基础, 也能为临床应用提供坚实的理论基础和实践指导。

## 6.3. 多中心临床试验的设计建议

为了验证 BFRT 与 VFRT 联合疗法的优越性, 开展多中心的随机对照试验(Randomized Controlled Trial, RCT)显得尤为重要。建议试验的设计应包括大样本量的参与者, 以提高结果的统计学意义和临床外推性。试验应涵盖不同的卒中类型、性别和年龄, 以确保研究结果的广泛适用性[44]。此外, 长期随访也是必要的, 以评估患者在康复过程中的持续改善情况及可能的副作用。试验设计中应采用标准化的评估工具, 如功能独立性测量(Functional Independence Measure, FIM)和平衡仪器评定, 以便于不同中心的数据对比与整合。最后, 应重视患者的知情同意和伦理审查, 以确保研究的合规性和参与者的安全[45]。通过以上设计建议, 未来的临床试验将能够为血流限制与视觉反馈平衡训练的联合应用提供更加坚实的证据支持。

## 7. 结论

BFRT 与 VFRT 的联合应用可能展现出显著的协同潜力。从生理学和神经科学的角度来看, BFRT 通过限制肢体的血流, 能够激活肌肉的代谢途径, 促进肌肉的生长与修复。而 VFRT 则通过虚拟环境的交互性和沉浸感, 刺激患者的神经可塑性, 增强运动功能的恢复。这两种疗法的结合, 不仅可以针对性地改善肌肉力量和耐力, 还能提升大脑对运动的控制和协调能力, 从而为患者提供更加全面的康复方案。尽管目前的研究已显示 BFRT 与 VFRT 的联合应用可能在脑卒中下肢康复中有着积极的效果, 但仍存在一些研究的不足。例如, 如何确定最佳的训练强度、频率以及疗程, 仍需进一步的实证研究。同时, 如何针对不同患者制定个性化的康复方案, 是未来研究的重要方向。

## 基金项目

项目名称: 重庆医科大学附属康复医院院内科研基金项目; 编号: RHCQMU2025006; 项目名称: 石柱土家族自治县科学技术局项目; 项目编号: Skj2025006。

## 参考文献

- [1] Lv, X. and Chen, H. (2022) Effect of Virtual Reality Combined with Intelligent Exercise Rehabilitation Machine on the Nursing Recovery of Lower Limb Motor Function of Patients with Hypertensive Stroke. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, Article ID: 2106836. <https://doi.org/10.1155/2022/2106836>
- [2] 张睿博, 谢琴, 周钰, 等. 血流限制联合改良强制性运动疗法对脑卒中偏瘫患者上肢功能的影响[J]. 体育科技文献通报, 2025, 33(8): 237-242.

- [3] Evans, R.W., Ganda, J., Van Schalkwyk, L., Fabricius, D.L. and Cornelissen, M. (2022) Blood Flow Restriction Training in South Africa—A Panel Discussion. *South African Journal of Sports Medicine*, **34**, 1-4. <https://doi.org/10.17159/2078-516x/2022/v34i1a14796>
- [4] Wu, X., Qiao, X., Xie, Y., Yang, Q., An, W., Xia, L., et al. (2025) Rehabilitation Training Robot Using Mirror Therapy for the Upper and Lower Limb after Stroke: A Prospective Cohort Study. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **22**, Article No. 54. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01590-3>
- [5] Han, T., Liu, Q., Hu, Y., Wang, Y. and Xue, K. (2023) Effect of Pro-Kin Visual Feedback Balance Training on Balance Function of Individuals with Early Parkinson's Disease: A Randomized Controlled Pilot Trial. *African Health Sciences*, **23**, 582-588. <https://doi.org/10.4314/ahs.v23i2.67>
- [6] Hyun, S., Lee, J. and Lee, B. (2021) The Effects of Sit-To-Stand Training Combined with Real-Time Visual Feedback on Strength, Balance, Gait Ability, and Quality of Life in Patients with Stroke: A Randomized Controlled Trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article 12229. <https://doi.org/10.3390/ijerph182212229>
- [7] Lee, J. and Lee, D. (2023) A Comparative Study on the Overlapping Effects of Clinically Applicable Therapeutic Interventions in Patients with Central Nervous System Damage. *Open Medicine*, **18**, Article ID: 20230828. <https://doi.org/10.1515/med-2023-0828>
- [8] 岳梦艳, 袁淑娟. 血流限制训练在神经系统疾病中的应用进展[J]. 中国康复, 2023, 38(6): 380-384.
- [9] Du, X., Chen, W., Zhan, N., et al. (2021) 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. *Neuro Endocrinology Letters*, **42**, 229-235.
- [10] Ahmed, I., Mustafaoglu, R. and Erhan, B. (2023) 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. *Topics in Stroke Rehabilitation*, **31**, 418-429. <https://doi.org/10.1080/10749357.2023.2259170>
- [11] Usman, J.S., Wong, T.W.L. and Ng, S.S.M. (2024) Relationships of Post-Stroke Fatigue with Mobility, Recovery, Performance, and Participation-Related Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article 1420443. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1420443>
- [12] Hall, J., Morton, S., Fitzsimons, C.F., Hall, J.F., Corepal, R., English, C., et al. (2020) Factors Influencing Sedentary Behaviours after Stroke: Findings from Qualitative Observations and Interviews with Stroke Survivors and Their Caregivers. *BMC Public Health*, **20**, Article No. 967. <https://doi.org/10.1186/s12889-020-09113-6>
- [13] Boyne, P., Doren, S., Scholl, V., Staggs, E., Whitesel, D., Carl, D., et al. (2022) Preliminary Outcomes of Combined Treadmill and Overground High-Intensity Interval Training in Ambulatory Chronic Stroke. *Frontiers in Neurology*, **13**, Article 812875. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.812875>
- [14] Cummings, M. and Madhavan, S. (2024) Blood Flow Modulation to Improve Motor and Neurophysiological Outcomes in Individuals with Stroke: A Scoping Review. *Experimental Brain Research*, **242**, 2665-2676. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06941-5>
- [15] Scott, B.R., Girard, O., Rolnick, N., McKee, J.R. and Goods, P.S.R. (2023) An Updated Panorama of Blood-Flow-Restriction Methods. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, **18**, 1461-1465. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2023-0135>
- [16] Loenneke, J.P., Wilson, J.M., Wilson, G.J., Pujol, T.J. and Bemben, M.G. (2011) Potential Safety Issues with Blood Flow Restriction Training. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, **21**, 510-518. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01290.x>
- [17] 彭通, 赵大业, 丁淑平, 等. 血流限制训练在老年人群中应用的安全性系统评价[J]. 护理研究, 2022, 36(22): 3994-4001.
- [18] 王戩, 陈楠. 视觉反馈训练对脊髓损伤患者运动功能康复作用机制的功能 MRI 研究进展[J]. 磁共振成像, 2024, 15(7): 154-157.
- [19] Lu, W., Wen, M., Li, Y., Liu, F., Li, Y., Zhang, H., et al. (2024) Effects of Visual Feedback Balance System Combined with Weight Loss Training System on Balance and Walking Ability in the Early Rehabilitation Stage of Stroke: A Randomized Controlled Exploratory Study. *Therapeutic Advances in Neurological Disorders*, **17**, 1-11. <https://doi.org/10.1177/17562864241266512>
- [20] Xu, Y., Ni, J., Yang, Y., Yao, J., Fu, L. and Xu, C. (2025) Game-Based Visual Feedback-Guided Dynamic Balance Training versus Conventional Training in Patients with Hemiplegia: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Journal of Rehabilitation Medicine*, **57**, jrm41277. <https://doi.org/10.2340/jrm.v57.41277>
- [21] 张敬之, 孙阳, 韩飞, 等. 基于视觉反馈的平衡训练系统对脑卒中患者跌倒风险的应用研究[J]. 中国康复医学杂志

- 志, 2025, 40(7): 1009-1016, 1024.
- [22] Zheng, K., Li, L., Zhou, Y., Gong, X., Zheng, G. and Guo, L. (2024) Optimal Proprioceptive Training Combined with Rehabilitation Regimen for Lower Limb Dysfunction in Stroke Patients: A Systematic Review and Network Meta-analysis. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article 1503585. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1503585>
- [23] 周莉丽, 万晶晶. 虚拟现实技术在脑卒中病人肢体运动康复中应用的研究进展[J]. 护理研究, 2025, 39(12): 2116-2121.
- [24] Lee, S. and Song, W. (2024) Mitigating Trunk Compensatory Movements in Post-Stroke Survivors through Visual Feedback during Robotic-Assisted Arm Reaching Exercises. *Sensors*, **24**, Article 3331. <https://doi.org/10.3390/s24113331>
- [25] 梁嘉欣, 黄国志, 王俊辉, 等. 可穿戴式智能足底压力视觉反馈技术对脑卒中患者平衡功能的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(3): 267-272.
- [26] Nairn, B., Tsakanikas, V., Gordon, B., Karapintzou, E., Kaski, D., Fotiadis, D.I., *et al.* (2025) Smart Wearable Technologies for Balance Rehabilitation in Older Adults at Risk of Falls: Scoping Review and Comparative Analysis. *JMIR Rehabilitation and Assistive Technologies*, **12**, e69589. <https://doi.org/10.2196/69589>
- [27] Müller, P., Duderstadt, Y., Lessmann, V. and Müller, N.G. (2020) Lactate and BDNF: Key Mediators of Exercise Induced Neuroplasticity? *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article 1136. <https://doi.org/10.3390/jcm9041136>
- [28] 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.
- [29] Liu, X., Xu, X., Cheung, D.S.T., Chau, P.H., Ho, M., Takemura, N., *et al.* (2023) The Effects of Exercise with or without Dietary Advice on Muscle Mass, Muscle Strength, and Physical Functioning among Older Cancer Survivors: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Cancer Survivorship*, **18**, 1548-1556. <https://doi.org/10.1007/s11764-023-01396-z>
- [30] Puddu, A., Sanguineti, R. and Maggi, D. (2021) Caveolin-1 Down-Regulation Reduces VEGF-A Secretion Induced by IGF-1 in ARPE-19 Cells. *Life*, **12**, Article 44. <https://doi.org/10.3390/life12010044>
- [31] Brahamnejad, M., Dehnou, V.V. and Eslami, R.A. (2023) New, Simple and Practical Approach to Increase the Effects of Aerobic Exercise on Serum Levels of Neurotrophic Factors in Adult Males. *International Journal of Exercise Science*, **16**, 932-941.
- [32] 付晨, 李薇, 刘晓萱. 运动想象疗法联合视觉反馈训练在脑卒中偏瘫病人早期康复中的应用[J]. 护理研究, 2022, 36(1): 143-149.
- [33] Nezon, E., Patel, T., Benson, K., Chan, K., Lee, J.W., Inness, E.L., *et al.* (2025) Combining Functional Electrical Stimulation with Visual Feedback Balance Training: A Qualitative Study of End-User Perspectives on Designing a Clinically Feasible Intervention. *BMJ Open*, **15**, e090791. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-090791>
- [34] Bailey, R.B. (2022) Highlighting Hybridization: A Case Report of Virtual Reality-Augmented Interventions to Improve Chronic Post-Stroke Recovery. *Medicine*, **101**, e29357. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000029357>
- [35] Chen, Z., Zhao, T., Ren, S., Zhang, S., Xu, J., Shen, Y., *et al.* (2025) Application of Blood Flow Restriction Training in Adolescents: A Narrative Review. *Medicine*, **104**, e43084. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000043084>
- [36] Jönsson, 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>
- [37] Ho, W.Y., Abdul-Rahim, A.H., Dawson, J. and Cameron, A.C. (2019) The Role of Single Pill Combination Therapy in the Prevention of Ischaemic Stroke. *Scottish Medical Journal*, **64**, 126-132. <https://doi.org/10.1177/0036933019876155>
- [38] Li, Z., Hou, Y., Su, G., Tu, S. and Liu, F. (2024) Does Acupuncture Combined with Motomed Movement Therapy Have a Better Rehabilitation Effect on Post-Stroke Hemiplegia Patients? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Topics in Stroke Rehabilitation*, **32**, 512-530. <https://doi.org/10.1080/10749357.2024.2429317>
- [39] Liu, Y., Liang, Y., Gao, W., Dai, T., Wang, L., Ji, X., *et al.* (2024) Nonpharmacological Therapies for the Management of the Cognitive Dysfunctions in Poststroke Patients: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **103**, 724-733. <https://doi.org/10.1097/phm.0000000000002435>
- [40] Marsden, K., Mak, H.Y., Crooks, C.P., Pankaj, P., Nguyen, T. and Tirschwell, D. (2021) A Clinical Update on Antiplatelet Therapy in Secondary Prevention of Ischemic Stroke. *Current Cardiology Reports*, **23**, Article No. 145. <https://doi.org/10.1007/s11886-021-01581-5>
- [41] Tampé, J.F., Monni, E., Palma-Tortosa, S., Brogårdh, E., Böiers, C., Lindgren, A.G., *et al.* (2024) Human Monocyte Subtype Expression of Neuroinflammation- and Regeneration-Related Genes Is Linked to Age and Sex. *PLOS ONE*, **19**, e0300946. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300946>
- [42] Li, J., Zhan, Z., Zhang, Z., Wang, W., Xu, K. and Sun, W. (2024) Susceptibility Vessel Sign in Patients with Subacute Ischemic Stroke. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 3914-3922. <https://doi.org/10.21037/qims-23-1797>

- 
- [43] Pineau, R., Le Reste, P.J., Avril, T., Jarry, U., Chevet, E. and Pelizzari-Raymundo, D. (2024) Protocol to Generate Two Distinct Standard-Of-Care Murine Glioblastoma Models for Evaluating Novel Combination Therapies. *STAR Protocols*, **5**, Article ID: 103304. <https://doi.org/10.1016/j.xpro.2024.103304>
- [44] Grobe-Einsler, M., Bork, F., Faikus, A., Neggers, S.F.W. and Kaut, O. (2024) Feasibility of a Randomized, Sham-Controlled Pilot Study for Accelerated RTMs-Treatment of the Cerebellum Plus Physiotherapy in CANVAS Patients. *NeuroRehabilitation*, **54**, 691-698. <https://doi.org/10.3233/nre-240045>
- [45] Serra-Aracil, X., Pascua-Sol, M., Badia-Closa, J., Navarro-Soto, S., Navarro Soto, S., Sánchez Santos, R., *et al.* (2020) Cómo poner en marcha y desarrollar un estudio multicéntrico prospectivo, controlado y aleatorizado. *Cirugía Española*, **98**, 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.ciresp.2019.11.012>