



# 血流限制训练在康复医学中的应用进展

## Application Progress of Blood Flow Restriction Training in Rehabilitation Medicine

唐小蝶<sup>1</sup>,袁淑娟<sup>2\*</sup>

TANG Xiaodie<sup>1</sup>, YUANG Shujuan<sup>2\*</sup>

**摘要:**对血流限制训练相关研究进行综述,介绍了血流限制训练的特点及作用机制。血流限制训练通过对肢体近心端进行部分血管阻断,诱导缺氧和代谢效应,以及减少肌肉蛋白质水解和诱导合成代谢过程,促进肌细胞蛋白合成、刺激肌细胞生长和提高肌肉力量。此外,重点叙述了其在肌肉骨骼系统疾病、特发性炎症性肌病、心脏疾病、慢性肾脏疾病、脊髓损伤以及糖耐量减低、帕金森病和脑室周围白质软化症、肥胖、肿瘤恶病质、多发性硬化等患者康复中的应用研究进展。

**关键词:**血流限制训练;加压训练;康复

**Abstract:** By summarizing the research on blood flow restriction training, this study aims to introduce the characteristics and mechanism of blood flow restriction training. Blood flow restriction training can promote myocyte protein synthesis, stimulate myocyte growth and improve muscle strength by partially blocking blood vessels at the proximal end of the limb, inducing hypoxia and metabolic effects, reducing muscle proteolysis and inducing anabolic processes. In addition, this study focuses on the research progress of its application in the rehabilitation of patients with musculoskeletal system diseases, idiopathic inflammatory myositis, heart diseases, chronic kidney disease, spinal cord injury, impaired glucose tolerance, Parkinson's disease and periventricular leukinomalacia, obesity, tumor cachexia, multiple sclerosis, etc.

**Keywords:** blood flow restriction training; KAATSU training; rehabilitation

**中图分类号:**G804.5 **文献标识码:**A

血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT)又称加压训练(KAATSU training),是日本学者在1983年提出的以低负荷训练刺激肌细胞生长、提高肌力的训练方法(周威等,2020)。肌纤维增粗、增长至少需要2天/周、70%~80% 1RM(1 repetition maximum, 1次重复最大力量)的高负荷抗阻训练(Garber et al., 2011),而在肌损伤、长期卧床、高龄等人群中高负荷训练是相对禁忌的。BFRT与高负荷训练产生类似的增肌效果(Vopat et al., 2020),因此BFRT可作为上述人群的替代疗法。近年来,BFRT逐渐应用于运动损伤、肌骨疼痛、慢性疾病等康复领域(王牧,2020)。本文就BFRT的特点、机制及其在康复治疗中的最新应用进行阐述。

### 1 血流限制训练的特点及作用机制

#### 1.1 血流限制训练的特点

BFRT是指在训练期间通过充气袖带或弹性绷带等加压装置对肢体近心端进行加压,闭塞静脉及部分动脉血流以提升训练效果的新型训练方法。其主要特点是以低负荷运动促进肌细胞蛋白质合成、刺激肌细胞生长和提高肌力(Centner et al., 2019a)。

#### 1.2 血流限制训练的作用机制

BFRT可促进肌细胞蛋白质合成,刺激肌肉生长,但其机制仍不完全清楚,目前被认可

#### 第一作者简介:

唐小蝶(1994-),女,在读硕士研究生,主要研究方向为血流限制训练,E-mail:tangxiaodie0613@163.com。

#### \*通信作者简介:

袁淑娟(1974-),女,主任医师,硕士研究生导师,主要研究方向为运动损伤康复,E-mail:957075000@qq.com。

#### 作者单位:

1.山西医科大学,山西太原030001;  
2.山西医科大学第一医院,山西太原030001  
1. Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China;  
2. The First Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China.

的观点有:1)肌肉在缺血状态下可产生活化运动单位,快肌纤维募集增强(Wernbom et al., 2020);2)肌肉内代谢物累积刺激生长激素(growth hormone, GH)和胰岛素样生长因子-1(insulin-like growth factor-1, IGF-1)分泌(罗若营等, 2020);3)合成肌肉蛋白的信号通路加强,水解蛋白的相关基因表达降低(Bjørnsen et al., 2019; Centner et al., 2019b);4)肌抑素浓度降低,肌肉内的干细胞数量增多等(Nielsen et al., 2012)。

### 1.3 血流限制训练的方式及强度

BFRT 通常采用充气袖带或弹性绷带等给予肢体远端适当的压力,同时结合卧推、深蹲、步行、蹬车等进行训练。

研究表明,短时高频的 BFRT 在提高肌力、增加肌肥大方面是有效的(陆锦华, 2020),通常选择 40%~80% 的静息动脉血流闭塞压、训练负荷为 20%~40% 1RM、训练量 75 次左右,组间间歇为 30~60 s, 2~3 次/周的训练。

## 2 血流限制训练在康复医学中的应用

### 2.1 肌肉骨骼系统疾病

肌肉骨骼系统疾病可引起肌纤维短缩、肌氧化能力减少、肌顺应性下降(Hughes et al., 2017; Slys et al., 2016)。增加肌肉质量及力量,训练负荷一般需要高于 70% 1RM。BFRT 结合低负荷抗阻训练,既能增加肌肉质量和力量,又能避免高负荷训练加重肌肉骨骼系统疾病患者肌肉损伤、疼痛等(DePhillipo et al., 2018)。

#### 2.1.1 髌股关节痛

髌股关节痛多与股四头肌萎缩有关。常规股四头肌训练可减轻患者的髌前痛,提高髌股关节的稳定性,但也可导致患者疼痛加剧(Petersen et al., 2017)。Giles 等(2017)将 79 名髌股关节痛患者随机分为常规组和 BFRT 组。BFRT 组以 30% 1RM、60% 袖带压力进行 3 次/周为期 8 周的股四头肌训练。常规组不加袖带进行同样训练。结果表明,BFRT 在减轻髌前痛和增强股四头肌肌力方面比常规训练更有效。

#### 2.1.2 跟腱断裂

Yow 等(2018)对 2 名左跟腱断裂患者进行 BFRT,1 名患者在为期 5 周的股四头肌 BFRT 后,跖屈能力得到很大改善,可独立行走;另 1 名患者在为期 6 周的股四头肌 BFRT 后,恢复了运动功能。BFRT 使 2 名跟腱断裂患者以更小的负荷、在更短的时间内实现肌力和耐力的增加,弥补了传统康复不能早期快速有效提高肌力导致跟腱功能恢复不足的缺陷,因此,跟腱断裂术后宜早期进行 BFRT。

#### 2.1.3 膝关节术后

膝关节术后患者需要 4~6 个月后才能进行高负荷训练,通常会造患者肌萎缩,甚至功能障碍(Kilgas et al., 2019)。Tennent 等(2017)将 17 例膝关节镜术后 2 周的患者随机分为 BFRT 组和对照组,两组都给予 12 次物理治

疗,BFRT 组额外给予 4 组 75 次腿推举、腿伸展、反向压腿的 BFRT,训练后 BFRT 组的定时爬楼梯、步行速度等指标较对照组均有显著改善,膝伸展和屈曲活动度的改善大约是对照组的 2 倍。张林玲等(2020)将 78 例膝关节微创术后患者随机分为 BFRT 组和对照组,对照组术后 3 周根据患者情况进行膝关节周围肌力训练,BFRT 组在对照组训练基础上进行 BFRT。3 个月后,BFRT 组伸膝肌力、关节活动度、Lysholms 评分明显升高,下肢瘀斑或肿胀、慢性疼痛发生的比率降低,且均优于对照组。以上结果表明,低负荷 BFRT 是膝关节术后早期有效的肌肉训练方式。

#### 2.1.4 膝骨关节炎

Ferlito 等(2020)发现,在膝骨关节炎患者中,低负荷 BFRT 在减轻膝关节疼痛和改善膝关节功能方面与高负荷抗阻训练产生的效果相似;与低负荷训练相比,BFRT 在增加肌肉体积和力量方面更加有效。

#### 2.1.5 肌少症

肌少症是肌肉质量和功能加速丧失的一种进行性、全身性骨骼肌疾病,可增加跌倒、身体功能下降和死亡风险(Cruz-Jentoft et al., 2019),常发于高龄、机械负荷减少及癌症、肝硬化、慢阻肺等慢性疾病患者中(Bauer et al., 2019)。肌少症患者通常无法进行高强度的运动,因此需要替代性的运动策略,以增加肌肉力量和质量。研究表明,BFRT 可以有效防止伤病卧床或制动期间由于长时间处于无负荷状态造成的废用性肌萎缩(Kubota et al., 2008)。Lopes 等(2019)对 1 例肌少症患者进行 3 次/周为期 3 月的肘屈伸、腿推举等训练,休息 1 个月在之前的训练基础上限制血流,结果表明,低强度 BFRT 促进了 IGF-1、血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF) mRNA 的表达,从而提高患者肌肉质量和力量,并改善血管内皮功能。Libardi 等(2017)研究结果显示,BFRT 对收缩压、舒张压和心率方面的影响明显低于常规运动。因此,肝硬化肌少症患者进行 BFRT,可改善其肌肉力量和质量的同时,有可能避免门脉高压和静脉曲张出血风险。未来低负荷 BFRT 有望成为肌少症患者提高肌力安全有效的治疗措施。

#### 2.1.6 肌骨疼痛

肌骨疼痛是人体肌肉、肌腱、韧带和骨骼的疼痛总称。赵彦等(2020)通过 Meta 分析发现,长期及短期的 BFRT 在改善肌骨疼痛方面均显著优于高强度训练,此外,长期的 BFRT 还优于常规物理治疗。BFRT 已逐渐应用于骨折术后疼痛、筋膜疼痛综合征、类风湿性关节炎等疾病的康复中,但其在改善肌骨疼痛方面的机制仍不清楚。Korakakis 等(2018)认为,BFRT 改善肌骨疼痛可能与条件性疼痛调节及内源性镇痛物质释放和组织缺氧有关。

#### 2.1.7 骨代谢

Bittar 等(2018)通过 Meta 分析发现,低强度运动结合 BFRT 对骨代谢有积极作用,其机制可能是静脉闭塞导致

的髓内压力升高,增加了骨特异性碱性磷酸酶等骨形成标记物的表达,抑制了I型胶原交联氨基末端肽等骨吸收标记物的表达,并激活缺氧诱导因子,从而增加VEGF的表达和骨组织微血管的形成。叶琼(2018)将80例受试者(55~75岁老年男性)随机分为对照组、BFRT组、振动训练组、振动训练搭配BFRT组,所有受试者进行4次/周期36周的深蹲、腿举等训练,结果显示,长期BFRT和振动训练均可改善下肢骨密度,振动训练搭配BFRT对于下肢肌力和骨密度的改善则更为明显,振动训练搭配BFRT能够更有效地刺激体内IGF-1和GH的分泌,从而刺激骨组织生长,在停止训练后也能较长时间维持体内骨密度。因此,BFRT可作为改善老年人骨密度的新训练方式。

## 2.2 特发性炎症性肌病

特发性炎症性肌病是以近端肌无力、下肢远端肌肉功能损害为特征的一种疾病,包括多发性肌炎、皮肌炎和包涵体肌炎(Corrado et al., 2020)。Mattar等(2014)对13例非活动性多发性肌炎和皮肌炎患者进行2次/周期12周的限制血流的屈膝、伸膝训练,患者不但病情未加重,而且股四头肌横截面显著增加,肌力和其生活质量得到极大改善。Jørgensen等(2018)将22例包涵体肌炎患者随机分为BFRT组和非运动对照组,BFRT组进行2次/周期12周的膝关节屈伸、负重提踵、踝背屈等训练。结果显示,非运动对照组腿部肌力下降9.2%,而BFRT组无下降。表明BFRT可预防包涵体肌炎患者的肌力下降,且不引起疾病进展。BFRT有望成为特发性炎症性肌病新的治疗方法,但其机制有待进一步阐明。

## 2.3 心脏疾病

Shimizu等(2016)研究表明,低负荷BFRT增加VEGF和GH表达,VEGF诱导内皮细胞增殖和迁移,加速骨骼肌和皮肤中的血管生成,改善血管内皮功能和外周血循环。谭朝文等(2020)将60只4周龄原发性高血压大鼠随机分为对照组、高负荷训练组、低负荷训练组和低负荷加压训练组。低负荷加压训练组降低了血液中内皮素-1(endothelin-1, ET-1)的表达、升高了血液中VEGF、一氧化氮合成酶(nitric oxide synthase, NOS)及心肌中内皮型NOS的表达,从而改善血管内皮功能,降低血压,且降压效果优于单纯低负荷训练组。Naderi-Boldaji等(2018)研究显示,血管损伤的老年雄性大鼠进行BFRT,可增加VEGF表达,诱发信号级联反应从而增加微血管形成。心肌微血管数量的增加,一方面使肥厚心肌细胞充分的微血管适应,另一方面使氧需求/供应匹配适当,从而改善老年大鼠的心脏性能。

## 2.4 慢性肾脏疾病

慢性肾脏病晚期患者的死亡率与肌肉功能减退密切相关(Isoyama et al., 2014)。Cardoso等(2020)将66例行血液透析患者随机分为BFRT组、常规训练组、对照组,训练前、后分别采用胸腰椎测力仪和6 min步行实验测定力

量和步行耐力。结果表明,12周的BFRT比常规训练更有效地改善步行耐力,同时提高慢性肾病患者血液透析充分性、运动能力及肌力。分析其中机制,这与BFRT造成缺氧反应,引起肌内pH值降低和乳酸积累,从而产生更高的代谢应激,导致更强的生理适应有关。BFRT改善了与肾脏疾病患者死亡率密切相关的肌肉功能,但其能否降低肾脏疾病患者的死亡率还有待进一步研究。Barbosa等(2018)将26例慢性肾病患者随机分为BFRT组和非BFRT组,两组均进行40%握力的等长运动,结果显示,训练后均可增加头静脉、桡动脉直径,但BFRT组桡动脉各节段直径均增大,而非BFRT组仅桡动脉远端直径增大。BFRT在增加桡动脉直径方面是有效的,这种效应一方面可能是由于运动时前臂闭塞引起的反应性充血,导致血流增加;另一方面可能是血管内的湍流增加了切应力,从而促进内皮细胞中NO沉积,最终导致血管直径增大。因此,对于有动静脉瘀指征的慢性肾病患者来说,BFRT有望作为常规训练的替代疗法。

## 2.5 脊髓损伤

脊髓损伤(spinal cord injury, SCI)是一种破坏了沿脊髓传播的动作电位,导致运动功能障碍、瘫痪、自主神经功能障碍等症状的神经系统疾病(Sever-Bahcekapili et al., 2021)。SCI分为完全性脊髓损伤(complete spinal cord injury, cSCI)和不完全性脊髓损伤(incomplete spinal cord injury, iSCI),iSCI约占所有SCI的66.7%(Roberts et al., 2017),其特征是在脊髓大部分尾侧区域及以上残留感觉或运动功能(Meyer et al., 2020)。iSCI患者的下肢功能恢复是其首要康复目标。Stavres等(2018)对9例iSCI患者病变较轻侧下肢膝关节进行限制血流的屈伸训练,因不会引起额外的心血管损伤和疼痛,易被iSCI患者耐受。cSCI患者上肢功能的康复是恢复和改善日常生活能力的关键。Gorgey等(2016)对9例cSCI患者右前臂进行BFRT+神经肌肉电刺激(neuromuscular electrical stimulation, NMES)训练,左前臂进行NMES训练作为对照,在2次/周期9周的训练后,BFRT+NMES组的桡侧腕长伸肌、指伸肌横截面积比单纯NMES组高17%,钉子抓放实验中的手部移动距离、持续时间和速度也显著改善。cSCI伴有自主神经反射障碍的康复是康复治疗中的难点。Krogh等(2020)报道1例因外伤导致C<sub>6</sub>平面损伤的cSCI伴有自主神经反射障碍(autonomic dysreflexia, AD)的患者,其双上肢分别进行2次/周期4周的屈、伸肘和伸腕的加压训练,在8次训练过程中记录到4次以收缩压升高>20 mmHg为特征的AD发生;而在1次常规训练中,出现了2次AD发作,这说明BFRT在SCI患者康复中具有相当大的潜力,它能够在低负荷运动下改善心肺功能,增强训练肌群肌力,而且不会增加AD发生风险。然而,BFRT在SCI患者中的安全性和可行性有待进一步验证。



## 2.6 其他疾病

刘玉琳等(2018)研究发现,对糖耐量减低人群进行 BFRT 可改善其胰岛素敏感性,提高糖耐量,增加骨密度,减少骨吸收,从而预防糖尿病及其并发症的发生,其机制主要是缺氧导致的高代谢效应诱发 IGF-1、GH、睾酮的分泌量增加。Douris 等(2020)研究表明,BFRT 可减少帕金森患者不宁腿综合征的发生,提高其生活质量,但其机制尚不清楚。Iwashita 等(2014)对 1 例脑室周围白质软化症患者进行 BFRT 后,其肌张力降低,肌力增加,生活质量得到改善。Karabulut 等(2017)对 34 例肥胖患者进行 BFRT,结果显示,在较短时间内通过消耗一定的能量可达到良好的减重效果,其原因可能是 BFRT 增加肾上腺素、去甲肾上腺素表达和 II 型肌肉纤维合成,从而消耗更多的碳水化合物。Du 等(2021)研究显示,血流限制性抗阻运动可增加机体血清乳酸浓度,从而提高脑卒中患者脑源性神经营养因子和 VEGF 水平,其效果与高强度抗阻运动相似,因此可用于不耐受高强度抗阻运动的脑卒中后抑郁的治疗。Cohen 等(2021)研究发现,低负荷加压抗阻训练可在不增加多发性硬化患者疲劳的情况下增加其力量,因此 BFRT 可替代受疲劳限制的常规训练成为多发性硬化患者新的训练方法。Sjöblom 等(2015)研究表明,总体质量相同而较低肌肉质量的化疗患者更易发生药物毒性,BFRT 有望在提高肿瘤恶病质患者的肌肉质量并降低化疗药物毒性反应上发挥不可替代的作用。

## 3 结语

BFRT 可作为不能耐受或禁忌高负荷训练人群的增肌治疗、缓解疼痛的有效训练手段,它还能有效预防伤病卧床患者和老年人肌萎缩、肌力下降。BFRT 的效果和安全性受多种因素影响,且存在个体差异性,需要更加深入研究其作用机制来解释和证明神经肌肉系统如何适应 BFRT,以便设计和优化个性化的 BFRT 策略。BFRT 对肌肉骨骼系统疾病、心脏疾病、肝硬化肌少症、糖尿病、肾脏疾病、特发性炎症性肌病等的康复有良好效果。此外,BFRT 在脊髓损伤、脑损伤等神经康复领域也有较好的应用前景,但 BFRT 的效果、安全性及作用机制仍需进一步论证及探讨。

## 参考文献:

刘玉琳,叶琼,刘昊为,2018. 加压结合抗阻训练对糖耐量减低人群骨密度、胰岛素敏感性、肌力、激素分泌影响研究[J]. 中国骨质疏松杂志,24(11): 1451-1458.  
陆锦华,2020. 血流限制训练的效果、作用机制与实践策略[J]. 河北体育学院学报,34(3): 77-84.  
罗若营,林迪,郭惠杰,等,2020. 加压训练对类胰岛素生长因子(IGF-1)分泌影响的 Meta 分析[J]. 河北体育学院学报,34(3): 70-76.  
谭朝文,赵彦,俞莹莹,等,2020. 低负荷加压训练改善自发性高血压

大鼠的血压效果及机制研究[J]. 体育科学,40(3): 46-53.  
王牧,2020. 加压训练在体育运动中的实际运用与作用效果[J]. 当代体育科技,10(19): 21-23.  
叶琼,2018. 加压训练搭配振动训练对老年男性骨质代谢和骨密度影响[J]. 中国骨质疏松杂志,24(3): 290-294, 318.  
张林玲,王玉明,赵燕燕,等,2020. 血流限制训练在膝关节微创手术早期康复中的应用[J]. 护理实践与研究,17(16): 87-89.  
赵彦,李平,陆娇,等,2020. 血流限制训练对肌骨疼痛康复效果的 Meta 分析[J]. 体育与科学,41(6): 65-74.  
周威,乔玉成,2020. 加压训练研究的知识图谱分析[J]. 四川体育科学,39(3): 79-84.  
BARBOSA J B, MAIA T O, ALVES P S, et al., 2018. Does blood flow restriction training increase the diameter of forearm vessels in chronic kidney disease patients? A randomized clinical trial[J]. J Vasc Access, 19(6): 626-633.  
BAUER J, MORLEY J E, SCHOLS A, et al., 2019. Sarcopenia: A time for action. An SCWD position paper[J]. J Cachexia Sarcopenia Muscle, 10(5): 956-961.  
BITTAR S T, PFEIFFER P S, SANTOS H H, et al., 2018. Effects of blood flow restriction exercises on bone metabolism: A systematic review[J]. Clin Physiol Funct Imaging, 38(6): 930-935.  
BJØRNSSEN T, WERNBOM M, LØVSTAD A, et al., 2019. Delayed myonuclear addition, myofiber hypertrophy, and increases in strength with high-frequency low-load blood flow restricted training to volitional failure[J]. J Appl Physiol, 126(3): 578-592.  
CARDOSO R K, ARAUJO A M, DEL V F, et al., 2020. Intradialytic exercise with blood flow restriction is more effective than conventional exercise in improving walking endurance in hemodialysis patients: A randomized controlled trial[J]. Clin Rehabil, 34(1): 91-98.  
CENTNER C, WIEGEL P, GOLLHOFER A, et al., 2019a. Effects of blood flow restriction training on muscular strength and hypertrophy in older individuals: A systematic review and meta-analysis[J]. Sports Med, 49(1): 95-108.  
CENTNER C, ZDZIEBLIK D, ROBERTS L, et al., 2019b. Effects of blood flow restriction training with protein supplementation on muscle mass and strength in older men[J]. J Sports Sci Med, 18(3): 471-478.  
COHEN E T, CLEFFI N, INGERSOLL M, et al., 2021. Blood-flow restriction training for a person with primary progressive multiple sclerosis: A case report[J]. Phys Ther, 101(3): pzaa224.  
CORRADO B, CIARDI G, LUCIGNANO L, 2020. Supervised physical therapy and polymyositis/dermatomyositis: A systematic review of the literature[J]. Neurol Int, 12(3): 77-88.  
CRUZ-JENTOF A J, SAYER A A, 2019. Sarcopenia[J]. Lancet, 393(10191): 2636-2646.  
DEPHILLIPO N N, KENNEDY M I, AMAN Z S, et al., 2018. The role of blood flow restriction therapy following knee surgery: Expert opinion[J]. Arthroscopy, 34(8): 2506-2510.  
DOURIS P C, D'AGOSTINO N, WERNER W G, et al., 2020. Blood flow restriction resistance training in a recreationally active person with Parkinson's disease[J]. Physiother Theory Pract, 38(3): 422-430.  
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 de-

- pression[J]. *Neuro Endocrinol Lett*, 42(4): 229-235.
- FERLITO J V, PECCE SAP, OSELAME L, et al., 2020. The blood flow restriction training effect in knee osteoarthritis people: A systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Rehabil*, 34(11): 1378-1390.
- GARBER C E, BLISSMER B, DESCHENES M R, et al., 2011. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 43(7): 1334-1359.
- GILES L, WEBSTER K E, MCCLELLAND J, et al., 2017. Quadriceps strengthening with and without blood flow restriction in the treatment of patellofemoral pain: A double-blind randomised trial[J]. *Br J Sports Med*, 51(23): 1688-1694.
- GORGEY A S, TIMMONS M K, DOLBOW D R, et al., 2016. Electrical stimulation and blood flow restriction increase wrist extensor cross-sectional area and flow mediated dilatation following spinal cord injury[J]. *Eur J Appl Physiol*, 116(6): 1231-1244.
- HUGHES L, PATON B, ROSENBLATT B, et al., 2017. Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: A systematic review and meta-analysis[J]. *Br J Sports Med*, 51(13): 1003-1011.
- ISOYAMA N, QURESHI A R, AVESANI C M, et al., 2014. Comparative associations of muscle mass and muscle strength with mortality in dialysis patients[J]. *Clin J Am Soc Nephrol*, 9(10): 1720-1728.
- IWASHITA H, MORITA T, SATO Y, et al., 2014. KAATSU training® in a case of patients with periventricular leukomalacia (PVL)[J]. *Int J KAATSU Train Res*, 10(1): 7-11.
- JØRGENSEN A N, AAGAARD P, FRANSENSEN U, et al., 2018. Blood-flow restricted resistance training in patients with sporadic inclusion body myositis: A randomized controlled trial[J]. *Scand J Rheumatol*, 47(5): 400-409.
- KARABULUT M, GARCIA S D, 2017. Hemodynamic responses and energy expenditure during blood flow restriction exercise in obese population[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 37(1): 1-7.
- KILGAS M A, LYTLE L, DRUM S N, et al., 2019. Exercise with blood flow restriction to improve quadriceps function long after ACL reconstruction[J]. *Int J Sports Med*, 40(10): 650-656.
- KORAKAKIS V, WHITELEY R, EPAMEINONTIDIS K, 2018. Blood flow restriction induces hypoalgesia in recreationally active adult male anterior knee pain patients allowing therapeutic exercise loading[J]. *Phys Ther Sport*, 32: 235-243.
- KROGH S, JØNSSON A B, VIBJERG J, et al., 2020. Feasibility and safety of 4 weeks of blood flow-restricted exercise in an individual with tetraplegia and known autonomic dysreflexia: A case report[J]. *Spinal Cord Ser Cases*, 6(1): 83.
- KUBOTA A, SAKURABA K, SAWAKI K, et al., 2008. Prevention of disuse muscular weakness by restriction of blood flow[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 40(3): 529-534.
- LIBARDI C A, CATAI A M, MIQUELINI M, et al., 2017. Hemodynamic responses to blood flow restriction and resistance exercise to muscular failure[J]. *Int J Sports Med*, 38(2): 134-140.
- LOPES K G, BOTTINO D A, FARINATTI P, et al., 2019. Strength training with blood flow restriction—a novel therapeutic approach for older adults with sarcopenia? A case report[J]. *Clin Interv Aging*, 14: 1461-1469.
- MATTAR M A, GUALANO B, PERANDINI L A, et al., 2014. Safety and possible effects of low-intensity resistance training associated with partial blood flow restriction in polymyositis and dermatomyositis[J]. *Arthritis Res Ther*, 16(5): 473.
- MEYER C, FILLI L, STALDER S A, et al., 2020. Targeted walking in incomplete spinal cord injury: Role of corticospinal control[J]. *J Neurotrauma*, 37(21): 2302-2314.
- NADERI-BOLDAJI V, JOUKAR S, NOORAFSHAN A, et al., 2018. The effect of blood flow restriction along with low-intensity exercise on cardiac structure and function in aging rat: Role of angiogenesis[J]. *Life Sci*, 209: 202-209.
- NIELSEN J L, AAGAARD P, BECH R D, et al., 2012. Proliferation of myogenic stem cells in human skeletal muscle in response to low-load resistance training with blood flow restriction[J]. *J Physiol*, 590(17): 4351-4361.
- PETERSEN W, REMBITZKI I V, LIEBAU C, 2017. Patellofemoral pain in athletes[J]. *Open Access J Sports Med*, 8: 143-154.
- ROBERTS T T, LEONARD G R, CEPELA D J, 2017. Classifications in brief: American Spinal Injury Association (ASIA) impairment scale[J]. *Clin Orthop Relat Res*, 475(5): 1499-1504.
- SEVER-BAHCEKAPILI M, YILMAZ C, DEMIREL A, et al., 2021. Neuroactive peptide nanofibers for regeneration of spinal cord after injury[J]. *Macromol Biosci*, 21(1): e2000234.
- SHIMIZU R, HOTTA K, YAMAMOTO S, et al., 2016. Low-intensity resistance training with blood flow restriction improves vascular endothelial function and peripheral blood circulation in healthy elderly people[J]. *Eur J Appl Physiol*, 116(4): 749-757.
- SJØBLØM B, GRONBERG B H, BENTH J S, et al., 2015. Low muscle mass is associated with chemotherapy-induced hematological toxicity in advanced non-small cell lung cancer[J]. *Lung Cancer*, 90(1): 85-91.
- SLYSZ J, STULTZ J, BURR J F, 2016. The efficacy of blood flow restricted exercise: A systematic review & meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*, 19(8): 669-675.
- STAVRES J, SINGER T J, BROCHETTI A, et al., 2018. The feasibility of blood flow restriction exercise in patients with incomplete spinal cord injury[J]. *PM R*, 10(12): 1368-1379.
- TENNENT D J, HYLLEN C M, JOHNSON A E, et al., 2017. Blood flow restriction training after knee arthroscopy: A randomized controlled pilot study[J]. *Clin J Sport Med*, 27(3): 245-252.
- VOPAT B G, VOPAT L M, BECHTOLD M M, et al., 2020. Blood flow restriction therapy: Where we are and where we are going[J]. *J Am Acad Orthop Surg*, 28(12): e493-e500.
- WERNBOM M, AAGAARD P, 2020. Muscle fibre activation and fatigue with low-load blood flow restricted resistance exercise: An integrative physiology review[J]. *Acta Physiol (Oxf)*, 228(1): e13302.
- YOW B G, TENNENT D J, DOWD T C, et al., 2018. Blood flow restriction training after achilles tendon rupture [J]. *J Foot Ankle Surg*, 57(3): 635-638.

(收稿日期:2021-03-29; 修订日期:2022-10-30; 编辑:马婧)