

· 临床研究 ·

血流限制训练对前交叉韧带重建术后膝本体感觉及运动协调性的影响

施爱梅 郑琦 李小龙 顾旭东 姚云海 傅建明 金鑫

浙江省嘉兴市第二医院康复医学中心 314000

通信作者:顾旭东,Email:jxgxd@hotmail.com

【摘要】 目的 观察血流限制训练对前交叉韧带(ACL)重建术后患者膝关节本体感觉及运动协调性的影响。**方法** 将纳入的 30 例 ACL 重建术患者按随机数字表法分为对照组和治疗组,每组 15 例,2 组患者均给予常规康复训练,治疗组在此基础上辅以血流限制训练,训练过程中腹股沟部保持恒定压力以限制下肢血流,包括膝屈伸抗阻训练、蹲站训练、膝屈伸交替训练和功率自行车训练,每周 3 次,每次约 45 min,共治疗 8 周。分别于治疗前和治疗 8 周后(治疗后),采用 Lysholm 膝关节量表、Humac(Norm 型)等速测试仪评估系统以及表面肌电时序分析系统评定 2 组患者的膝关节功能、本体感觉及下肢运动协调功能。**结果** 治疗前,2 组患者 Lysholm 评分、膝重现角度差值及下肢运动协同收缩率组间比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。治疗后,治疗组和对照组患者的 Lysholm 评分[(87.06±5.16)分、(83.27±4.32)分]及膝重现角度差值[(4.13±1.12)°、(6.86±1.68)°]均较组内治疗前[治疗组(57.86±5.99)分 and (16.53±1.76)°;对照组(56.47±5.25)分 and (17.86±2.51)°]明显改善($P<0.05$),且治疗组明显优于对照组($P<0.05$)。治疗后,最大等长收缩过程中,治疗组患侧的伸展时协同收缩率(股二头肌/股外侧肌)为(30.26±5.95)%,较组内治疗前[(42.93±10.61)%]有明显改善($P<0.05$);治疗组患侧的屈曲时协同收缩率(股外侧肌/股二头肌)为(23.07±8.65)%,较组内治疗前[(36.94±12.62)%]明显改善($P<0.05$),且明显优于对照组治疗后[(30.36±6.38)%],组间差异有统计学意义($P<0.05$);而 2 组患侧与健侧比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。**结论** 血流限制训练可显著改善 ACL 重建术后患者膝关节功能、本体感觉及运动协调性。

【关键词】 血流限制训练; 前交叉韧带重建术; 本体感觉; 运动协调**基金项目:**浙江省医药卫生科技计划项目(2021KY1113)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.04.011

Blood flow restriction can improve knee proprioception and motor coordination after anterior cruciate ligament reconstruction

Shi Aimei, Zheng Qi, Li Xiaolong, Gu Xudong, Yao Yunhai, Fu Jianming, Jin Xin

Rehabilitation Medical Center, the Second Hospital of Jiaxing, Zhejiang Province, Jiaxing 314000, China

Corresponding author: Gu Xudong, Email: jxgxd@hotmail.com

【Abstract】 Objective To explore any effect of blood flow restriction during exercise on knee proprioception and motor coordination after anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction. **Methods** Thirty patients recovering from ACL reconstruction were randomly divided into an experimental group and a control group, each of 15. Both groups were given routine rehabilitation training, while the experimental group was additionally provided with 45 minutes of training with blood flow restriction, 3 times a week for 8 weeks. The blood flow restriction training involved constant pressure in the groin while the patient performed knee flexion and extension resistance training, squats, alternate knee flexion and extension and ergometer cycling. Before and after the intervention, both groups' knee function, proprioception and lower limb motor coordination were evaluated using the Lysholm knee scale, the Humac isokinetic measurement system and surface electromyography. **Results** Before the experiment there were no significant differences between the two groups in any of the measurements. After the intervention, both groups' average Lysholm score had improved significantly, and errors in reproducing a knee angle had decreased significantly. Significantly better improvement was observed in the observation group than in the control group. That group's average coordinated contraction rate on the affected side in extension and flexion was also significantly better than the control group's average. Indeed, there were no significant differences in the contraction rates between the healthy and affected sides. **Conclusions** Training with restricted blood flow can significantly improve knee function, proprioception and motor coordination after anterior cruciate ligament reconstruction.

【Key words】 Blood flow restriction; Anterior cruciate ligament reconstruction; Proprioception; Motor coordination

Funding: A Zhejiang Province Medical and Health Science and Technology Project (2021KY1113)
DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.04.011

膝关节前交叉韧带 (anterior cruciate ligament, ACL) 损伤是临床上较常见的运动损伤, ACL 损伤后患者发生膝关节不稳, 导致膝关节无法正常活动。ACL 重建术可恢复膝关节生理解剖结构, 但遗留膝关节神经肌肉功能下降^[1]、动态关节不稳^[2]等问题, 其中膝关节稳定性是患者站立及步行的基础, 而膝关节本体感觉是膝稳定性的重要影响因素之一^[3]。因此, 增加膝本体感觉, 提高膝稳定性对 ACL 重建术患者的运动功能恢复具有重要意义。

近年来, 血流限制训练 (blood flow restriction) 作为康复训练的一种新方法, 其对膝关节术后患者的疗效已被证实^[4], 但采用血流限制训练对 ACL 重建术患者膝关节本体感觉及运动协调功能进行干预的研究鲜见报道。基于此, 本研究对 30 例 ACL 重建术患者进行血流限制训练, 并观察该训练对患者膝关节本体感觉及运动协调功能的影响。

对象与方法

一、研究对象及分组

入选标准: ① ACL 断裂, 并经关节镜 ACL 重建术后; ② 采用移植自体半腱肌肌腱和股薄肌肌腱, 如有半月板损伤, 行半月板修补术; ③ 年龄 18~50 岁; ④ 由同一组医生手术; ⑤ 意识清楚, 依从性好; ⑥ 签署知情同意书。

排除标准: ① 合并心、肝、肾等重要脏器损害, 恶性肿瘤等疾病; ② 伴有下肢严重骨质疏松、震颤、骨折、疼痛、深静脉血栓等; ③ 既往有颅脑外伤、其它颅内疾病等; ④ 意识障碍; ⑤ 精神障碍者; ⑥ 既往有膝关节手术史; ⑦ 既往有癫痫病史, 体内有金属植入; ⑧ 未按要求完成康复训练者。本研究获浙江省嘉兴市第二医院伦理学委员会审批 (JXEY-2021SW088)。

选取 2021 年 1 月至 2021 年 11 月嘉兴市第二医院康复医学中心收治且符合上述标准的 ACL 重建术患者 30 例, 采用随机数字表法将 30 例患者分为对照组和治疗组, 每组 15 例, 2 组患者的性别、平均年龄、平均体重指数 (mean body mass index, BMI)、手术侧别

等一般临床资料经统计学分析比较, 组间差异均无统计学意义 ($P>0.05$), 具有可比性。具体数据详见表 1。

二、训练方法

入选患者均由同一组高年资医生在关节镜下行半腱肌与股薄肌肌腱重建 ACL 手术, 术后对照组接受常规康复治疗, 治疗组在常规康复治疗的基础上辅以血流限制训练。2 组患者康复训练时疼痛的目测类比法 (visual analogue scale, VAS) 评分均控制在 6 分以内。

1. 常规康复训练: ① 第 0~2 周康复方案, 包括可调节卡盘盘具锁定 0° 伸直位固定、抬高患肢、被动活动髋骨、直腿抬高训练、腓绳肌等长训练、踝泵训练、被动屈曲膝关节训练 ($<90^\circ$)、股四头肌等长收缩 (每个 10 s, 30 个/组, 2 组/次, 3 次/日); ② 第 3~4 周康复方案, 抗阻踝泵训练、终末端伸膝肌力训练、被动屈膝 0~100° 训练、主动屈膝训练 (接近 90°); ③ 第 5~8 周康复方案, 开始增加患肢负重训练、股四头肌抗组训练、腓绳肌抗阻训练、静蹲训练、平衡板训练、上下楼梯训练、步行训练等。上述训练每次 40 min, 每日 1 次, 每周 5 d, 共训练 8 周。

2. 血流限制训练: 患者取仰卧位, 将血流限制带 (血压计袖带) 固定在患侧大腿最近端 (腹股沟皱襞区), 采用彩色多普勒超声显像诊断仪 (Philips HD11XE 型, 荷兰), 将 3.8 MHz 探头安置于内踝后缘与跟腱之间的中点处, 对下肢动脉进行闭塞压检测。患者适应血流限制带后, 对血流限制带不断加压, 直到超声提示彩色流模式动脉搏动消失, 超声探头检测不到动脉血流, 此压力即为最小完全动脉闭塞压 (arterial occlusion pressure, AOP)。本研究患者的 AOP 为 (197.39 ± 16.52) mmHg ($1\text{ mmHg}=0.133\text{ kPa}$), 血流限制按照个体 AOP 的 60% 设置 (116 ± 7) mmHg。术后第 15 天患者开始进行血流限制训练, 在训练结束时解除袖带压力。

训练内容包括: ① 第 3~4 周, 膝屈伸抗阻训练 (第一组 30 次, 第二组 15 次, 完成 2 组, 训练时借助沙袋); ② 第 5~8 周, 在上阶段基础上增加双下肢屈膝 30° 蹲站训练 (每组 5 min, 完成 2 组)、膝屈伸交替训练

表 1 2 组患者的一般临床资料

组别	例数	性别 (例)		平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	手术侧别 (例)		平均 BMI (kg/m^2 , $\bar{x}\pm s$)
		男	女		左侧	右侧	
对照组	15	11	4	38.67 $\pm$ 7.41	7	8	23.74 $\pm$ 3.44
治疗组	15	12	3	37.16 $\pm$ 5.73	6	9	24.16 $\pm$ 2.35

(站立位下蹲至屈膝 0~15°, 每组 10 个, 完成 2 组)、功率自行车训练(10 min)。所有训练项目均以 30% 的最大重复次数(repetition maimum, 1RM)强度进行训练。每个项目训练结束后休息 5 min, 休息时嘱患者仰卧位, 每 2 周重新评估患者 1RM 水平。上述训练每次 45 min, 每周 3 次, 训练至术后第 8 周结束。

三、观察及评估指标

分别于治疗前和治疗 8 周后(治疗后), 对 2 组患者的膝关节功能、本体感觉及运动协调性进行评估。

1. Lysholm 量表评分: 该量表用于评估受试者的膝关节功能^[5], 内容包括疼痛(0~25 分)、跛行(0~5 分)、支持(0~5 分)、交锁(0~15 分)、不稳定(0~25 分)、肿胀(0~10 分)、上楼(0~10 分)、下蹲(0~5 分)共 8 个方面, 总分 0~100 分, 得分越高表示患者膝关节功能越好。

2. 膝重现角度差值: 采用 Humac 等速测试仪(Norm 型, 美国 CSMI 公司)评估系统^[6]评估 2 组患者的膝关节本体感觉(角度复位方法), 在温度适宜且舒适的环境下, 受试者坐在测试座椅上, 保持髋和膝关节 90°屈曲, 用固定带固定上身、腰部、大腿部、踝部, 仅留膝关节屈伸活动, 最大程度减少身体其它部位的运动, 阻力垫放在踝关节略上方, 旋转轴与膝关节旋转轴对齐, 参数设置无阻力下屈伸膝关节, 测试设定膝关节目标位置膝屈曲 45°, 先以角速度 2(°)/s, 患者膝关节移动到目标位置, 嘱患者感知关节停留位置 10 s 后, 膝关节恢复到屈 90°初始位置, 休息 10 s 后, 要求患者主动运动至先前停留的位置, 记录实际角度。计算实际角度和目标角度的差值。

3. 运动协调性: 采用肌电图仪器(FlexComp-10018 型)记录表面肌电信号, 测试下肢运动协调收缩比率, 选取股外侧肌和股二头肌作为股四头肌和腘绳肌的代表^[7]。测定前, 取酒精棉片对局部皮肤进行脱脂, 将采集电极固定于患侧股骨大转子到髌骨外援连线下 1/3 处和坐骨结节到腓骨头连线中点处。设置频率 1000 Hz, 电极间距 2.5 cm, 带通滤波 20~500 Hz, 噪声水平<5 V。嘱患者进行膝关节屈伸等长收缩运动和下蹲运动, 即在屈膝 75°位进行膝关节伸肌和屈肌最大等长收缩力量和膝关节屈伸交替运动, 测试 3 次, 每次 6 s, 间歇 30 s, 并记录运动过程中的 sEMG 信号。该系统将采集到的 sEMG 信号传入计算机, 通过 Bio-Graph Infiniti 软件处理, 所得数据经过整流(rectification)和平滑(smoothing)处理。平滑采用均方根(root mean square, RMS)公式计算, 时间窗设为 50 ms。数值选取等长收缩的中间 3 s 进行 sEMG 信号分析, 3 次最大等长收缩的 sEMG 信号取均值进行分析^[8]。分析指标为股外侧肌和股二头肌的 sEMG 振幅均值。

四、统计学方法

使用 SPSS 20.0 版统计软件包对数据进行统计学分析处理, 计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示, 所得数据均经正态分布及方差齐性检验, 计量资料比较采用 *t* 检验, 计数资料比较采用 χ^2 检验。*P*<0.05 认为差异有统计学意义。

结 果

一、2 组患者治疗前后 Lysholm 评分及膝重现角度差值比较

治疗前, 2 组患者 Lysholm 评分及膝重现角度差值组间比较, 差异均无统计学意义(*P*>0.05); 治疗后, 2 组患者的 Lysholm 评分及膝重现角度差值均较组内治疗前明显改善(*P*<0.05), 且治疗组显著优于对照组(*P*<0.05), 具体数据详见表 2。

表 2 2 组患者治疗前后 Lysholm 及膝重现角度差值比较 ($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	Lysholm(分)	膝重现角度差值(°)
对照组			
治疗前	15	56.47±5.25	17.86±2.51
治疗后	15	83.27±4.32 ^a	6.86±1.68 ^a
治疗组			
治疗前	15	57.86±5.99	16.53±1.76
治疗后	15	87.06±5.16 ^{ab}	4.13±1.12 ^{ab}

注: 与组内治疗前比较, ^a*P*<0.05; 与对照组治疗后比较, ^b*P*<0.05

二、2 组患者治疗前后运动协调性比较

治疗前, 2 组患者伸展时协同收缩率及屈曲时协同收缩率组间差异均无统计学意义(*P*>0.05)。治疗后, 伸展时治疗组患侧的协调收缩率(伸展时股二头肌/股外侧肌), 较组内治疗前有明显改善(*P*<0.05), 但与健侧差异无统计学意义(*P*>0.05); 治疗后, 屈曲时治疗组患侧的协调收缩率(屈曲时股外侧肌/股二头肌)亦较组内治疗前显著改善(*P*<0.05), 且明显优于对照组(*P*<0.05), 但与健侧差异亦无统计学意义(*P*>0.05)。具体数据详见表 3。

讨 论

ACL 重建术后遗留关节功能性稳定问题, 是目前康复治疗中的热门研究课题^[9]。众所周知, 关节结构、韧带、周围肌肉力量、本体感觉是关节稳定的重要组成部分。研究证实, ACL 损伤后直接导致膝关节本体感觉功能减弱, 进而影响膝关节运动功能及稳定性, 使患者发生再次损伤的风险增加^[10]。膝关节本体感觉主要由周围肌肉、肌腱、关节囊、韧带、半月板和皮肤感受器等发出的信号整合而成, 其中肌肉和关节感受器是主要信号来源^[11]。ACL 存在大量本体感受器, 并参与关节运动及神经肌肉控制。ACL 损伤后, 由于

表 3 2 组患者治疗前、后运动协调性比较(%, $\bar{x}\pm s$)

组别	例数	伸展时协同收缩率(股二头肌/股外侧肌)		屈曲时协同收缩率(股外侧肌/股二头肌)	
		患侧	健侧	患侧	健侧
治疗组					
治疗前	15	42.93±10.61	29.12±7.21	36.94±12.62	22.62±14.51
治疗后	15	30.26±5.95 ^a	28.82±5.42	23.07±8.65 ^{ab}	21.12±8.32
对照组					
治疗前	15	41.86±10.68	32.47±9.83	37.08±10.26	21.19±12.17
治疗后	15	34.66±8.91	30.13±6.12	30.36±6.38 ^a	20.87±10.23

注:与组内治疗前比较,^a $P<0.05$;与对照组治疗后比较,^b $P<0.05$

ACL 的本体感觉信息中断,ACL 重建术后的干扰,以及膝关节持续疼痛和渗出刺激,造成了膝关节感受器在传输过程中高级中枢和运动神经元的控制发生改变^[12],导致患者运动时神经肌肉控制能力不足,关节功能性稳定下降。Lephart 等^[13]研究认为,运动训练必须以刺激关节和肌肉感受器为目标,渗透到康复活动的早期,根据患者的进步逐渐增加训练难度,增强关节本体感觉意识,重建肌肉反射性稳定状态,阻止运动损伤的再发生。李小金等^[14]研究表明,通过对膝关节周围肌肉进行训练,可刺激肌肉、肌腱中的感受器,增加感觉输入;通过膝关节平衡、负重、屈伸训练能增加本体感觉输入,从而良好的改善膝关节的神经肌肉控制力、动态平衡、稳定性^[15]。

血流限制训练又称 Kaatsu 训练或加压肌力训练,是一种使用止血带或充气加压带对上臂或大腿近端进行外部加压来限制远端肢体血流,并结合相对较小的运动强度以刺激肌肉生长、提高肌肉适应性的训练方法^[16],目前血流限制训练已应用于康复领域的多个方面。研究证实,血流限制训练能减轻膝骨性关节炎患者的疼痛及改善下肢肌力^[17],增加髌股关节痛患者的髌股关节接触面积、减少疼痛^[18],加强全膝关节置换术后患者的股四头肌肌力^[19],增加 ACL 重建术患者股四头肌力量及横截面积^[20]。总之,血流限制训练具有良好的优势,并对膝关节功能恢复具有积极作用。

本研究结果显示,治疗组经 8 周血流限制训练后,患者的膝关节 Lysholm 评分、膝重现角度差值、协调收缩率均明显改善,且优于对照组($P<0.05$),表明血流限制训练能有效改善 ACL 重建术后患者的膝关节功能、本体感觉及运动协调性,且疗效优于常规康复治疗。其作用机制包括:①恒定的压力使下肢血流受到限制,下肢远端肌肉组织局部缺氧及乳酸堆积^[21],乳酸浓度升高,组织 pH 值降低,刺激交感神经和下丘脑-垂体系统,导致生长激素水平急速升高^[22],生长激素促进肌肉蛋白质合成^[23],诱导肌肉肥大,防止肌肉萎缩;②屈伸膝关节抗阻训练能快速募集Ⅱ型肌纤维^[24],增强股四头肌、腓绳肌的肌力,并刺激肌肉、肌腱感受器,增加感觉信号输入,不断向机体反馈运动感

觉及运动加速度,强化运动与感觉调控能力,改善膝关节稳定性,促进神经肌肉控制能力的恢复;③蹲站可使膝关节保持负重状态,刺激关节内感受器,增加感觉信号输入,提高本体感觉^[25];屈肌和伸肌保持等长收缩状态,股四头肌力量增强^[26]及屈伸协同收缩能力得到强化,促进协同收缩达到平衡,从而改善运动协调性;④下蹲屈膝交替训练能使膝关节位置发生不断的交替变化,提高运动感知能力,强化本体感觉输入,增强平衡及姿势调控能力,促进膝关节稳定性恢复,并且在运动中股四头肌和腓绳肌协调收缩能力得到充分训练,屈肌和伸肌协调收缩能力增强,从而改善膝关节稳定性及运动控制能力;⑤功率自行车训练可以提供交替协调的闭链运动及下肢肌肉的离心性收缩,可增加下肢肌力及耐力^[27],在血流限制下双下肢得到对称性训练,减少了手术腿和非手术腿肌力的不对称性,还能增强膝、踝、髌关节的稳定性与协调性,促进下肢运动协调性及膝关节功能恢复。

据报道,压力值和阻力负荷的确定是血流限制训练方案的重点^[28]。Patterson 等^[29]研究显示,采用 40%~80%的静息肢体闭塞压进行血流限制训练是安全有效的;Lixandrão 等^[30]研究指出,血流限制结合 20%~40%的 1RM 低强度抗阻训练可有效增加肌肉体积和力量,达到高强度抗阻训练相似的效果。本研究设计的压力值和阻力负荷均符合以往研究所述。

Nielsen 等^[31]研究表明,局部血流受限的情况下进行短期、高频、低负荷肌肉训练不会引起明显的肌肉损伤,这与本研究结果一致。本研究亦未发现患者在血流限制训练后出现下肢肌肉损伤等情况,提示血流限制训练在 ACL 重建术患者应用中是安全有效的。

综上所述,血流限制训练可有效改善 ACL 重建术后患者的膝关节功能、本体感觉及运动协调性,促进膝关节稳定性及运动功能的全面恢复,且疗效显著。但由于样本量少,未长期观察,因此,对血流限制训练的治疗效果尚有待进一步的深入研究。

参 考 文 献

[1] 吴术红,刘毅,张亦南.前交叉韧带重建后本体感觉的改变及康复[J].中国组织工程研究与临床康复,2009,13(50):9962-9965.

- DOI:10.3969/j.issn.1673-8225.2009.50.034.
- [2] 付常喜,陈现超.本体感觉训练对前交叉韧带损伤重建术后患者运动功能的影响研究[J].中国学校体育(高等教育),2017,4(7):82-86.
 - [3] 郑琦,施爱梅,傅建明,等.膝关节控制训练对急性期脑梗死患者膝本体感觉及下肢运动功能的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2020,42(10):929-930. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.10.017.
 - [4] Tennent DJ, Hylden CM, Johnson AE, et al. Blood flow restriction training after knee arthroscopy: a randomized controlled pilot study[J]. Clin J Sport Med, 2017, 27(3): 245-252. DOI: 10.1097/JSM.0000000000000377.
 - [5] 林恺,包良笑,李小丹,等.中文版牛津膝关节量表评估全膝关节置换术前患者膝关节功能的信度和效度[J].中华骨科杂志,2017,37(19):1208-1205. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-2352.2017.19.004.
 - [6] 郑光新,赵晓鸣,常智跃,等.等速运动系统测试膝关节本体感觉功能的信度研究[J].中华物理医学与康复杂志,2013,35(8):609-611. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2013.08.004.
 - [7] Hortobágyi T, Westerkamp L, Beam S, et al. Altered hamstring-quadriceps muscle balance in patients with knee osteoarthritis[J]. Clin Biomech, 2005, 20(1): 97-104. DOI:10.1016/j.clinbiomech.2004.08.004.
 - [8] 俞晓杰,吴毅,胡永善,等.膝关节骨关节炎患者膝屈伸肌的表面肌电信号研究[J].中华物理医学与康复杂志,2006,28(6):402-405. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2006.06.013.
 - [9] 吴华,杨翼,顾旭东,等.本体感觉强化训练对前交叉韧带重建后功能恢复的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2014,36(4):291-294. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2014.04.013.
 - [10] 郝永红,刘宏丽,孙鸿安,等.本体感觉强化训练在前交叉韧带重建术后康复中的应用[J].中华物理医学与康复杂志,2013,35(5):398-399. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2013.05.019.
 - [11] 李作为,徐向阳.踝关节稳定性与本体感受器[J].国际骨科学杂志,2009,30(1):21-22. DOI:10.3969/j.issn.1673-7083.2009.01.007.
 - [12] Bonfim TR, Jansen PCA, Barela JA. Proprioceptive and behavior impairments in individuals with anterior cruciate ligament reconstructed knees[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2003, 84(8): 1217-1223. DOI: 10.1016/S0003-9993(03)00147-3.
 - [13] Lephart SM, Henry TJ. The physiological basis for open and closed kinetic chain rehabilitation for the upper extremity[J]. J Sport Rehab, 1996, 5(1): 71-87.
 - [14] 李小金,韩秀兰,田潇飞,等.脑卒中后偏瘫患者早期膝关节本体感觉干预对平衡功能及心理状态的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2016,38(11):845-847. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2016.11.012.
 - [15] 刘文权,胡庆中,周慧怡,等.早期强化本体感觉训练对前交叉韧带重建术后下肢运动控制的影响[J].中华生物医学工程杂志,2021,27(1):25-29. DOI:10.3760/cma.j.cn115668-2020360.
 - [16] Abe T, Kearns CF, Filho HCM, et al. Muscle, tendon, and somatotropin responses to the restriction of muscle bloodflow induced by KAATSU-walk training[J]. Equine Vet J Suppl, 2006, (36): 345-348. DOI:10.1111/j.2042-3306.2006tb05566.x.
 - [17] Segal N, Davis MD, Mikesky AE. Efficacy of blood flow restricted low-load resistance training for quadriceps strengthening in men at risk of symptomatic knee osteoarthritis[J]. Geriatr Orthop Surg Rehabil, 2015, 6(3): 160-167. DOI:10.1177/2151458515583088.
 - [18] Giles L, Webster KE, McClelland J, et al. Quadriceps strengthening with and without blood flow restriction in the treatment of patellofemoral pain: a double-blind randomized trial[J]. Br J Sports Med, 2017, 51(23): 1688-1694. DOI: 10.1016/j.jsams.2017.01.081.
 - [19] Gaunder CL, Hawkinson MP, Tennent DJ, et al. Occlusion training: pilot study for postoperative lower extremity rehabilitation following primary total knee arthroplasty[J]. US Army Med Dep J, 2017, (2-17): 39-43.
 - [20] Ohta H, Kurosawa H, Ikeda H, et al. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. Acta Orthop Scand, 2003, 74(1): 62-68. DOI: 10.1080/00016470310013680.
 - [21] Takano H, Morita T, Iida H, et al. Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow[J]. Eur J Appl Physiol, 2005, 95(1): 65-73. DOI: 10.1007/s00421-005-1389-1.
 - [22] Takarada Y, Nakamura Y, Aruga S, et al. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion[J]. J Appl Physiol, 2000, 88(1): 61-65. DOI: 10.1152/jappl.2000.88.1.61.
 - [23] Kraemer WJ, Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training[J]. Sports Med, 2005, 35(4): 339-361. DOI: 10.2165/00007256-200535040-00004.
 - [24] Takarada Y, Takazawa H, Sato Y, et al. Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans[J]. J Appl Physiol, 2000, 88(6): 2097-2106. DOI: 10.1152/jappl.2000.88.6.2097.
 - [25] 戚红亮.早期强化膝关节控制训练对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能的影响分析[J].中国当代医药,2015,22(10):61-63.
 - [26] Kilgas MA, Lytle LLM, Drum SN, et al. Exercise with blood flow restriction to improve quadriceps function long after ACL reconstruction[J]. Int J Sports Med, 2019, 40(10): 650-656. DOI: 10.1055/a-0961-1434.
 - [27] 吴华,李岩,顾旭东,等.功率自行车运动训练对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能及步行能力的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2011,33(8):599-601. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2011.08.010.
 - [28] 苏明莉,刘西纺,张葆欣,等.血流限制训练在膝关节功能康复中的应用现状[J].中国康复医学杂志,2021,36(3):375-382. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2021.03.025.
 - [29] 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. DOI: 10.1136/bjsports-2017-097738.
 - [30] Lixandrão ME, Ugrasowitsch C, Berton R, et al. Magnitude of muscle strength and mass adaptations between highload resistance training versus low-load resistance training associated with blood-flow restriction: a systematic review and meta-analysis[J]. Sports Med, 2018, 48(2): 361-378. DOI: 10.1007/s40279-017-0795-y.
 - [31] Nielsen JL, Aagaard P, Prokhorova TA, et al. Blood flow restricted training leads to myocellular macrophage infiltration and up regulation of heat shock proteins, but no apparent muscle damage[J]. J Physiol, 2017, 595(14): 4857-4873. DOI: 10.1113/jp273907.

(修回日期:2023-03-29)

(本文编辑:汪 玲)