



血流限制伴不同强度抗阻热身训练对肌肉激活及下肢肌力影响的差异

Differences in the Effects of Blood Flow Restriction Combined with Different Intensities of Resistance Warm-Up Training on Muscle Activation and Lower Limb Strength

苏艳红¹, 杨孝磊¹, 于海强^{2*}

SU Yanhong¹, YANG Xiaolei¹, YU Haiqiang^{2*}

摘要:目的:探讨血流限制(blood flow restriction, BFR)伴不同强度抗阻热身训练对肌肉激活及下肢等速肌力的影响。方法:采用重复测量的实验设计,12名运动训练专业大学生依次分别以3种抗阻热身训练方法进行训练:高强度抗阻热身训练(HLRT)(3组、每组3次80% 1RM深蹲跳练习)、BFR伴随高强度抗阻热身训练(H-BFR)(3组、每组3次BFR伴随80% 1RM深蹲跳练习)和BFR伴随低强度抗阻热身训练L-BFR(3组、每组3次BFR伴随30% 1RM深蹲跳练习)。使用等速肌力测试仪和表面肌电测试仪对抗阻热身训练前和训练后即刻、3、6、9、12、15 min等速膝关节伸峰值功率以及股外侧肌、股内侧肌和股直肌的均方根振幅(root mean square amplitude, RMS)和中值频率(median frequency, MF)进行测量,每人每种抗阻热身训练测试间隔1周进行。运用双因素重复测量方差分析对测值进行分析。结果:1)股直肌在L-BFR法训练后即刻RMS值显著高于同时刻HLRT法($P<0.01$)和H-BFR法($P<0.05$),且在训练后3 min肌肉RMS值显著高于HLRT法($P<0.05$),且3块肌肉经过3种方法训练后的各个时刻RMS值均存在差异。2)股外侧肌在L-BFR法训练后6、9、12 min的肌肉MF值显著低于HLRT法训练后的6 min($P<0.05$)、9 min($P<0.01$)和12 min($P<0.01$),且激活后即刻的MF值显著低于同时刻H-BFR法($P<0.05$);股直肌在L-BFR法训练后即刻、9和12 min的肌肉MF值显著低于同时刻HLRT法($P<0.05$),且H-BFR法训练后6 min的肌肉MF值显著低于同时刻HLRT法($P<0.05$);且3块肌肉经过3种方法训练后各时刻的MF值均存在差异。3)L-BFR法训练后3、6、9 min相较于训练前膝关节伸峰值功率具有显著差异($P<0.01$);L-BFR法训练后6、9 min峰值功率显著大于同时刻HLRT法($P<0.05$),且L-BFR法训练后3 min峰值功率显著高于H-BFR法($P<0.05$)。结论:3种抗阻热身训练方法均可提高大腿前侧肌肉的激活程度,对股直肌的激活效果最佳。伴随BFR可以提高抗阻训练后肌肉激活程度和肌肉力量,同时肌肉收缩产生的内源性BFR也会对肌肉激活产生影响。BFR伴随低强度抗阻热身训练不仅损伤风险较低,而且热身训练效果较好。建议运动员或者运动爱好者在进行训练前采用BFR伴随低强度抗阻热身训练方式,不仅可以快速进入状态,还可以减少损伤的发生。

关键词: 抗阻训练;血流限制;等速肌力;表面肌电

Abstract: Objective: To investigate the effects of blood flow restriction (BFR) accompanied by different intensities of resistance warm-up training on muscle activation and lower extremity isometric muscle strength. Methods: Using repeated-measures experimental design, 12 undergraduates majoring in athletic training were trained with three kinds of resistance warm-up training methods: the high-intensity resistance warm-up training (HLRT) method (3 sets of 3 repetitions of 80% 1RM deep-squat jumping exercises in each set), the BFR accompanied by high-intensity resistance warm-up training (H-BFR) method (3 sets of 3 repetitions of BFR accompanied by 80% 1RM deep squat jump exercise) and BFR accompanied by low intensity resistance warm-up training method L-BFR (3 sets of 3 repetitions of each BFR accompanied by 30% 1RM

基金项目:

辽宁省社会科学规划基金一般项目(L23BTY010);辽宁省教育厅科学研究经费项目(LR2020006)

第一作者简介:

苏艳红(1969-),女,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为骨骼肌运动机能的评定及运动健康促进,E-mail:suyh0703@163.com。

*通信作者简介:

于海强(1982-),男,讲师,博士,主要研究方向为体育教学训练学的运动人体基础,E-mail:yhq@dmu.edu.cn。

作者单位:

1.辽宁师范大学,辽宁 大连 116029;
2.大连医科大学,辽宁 大连 116044
1.Liaoning Normal University, Dalian 116029,China;
2.Dalian Medical University, Dalian 116044, China.

deep squat jump exercise). Isometric knee extension peak power, root mean square amplitude (RMS) and median frequency (MF) of the lateral femoral, medial femoral and rectus femoris muscles were collected using an isometric plyometric and surface EMG tester in 12 subjects immediately before and 3, 6, 9, 12, 15 min after resistance warm-up training, and the values were analyzed using a two-way repeated measures ANOVA. Results: 1) Rectus femoris muscle RMS value with L-BFR method was significantly higher than those of the HLRT method ($P<0.01$) and the H-BFR method ($P<0.05$) at the same moment immediately after training, and muscle RMS value was significantly higher than those of the HLRT method ($P<0.05$) at 3 min after training, and there were differences in RMS values of the three muscles at all moments after training with three training methods. 2) The muscle MF values of the lateral femoral muscles were significantly lower at 6, 9 and 12 min after training with the L-BFR method than at 6 min ($P<0.05$), 9 min ($P<0.01$) and 12 min ($P<0.01$) after training with the HLRT method, and the MF values at the immediate post activation were significantly lower than those of the H-BFR method at the same moment ($P<0.05$); and the muscle MF of the rectus femoris muscles at the immediate post-training with the L-BFR method and at 9, 12 min after training were significantly lower ($P<0.05$) than those of the HLRT method at the same moment ($P<0.01$); the muscle MF values were significantly lower than those of the HLRT method at the same moment ($P<0.05$), and the muscle MF values of the H-BFR method were significantly lower than those of the HLRT method at the same moment ($P<0.05$) at 6 min post-training; there were differences in the MF values of the three muscles at various moments after training with each training method. 3) The knee extension peak power with L-BFR method was significantly different at 3, 6, 9 min after training compared with the pre-training period ($P<0.01$); the peak power at 6, 9 min after training was significantly greater with the L-BFR method than with the HLRT method at the same moment ($P<0.05$), and the peak power at 3 min after training was also significantly greater with the L-BFR method than with the H-BFR method ($P<0.05$). Conclusions: All the three methods of resistance warm-up training increase the level of activation of the anterior thigh muscles. Accompanied by BFR can increase muscle activation and muscle strength after resistance training, while endogenous BFR from muscle contraction also has an effect on muscle activation. BFR accompanied by a low-intensity resistance warm-up is not only associated with a lower risk of injury, but also with a better warm-up effect. It is recommended that athletes or sports enthusiasts use BFR with low-intensity resistance warm-up training before training, which can not only quickly enter the state of exercise, but also reduce the occurrence of injuries.

Keywords: resistance training; blood flow restriction; isokinetic muscle strength; sEMG

中图分类号: G804.2 **文献标识码:** A

加压训练(KAATSU Training)是在一般力量练习的基础上结合特定的加压设备进行辅助训练的方法,又称血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT),是一种新兴力量训练方法,其相关研究从20世纪90年代初期开始(Shinohara et al., 1998; Yoshida et al., 1997)。近年来,BFRT逐渐成为体能训练领域的研究热点之一。同时,相关训练方法也开始应用于专业运动队中,并取得了一定的效果。

加压训练生理学机制相关研究发现,低强度加压训练可使乳酸等代谢物质堆积、细胞肿胀膨大,从而促进生长激素分泌、抑制蛋白质分解,进而达到肌纤维增粗、肌力增加的效果(Chen, 2018)。力量训练方面的相关研究发现,加压训练对延迟肌肉萎缩、等长最大自主收缩(maximal voluntary contraction, MVC)(Ahmed et al., 2019; Hill et al., 2019)、提高最大力量(one repetition maximum, 1RM)(Liu et al., 2023; Sun et al., 2023)、肌肉横断面积(cross-sectional area, CSA)(Azevedo et al., 2023; Katakis et al., 2023)以及最大摄氧量($\dot{V}O_{2max}$)(Lässing et al., 2023)方面均

有较好效果。练习内容多采用膝关节屈伸、下肢蹲起、肘关节屈伸、步行等单关节或较为简单的运动形式,研究对象多为伤后康复人群(彭杰威等, 2022; 谢恩礼等, 2023)、特殊疾病人群(唐流泉等, 2023)、中老年人群(孔健达等, 2023)和普通人群等,而鲜见针对青少年运动员的研究。

以往研究中, BFRT主要集中在对肌肉力量和爆发力的长期适应性影响(王明波等, 2019; Dankel et al., 2015), 而急性BFR抗阻训练的相关研究较少(Fujita et al., 2007; Yasuda et al., 2006)。基于此,本研究旨在探讨BFR伴随不同强度深蹲跳训练对下肢肌肉激活程度以及下肢等速肌力的急性影响。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象纳入标准: 12名运动训练专业本科生, 男性, 年龄为(19.25 ± 0.45)岁, 身高为(177.83 ± 2.95)cm, 体重为(73.50 ± 6.75)kg, 有负重深蹲跳练习经历; 受试者在

测试前 3 h 内未抽烟并无咖啡因摄入;实验选取在周末休息时进行,并提前沟通协调训练安排,实验前 48 h 内未进行下肢大强度抗阻练习,近 3 个月内无下肢关节(开放性或闭合性)损伤、心血管疾病、疝气等。本研究获得了辽宁师范大学伦理委员会的审查批准,符合伦理学要求(编号:LL2022008)。受试者完全知晓实验过程、自愿参加并签署知情同意书。

1.2 研究方法

1.2.1 测试法

1.2.1.1 测试器材

华新牌气压止血带(带宽 50 mm)、CON-TREX-MJ 多关节等速肌力测试仪(菲兹曼,德国)、ME6000 便携式机电仪(MEGA,芬兰)、RUN-7410 型跑步机、皮尺、秒表、标准杠铃、杠铃片、固定弹簧夹。

1.2.1.2 抗阻热身训练方案

采用重复测量法,每名受试者参与 3 次实验,时间间隔 1 周,即高强度抗阻热身训练(high-load resistance training, HLRT)法、BFR 伴随高强度抗阻热身训练(high-load resistance training with blood flow restriction, H-BFR)法和 BFR 伴随低强度抗阻热身训练(low-load resistance training with blood flow restriction, L-BFR)法。BFR 压力为 180 mmHg(孙科等,2019),采用双侧对称加压方式,加压位置为大腿近端 1/3 处(徐飞等,2013)(图 1)。

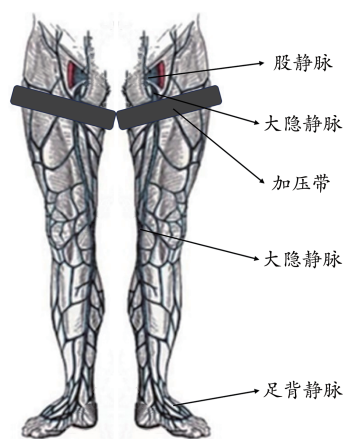


图 1 加压带加压位置示意图

Figure 1. The Schematic Diagram of the Pressurized Position of the Pressurized Belt

在实验前 1 周对受试者进行 1RM 深蹲跳测试,由于深蹲跳相较于深蹲难度较大且具有一定的危险性,因此采用 Brzycki 1RM 预测方程(Brzycki et al., 1993)进行推算,在测试过程中 RM 不超过 10 次。Brzycki 1RM 预测方程:

$$1RM = \frac{100 \times cargrep}{102.78 - 2.78 \times rep}$$

其中, $cargrep$ 为重复执行的负荷值(kg); rep 为执行的重复次数。

从第 2 周开始进行正式测试,诱导动作为杠铃深蹲跳,HLRT 法进行 80% 1RM 的深蹲跳练习,H-BFR 法进行 BFR 伴随 80% 1RM 深蹲跳练习,L-BFR 法进行 BFR 伴随 30% 1RM 深蹲跳练习。抗阻热身内容为 3 组、每组 3 次的杠铃深蹲跳练习,组间休息 30 s,在组间休息期间解除 BFR 压力。在深蹲跳练习时有专门人员保护。

1.2.1.3 测试指标与方法

峰值功率测试:采用等速肌力测试仪测试优势侧腿膝关节伸峰值功率,受试者采取坐姿,身体自然放松,使用安全带将受试者躯干固定,保持髋关节屈曲 90°,下肢固定绑带分别固定受试者优势侧膝关节上方 10 cm 及踝关节上方 10 cm。根据受试者个人情况设定膝关节活动范围,膝关节伸直时为 0°位。运动模式选择 180(°)/s 向心-向心模式(罗安民等,2012),随后采集抗阻热身训练前、抗阻热身训练后即刻、3、6、9、12、15 min 的测值,在进行每个时刻的等速肌力测试时膝关节的屈伸动作重复 5 次。

肌电 RMS 值和 MF 值测试:在膝关节等速肌力测试过程中,收集优势侧大腿股内侧肌、股外侧肌和股直肌的肌电信号。用 ME6000 系统自带的处理软件对原始肌电数据进行整流、滤波、平滑和标准化处理,在原始肌电图上选取 3 次完整发力周期,取 RMS 平均值和 MF 值。

1.2.1.4 测试流程

在正式实验前,受试者先了解实验流程,等速肌力和表面肌电设备录入个人信息,随后进行 5~10 min 的慢跑和动态拉伸练习,实验人员为受试者去除腿毛,喷洒酒精并粘贴肌电贴,粘贴完毕后受试者坐在等速肌力测试仪上调整好坐姿和绑带位置,随后进行正式测试,测得抗阻热身训练前的数据,测试完成后休息 10 min,随后执行抗阻热身训练方案,进行 3 组每组 3 次深蹲跳练习。分别采集受试者抗阻热身训练后即刻、3、6、9、12、15 min 等速肌力测试数据和表面肌电数据,激活训练完成后 30 s 内测得的数据视为热身训练后即刻的数据。测试时不断给予受试者口头鼓励,在测试完成后进行 5~10 min 的整理活动(图 2)。

1.2.2 统计学分析

数据使用 Excel 2007 进行汇总,并使用 SPSS 22.0 对数据进行处理,用平均值±标准差($\bar{X} \pm SD$)表示。采用双因素重复测量方差分析(不同热身训练方法×时间)对不同受试者在 3 种热身训练前以及热身训练后即刻、3、6、9、12、15 min 的肌电 RMS 值、MF 值和膝关节伸峰值功率进行 Mauchly 的球形检验。若检验结果 $P > 0.05$,符合 Huynh-Feldt 条件,接受球形假设检验结果,可用一元方差分析的检验结果;若检验结果 $P < 0.05$,违反球形假设,需校正系数 Greenhouse-Geisser 的校正自由度。同时检验组间因素(不同热身训练方法)和组内因素(不同时刻)之间是否存在交互效应,交互作用显著时,进行简单效应分析。 $P < 0.05$ 为具有统计学意义。

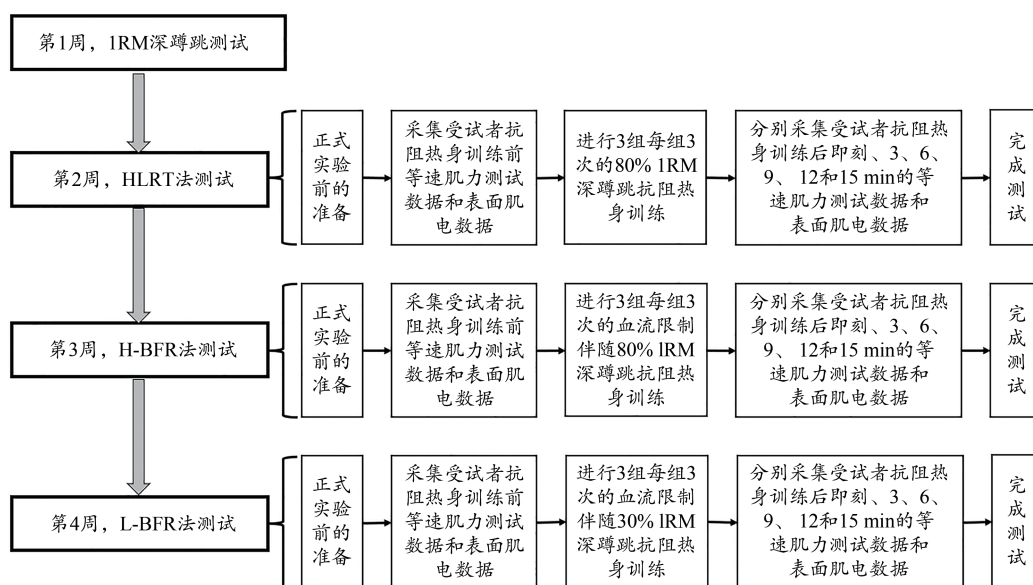


图2 测试流程图

Figure 2. Test Flow Chart

2 结果

2.1 RMS

经双因素重复测量方差分析发现,股外侧肌组间因素(不同热身训练方法)与组内因素(不同时刻)的交互作用对肌肉RMS值的影响无统计学意义($F=1.174, P>0.05$;表1),比较主效应发现,股外侧肌不同热身训练方法对RMS值的主效应不具有统计学意义($F=0.146, P>0.05$),而不同时刻具有统计学意义($F=14.412, P<0.05$);股直肌($F=6.224, P<0.05$)和股内侧肌($F=3.042, P<0.05$)组间因素(不同热身训练方法)与组内因素(不同时刻)的交互作用对肌肉RMS值的影响存在统计学意义,因此进行简单效应分析。

表1 各肌肉RMS值重复测量方差分析结果
Table 1 Results of RMS Values of Each Muscle by

肌肉名称	Repeated ANOVA n=12					
	热身训练方法(A)		时刻(B)		A×B	
	F	P	F	P	F	P
股外侧肌	0.146	0.865	14.412	<0.001	1.174	0.323
股直肌	1.850	0.173	10.067	<0.001	6.224	<0.001
股内侧肌	0.578	0.566	11.951	<0.001	3.042	0.002

股外侧肌和股内侧肌在热身训练后,同时刻3种热身训练方法之间RMS值均无显著差异($P>0.05$;表2);而股直肌在训练后即刻RMS值显著高于同时刻HLRT法($P<0.01$)和H-BFR法($P<0.05$),且在训练后3 min肌肉RMS值显著高于HLRT法($P<0.05$),其他时刻3种热身训练方法之间股直肌RMS值均无显著性差异($P>0.05$),且3块肌肉经过各激活训练方法训练后的各个时刻RMS

值也存在差异。

2.2 MF

经过双因素重复测量方差分析发现,3块肌肉的组间因素(不同热身训练方法)与组内因素(不同时刻)的交互作用对肌肉MF值的影响存在统计学意义(股外侧肌: $F=5.868, P<0.05$;股直肌: $F=7.418, P<0.05$;股内侧肌: $F=4.439, P<0.05$;表3),因此进行简单效应分析。

股内侧肌MF值在热身训练后同时刻3种热身训练方法之间均无显著差异($P>0.05$;表4);而股外侧肌在L-BFR法训练后6、9、12 min的肌肉MF值显著低于HLRT法训练后的6 min($P<0.05$)、9 min($P<0.01$)和12 min($P<0.01$),且训练后即刻的MF值显著低于同时刻H-BFR法($P<0.05$),其他时刻3种热身训练方法之间股外侧肌MF值均无显著差异($P>0.05$)。股直肌在L-BFR法训练后即刻和训练后9、12 min的肌肉MF值显著低于同时刻HLRT法($P<0.05$),且H-BFR法在训练后6 min的肌肉MF值显著低于同时刻HLRT法($P<0.05$),其他时刻3种热身训练方法之间股直肌MF值均无显著差异($P>0.05$),且3块肌肉经过3种热身训练方法训练后各个时刻的MF值也存在差异。

2.3 膝关节伸峰值功率

经过双因素重复测量方差分析发现,组间因素(不同热身训练方法)与组内因素(不同时刻)的交互作用对膝关节伸峰值功率的影响存在统计学意义($F=3.298, P<0.05$;表5),故进行简单效应分析。

3种训练方法膝关节伸峰值功率的最大值均出现在训练后6 min左右,其中L-BFR法训练后各时刻峰值功率均大于训练前,但只有训练后3、6、9 min相较于训练前具有显著差异($P<0.01$;表6);L-BFR法训练后6、9 min峰

值功率显著大于同时刻 HLRT 法 ($P < 0.05$), 且 L-BFR 法其他时刻不同热身训练方法之间峰值功率均无显著差异 ($P > 0.05$)。训练后 3 min 峰值功率也显著高于 H-BFR 法 ($P < 0.05$)。

表 2 3 种热身训练方法肌肉 RMS 值的比较
Table 2 Comparison of Muscle RMS Values of Three Warm-Up Training Methods n=12

肌肉名称	时刻	HLRT 法/ μV	H-BFR 法/ μV	L-BFR 法/ μV	P		
					L-BFR ~HLRT	L-BFR ~H-BFR	HLRT ~H-BFR
股外侧肌	训练前	271.25±63.34	269.25±64.45	273.25±60.67	0.938	0.877	0.940
	训练后即刻	262.75±69.94	270.25±70.85	283.38±51.80	0.421	0.610	0.797
	训练后 3 min	266.38±68.39	267.13±69.46	271.00±53.18	0.840	0.864	0.979
	训练后 6 min	256.50±67.37	266.38±70.74	274.63±45.44	0.447	0.737	0.728
	训练后 9 min	238.63±57.60 ^{▲##}	258.25±67.12	265.00±44.53 ^{▲▲&}	0.232	0.794	0.451
	训练后 12 min	257.00±74.84	262.63±62.91	263.25±51.72 ^{▲▲}	0.800	0.980	0.830
	训练后 15 min	239.63±60.72 ^{**▲▲##}	253.13±76.92 ^{*▲#&}	254.00±55.47 ^{*▲▲#&&}	0.537	0.960	0.638
股直肌	训练前	246.74±54.12	252.18±52.12	250.88±56.12	0.856	0.953	0.804
	训练后即刻	228.63±52.51	253.00±38.61	325.25±78.93 ^{**}	0.001	0.016	0.957
	训练后 3 min	246.63±58.80	246.88±41.36	304.38±65.44 ^{**▲}	0.050	0.051	0.991
	训练后 6 min	249.75±46.24	249.38±45.32	285.63±50.62 ^{**▲#}	0.219	0.210	0.984
	训练后 9 min	242.25±52.64	253.88±56.19	285.00±65.54 ^{**▲▲}	0.256	0.624	0.997
	训练后 12 min	243.13±64.13	250.75±48.34	259.50±66.39 ^{▲▲##&}	0.947	0.917	0.946
	训练后 15 min	232.88±53.44	251.75±43.91	265.75±74.61 ^{▲▲##}	0.539	0.981	0.955
股内侧肌	训练前	260.25±93.33	263.14±92.30	261.76±95.13	0.969	0.972	0.940
	训练后即刻	241.50±83.93	288.00±86.96	275.63±90.77	0.949	0.947	0.615
	训练后 3 min	256.75±70.94	283.00±89.56	285.25±80.54	0.968	0.960	0.926
	训练后 6 min	246.00±96.00	284.75±81.23	279.13±59.64	0.935	0.949	0.717
	训练后 9 min	227.13±63.57	263.25±60.61	266.88±50.04	0.314	0.974	0.417
	训练后 12 min	242.00±92.12	270.50±73.37	240.75±66.13 ^{▲▲#&}	0.980	0.909	0.905
	训练后 15 min	230.25±63.27	278.88±100.06	250.88±63.50 ^{##}	0.934	0.922	0.402

注: 同肌肉同种热身训练方法各时刻与训练前相比, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$; 同肌肉同种热身训练方法各时刻与训练后即刻相比, ▲ $P < 0.05$, ▲▲ $P < 0.01$; 同肌肉同种热身训练方法各时刻与训练后 3 min 相比, # $P < 0.05$, ## $P < 0.01$; 同肌肉同种热身训练方法各时刻与训练后 6 min 相比, & $P < 0.05$, && $P < 0.01$; 下同。

表 3 各肌肉 MF 值的重复测量方差分析结果
Table 3 Results of MF Values of Each Muscle by

肌肉名称	Repeated ANOVA n=12					
	热身训练方法(A)		时刻(B)		A×B	
	F	P	F	P	F	P
股外侧肌	2.631	0.087	5.925	<0.001	5.868	<0.001
股直肌	2.645	0.086	16.895	<0.001	7.418	<0.001
股内侧肌	0.538	0.589	6.821	<0.001	4.439	<0.001

3 分析与讨论

3.1 不同抗阻热身训练方法各肌肉激活程度变化特征分析

肌肉激活程度以 RMS 值表示, 急性加压抗阻训练能够增加肌肉激活程度。研究表明, 低强度加压练习时, RMS 值逐渐增大 (Wernbom et al., 2009)。本研究发现, 佩戴加压带后, 各肌肉的 RMS 值较没有加压的 HLRT 法均有所增加, 并且 L-BFR 法增加幅度大于 H-BFR 法, 这可能是因为捆绑加压带后, 动静脉血流受到限制, 绑带远端

肢体肌肉内乳酸浓度增加, 氧供应相对不足 (Takarada et al., 2000); 为了弥补能量供应变化导致的发力不足, 更多快肌纤维参与运动 (Moritani et al., 1986), 从而导致肌电振幅值逐渐升高, 肌肉激活程度提高。在肌电 RMS 值达到顶峰后, 由于激活效应的逐渐减退, RMS 值逐渐下降, 即在热身训练后肌肉激活程度呈逐渐下降趋势, 而运动表现是肌肉激活与疲劳结合相互影响的结果。H-BFR 法的肌电 RMS 值低于 L-BFR 法, 其原因可能是高强度的力量训练会使肌肉产生更大的张力, 这种张力本身会产生一种内源性的 BFR, 而负荷越大, 内源性的 BFR 越大, 因此 H-BFR 法大腿肌肉受到的 BFR 压力大于 L-BFR 法, 这种过高的 BFR 压力可能会减少肌肉激活程度, 增加肌肉疲劳程度, 进而削弱肌肉力量 (Teixeira et al., 2018)。同时对肌肉进行 BFR, 肌肉内的血流量减少, 使肌肉温度降低, 从而使肌肉激活减少, 这可能是 H-BFR 法激活效果较差的原因。

表4 3种热身训练方法肌肉MF值比较

Table 4 Comparison of Muscle MF Value of Three Warm-Up Training Methods

n=12

肌肉名称	时刻	HLRT法/ μ V	H-BFR法/ μ V	L-BFR法/ μ V	P		
					L-BFR ~HLRT	L-BFR ~H-BFR	HLRT ~H-BFR
股外侧肌	训练前	61.28 \pm 11.74	62.00 \pm 10.63	60.05 \pm 9.42	0.980	0.926	0.961
	训练后即刻	62.38 \pm 7.23	63.50 \pm 5.42	55.13 \pm 10.52	0.101	0.047	0.984
	训练后3 min	61.00 \pm 12.69	61.00 \pm 7.01	55.25 \pm 10.32*	0.437	0.437	1.000
	训练后6 min	64.25 \pm 6.18	59.13 \pm 9.66	52.50 \pm 11.66**	0.013	0.277	0.580
	训练后9 min	67.50 \pm 9.70* Δ Δ Δ	61.13 \pm 6.51	54.88 \pm 11.79	0.008	0.355	0.330
	训练后12 min	66.50 \pm 7.93* Δ Δ Δ	61.75 \pm 4.62	56.13 \pm 8.61	0.004	0.201	0.347
股直肌	训练前	62.75 \pm 8.48	60.25 \pm 9.08	56.25 \pm 9.79	0.271	0.870	0.993
	训练后即刻	67.13 \pm 12.24	68.04 \pm 9.83	68.36 \pm 10.35	0.991	0.937	0.943
	训练后3 min	73.50 \pm 14.32*	65.75 \pm 5.87	58.88 \pm 14.64**	0.020	0.540	0.405
	训练后6 min	68.25 \pm 12.35	62.88 \pm 10.47**	61.88 \pm 7.72**	0.424	0.994	0.636
	训练后9 min	70.75 \pm 11.30	59.63 \pm 11.02	62.38 \pm 7.21	0.146	0.976	0.031
	训练后12 min	76.25 \pm 9.75** Δ Δ Δ	70.88 \pm 13.97 Δ Δ Δ $\&$ $\&$	65.38 \pm 6.74	0.050	0.637	0.664
股内侧肌	训练后15 min	75.50 \pm 15.38** Δ Δ Δ	64.38 \pm 11.94	59.63 \pm 10.14**	0.013	0.905	0.119
	训练前	72.25 \pm 12.06** Δ Δ Δ	70.38 \pm 8.07 Δ Δ Δ $\&$	64.00 \pm 7.78**	0.093	0.256	0.961
	训练后即刻	56.10 \pm 10.66	55.27 \pm 10.23	54.38 \pm 11.79	0.903	0.945	0.938
	训练后3 min	57.13 \pm 9.61	53.63 \pm 7.17	52.38 \pm 14.85	0.893	0.995	0.922
	训练后6 min	57.00 \pm 12.63	54.25 \pm 9.02	54.13 \pm 5.72	0.960	0.972	0.920
	训练后9 min	57.88 \pm 8.25	47.88 \pm 13.87** Δ	51.50 \pm 14.78	0.686	0.936	0.183
股内侧肌	训练后12 min	60.13 \pm 8.98*	55.38 \pm 11.60 $\&$ $\&$	54.50 \pm 10.56	0.572	0.940	0.814
	训练后15 min	56.38 \pm 8.93	54.50 \pm 10.35 $\&$ $\&$	57.25 \pm 15.04 Δ Δ $\&$ $\&$	0.965	0.901	0.931
	训练后即刻	61.00 \pm 12.44** Δ	55.38 \pm 8.42 $\&$	55.63 \pm 9.80	0.769	0.947	0.700

表5 膝关节伸峰值功率的重复测量方差分析结果

Table 5 Results of Peak Knee Extension Power by

Repeated ANOVA

n=12

指标	热身训练方法(A)		时刻(B)		A \times B	
	F	P	F	P	F	P
峰值功率	1.289	0.289	24.496	<0.001	4.510	<0.001

在本研究中,对比股外侧肌、股直肌和股内侧肌3块肌肉的激活效果发现,BFR结合深蹲跳练习对于股外侧肌、股直肌和股内侧肌的激活效果存在差异,3块肌肉在L-BFR法训练后的差异最为明显,股直肌的激活效果较好,肌肉激活程度较高并且疲劳程度较低;而股外侧肌和股内侧肌的激活效果较差,这与以往研究结论一致(李志远等,2021)。

表6 3种热身训练方法膝关节伸峰值功率的比较

Table 6 Comparison of Peak Knee Extension Power of Three Warm-Up Training Methods

n=12

时刻	HLRT法/W	H-BFR法/W	L-BFR法/W	P		
				L-BFR~HLRT	L-BFR~H-BFR	HLRT~H-BFR
训练前	484.54 \pm 72.37	487.94 \pm 68.33	485.66 \pm 70.98	0.970	0.937	0.907
训练后即刻	466.28 \pm 76.86	490.29 \pm 66.41	507.80 \pm 59.69	0.432	0.903	0.922
训练后3 min	489.70 \pm 72.31	498.20 \pm 50.83	545.00 \pm 53.38**	0.388	0.038	0.982
训练后6 min	498.71 \pm 52.89 Δ Δ	519.96 \pm 57.09** Δ Δ	547.45 \pm 67.68** Δ Δ	0.045	0.199	0.955
训练后9 min	473.38 \pm 61.61 $\&$ $\&$	513.19 \pm 64.74*	515.51 \pm 51.33** $\&$ $\&$	0.048	0.923	0.067
训练后12 min	465.11 \pm 67.82 Δ Δ $\&$ $\&$	497.38 \pm 53.44 $\&$ $\&$	510.48 \pm 61.44 Δ Δ $\&$ $\&$	0.235	0.983	0.616
训练后15 min	458.83 \pm 74.92 Δ Δ $\&$ $\&$	492.98 \pm 56.97	502.63 \pm 46.89 Δ Δ $\&$ $\&$	0.259	0.955	0.533

3.2 不同抗阻热身训练方法各肌肉疲劳变化特征分析

肌肉疲劳程度常用肌电MF值来反映,神经肌肉疲劳的程度随着相对血管限制的作用而变化。在本研究中,加压的H-BFR法和L-BFR法的MF值在大部分时刻小于非加压的HLRT法,这与以往研究一致(车同等同,2022)。而H-BFR法训练后股外侧肌的MF值也大于L-BFR法,股

直肌和股内侧肌也有相似的趋势但差异不明显。相比于低压力的BFRT,较大的BFRT压力更容易造成外周的疲劳(潘颖等,2021)。而H-BFR法的高负重给肌肉施加了额外巨大的压力,导致肌肉总体受到的BFR水平高于L-BFR法,因此H-BFR法大腿前侧肌肉MF值高于L-BFR法。此外,有研究发现,在局部缺血条件下,运动时II型纤

维募集程度高于 I 型纤维,且未按照募集顺序进行(邱范基等,2021);缺血程度越大,募集到的 II 型肌纤维比例越高。因此,H-BFR 热身训练后募集到的 II 型肌纤维比例高于 L-BFR 法,且快肌纤维具有快速疲劳的特点(潘颖等,2021),这也可以解释 H-BFR 法的大腿前侧肌肉 MF 值高于 L-BFR 法。因此,在进行 BFRT 时,不仅需要考虑外部附加的压力,还要考虑由于肌肉强烈收缩而引起内源性的 BFR,压力过高效果会适得其反,造成 L-BFR 法激活效果强于 H-BFR 法。

3.3 不同抗阻热身训练方法股四头肌爆发力变化特征分析

在许多运动项目中,爆发力是运动成绩的最重要影响因素之一,而峰值功率常被作为评价运动员爆发力的指标之一(Doma et al.,2020;Flores et al.,2017;Lockie et al.,2018),本研究运用峰值功率评价下肢爆发力。对不同热身训练方案的效果,国外学者进行了相关研究。Wilk 等(2020)研究发现,10 名健美训练者分别在 BFR 热身和常规热身后进行 3 组强度为 70% 1RM 的卧推力量测试,BFR 热身在 3 组测试中峰值功率输出、平均功率输出、峰值杆速度和平均杆速度均有显著上升。提示,BFR 热身训练能够有效提高肌肉力量。Doma 等(2020)研究发现,18 名有抗阻训练经验的男性分别进行常规弓步热身和 BFR 弓步热身,并在热身后进行跳跃成绩测试,BFR 弓步热身显著提高了跳跃高度、飞行时间和力量。提示,BFR 弓步热身训练提高了后续跳跃成绩。在本研究中,经过 3 种热身训练方法的激活后,L-BFR 法膝关节伸峰值功率最高。这与国外学者研究中 L-BFR 法各肌肉激活程度最高的结论相吻合(Wernbom et al.,2009)。因此,在日常训练中可以用较低强度的抗阻训练伴随 BFR 进行热身激活,不仅优于单纯大强度抗阻练习对下肢爆发力的激活效果,而且较小的训练强度更加安全,可以减少运动损伤的发生。

陈冲等(2020)研究发现,肌肉激活程度会在抗阻热身活动后即刻升高,而此时疲劳也会产生并且占主导地位,其激活程度总体表现为变弱或者不变,但疲劳消失比肌肉激活效果消失更早,因此在肌肉的激活效应大于疲劳效应的这个时间段,运动表现得以提升,这与本研究中 HLRT 法的激活特征基本相符,但与 H-BFR 法和 L-BFR 法存在差异:H-BFR 法和 L-BFR 法不存在热身训练后即刻激活特征下降的趋势,在抗阻热身训练前至训练后 6 min 一直处于上升趋势。这可能是由于 BFR 改变了肌肉的激活与疲劳模式,从肌肉肌电 MF 值可以看出,3 种抗阻热身训练方法引起的疲劳程度不同,H-BFR 法和 L-BFR 法 3 块肌肉疲劳程度均低于 HLRT 法,致使 H-BFR 法和 L-BFR 法在抗阻热身训练后增强效应始终大于疲劳,因而没有表现出抗阻热身训练后爆发力先下降后上升的趋势,这可能是 3 种抗阻热身训练方法峰值功率变化曲线不同的原因。

3.4 不足与展望

在本研究中,膝关节伸峰值功率测试采用等速肌力测试仪 180(°)/s 向心-向心模式,测试动作具有一定的强度,可能会对测试结果产生额外的干扰,但并不影响不同组之间的比较;同时,也更接近实际运动中的情况。在本研究中,样本量相对较少,仍需更大的样本量以增加实验的可信度,并且本研究未讨论 BFR 不同压力水平引起的差异,在后续研究中可以进行不同 BFR 压力水平之间的对比,对该理论进行完善。需要注意的是,在大负荷运动同时进行 BFR 存在一定的风险,特殊人群应谨慎使用此方法进行锻炼。

4 结论

3 种抗阻热身训练方法均可提高大腿前侧肌肉的激活程度,对股直肌的激活效果最佳。伴随 BFR 可以提高抗阻训练后肌肉激活程度和肌肉力量,同时肌肉收缩产生的内源性 BFR 也会对肌肉激活产生影响。在 3 种抗阻热身训练方法中,BFR 伴随低强度抗阻热身训练的激活效果最佳,较低的强度还可以降低运动损伤的风险,并且股直肌激活表现最佳。建议运动员或者运动爱好者在进行训练前采用 BFR 伴随低强度抗阻热身训练的方式,不仅可以快速进入状态,还可以减少损伤的发生。

参考文献:

- 车同同,李志远,赵之光,等,2022.低强度卧推加压训练对肌肉激活程度和主观疲劳度的影响[J].成都体育学院学报,48(2):123-130.
- 陈冲,王爱民,段玉丞,2020.后激活增强效应研究述评[J].体育研究与教育,35(6):87-91.
- 孔健达,解瑛傲,陈世娟,等,2023.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,DOI:10.12307/2024.351.
- 李志远,虞松坤,李加鹏,等,2021.负重深蹲中施加不同动脉闭塞压和间歇方式对大腿肌肉激活特征的影响[J].中国应用生理学杂志,37(3):300-305.
- 罗安民,李珺晖,洪平,2012.中国女子篮球运动员膝关节等速肌力测试分析[J].中国运动医学杂志,31(6):517-522.
- 潘颖,赵彦,田宜鑫,等,2021.离心运动伴不同程度的血流限制对外周疲劳及心脏自主神经功能的效应研究[J].中国体育科技,57(2):28-36.
- 彭杰威,蔡亮,吴宇峰,2022.等速肌力训练结合下肢血流限制技术对前交叉韧带重建术后股四头肌肌围度、肌力及膝关节功能的影响[J].中外医学研究,20(31):106-109.
- 邱范基,李金峰,朱绎桦,2021.血流限制性训练及其在竞技体育中的应用[J].体育研究与教育,36(1):91-96.
- 孙科,魏文哲,赵之光,2019.下肢低强度加压训练中血流受限部位和未受限部位肌肉活动的差异[J].中国体育科技,55(5):14-19.
- 唐流泉,彭兴云,2023.血流限制下运动对绝经后慢性阻塞性肺疾病患者脆性骨折部分危险因素的治疗[J].中国康复理论与实践,29(7):761-769.

- 王明波,李志远,魏文哲,等,2019.高水平男子手球运动员下肢加压力量训练效果实证研究[J].中国体育科技,55(5):30-36.
- 谢恩礼,陶慧敏,2023.血流限制训练在临床康复医学中的应用趋势[J].中国组织工程研究,28(2):258-262.
- 徐飞,王健,2013.加压力量训练:释义及应用[J].体育科学,33(12):71-80.
- AHMED S, MARTIN A D, SMMITH B K, 2019. Inspiratory muscle training in patients with prolonged mechanical ventilation: Narrative review[J]. *Cardiopulm Phys Ther J*, 30(1): 44-50.
- AZEVEDO I G, DA CÂMARA S M A, MACIEL A C C, et al., 2023. Relationship between inspiratory muscle strength and balance in women: A cross-sectional study[J]. *PLoS One*, DOI: 10.1371/journal.pone.0280465.
- BRRZYCKI M, 1993. Strength testing-predicting a one-rep max from reps-to-fatigue[J]. *J Phys Educ Recreat*, 64(1): 88-90.
- CHEN G, 2018. Substrate utilization at steady state treadmill walking with and without blood flow restriction [D]. Athens, USA: Ohio University.
- DANKEL S J, JESSEE M B, ABE T, et al., 2015. The effects of blood flow restriction on upper-body musculature located distal and proximal to applied pressure[J]. *Sports Med*, 46(1): 23-33.
- DOMA K, LEEICHT A S, BOULLOSA D, et al., 2020. Lunge exercises with blood-flow restriction induces post-activation potentiation and improves vertical jump performance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 120(3): 687-695.
- FLORES F J, SEEDANO S, REDONDO J C, 2017. Optimal load and power spectrum during snatch and clean: Differences between international and national weightlifters [J]. *Int J Perform Anal Sport*, 17(4): 521-533.
- FUJITA S, ABE T, DRUMMOND M J, et al., 2007. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis [J]. *J Appl Physiol*, 103(3): 903-910.
- HILL E C, HOUSH T J, SMITH C M, et al., 2019. Eccentric and concentric blood flow restriction resistance training on indices of delayed onset muscle soreness in untrained women [J]. *Eur J Appl Physiol*, 119(10): 2363-2373.
- KATAKIS S, BAROTSIS N, KAKOTARITIS A, et al., 2023. Muscle cross-sectional area segmentation in transverse ultrasound images using vision transformers [J]. *Diagnostics*, DOI: 10.3390/diagnostics13020217.
- LÄSSING J, MAUDRICH T, KEENVILLE R, et al., 2023. Intensity-dependent cardiopulmonary response during and after strength training [J]. *Sci Rep*, DOI: 10.1038/s41598-023-33873-x.
- LIU Y, WU L Q, 2023. Effect of instrument-assisted soft tissue mobilization combined with blood flow restriction training on function, pain and strength of patients with patellofemoral joint pain [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, DOI: 10.1186/s12891-023-06701-6.
- LOCKIE R G, CALLAGHAN S J, ORJALO A J, et al., 2018. Loading range for the development of peak power in the close-grip bench press versus the traditional bench press [J]. *Sports*, 6(3): 97-107.
- MORITANI T, MURO M, NAGATA A, 1986. Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue [J]. *J Appl Physiol*, 60(4): 1179-1185.
- SHINOHARA M, KOUZAKI M, YOSHIHISA T, et al., 1998. Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 77(2): 189-191.
- SUN D P, YANG T L, 2023. Semi-squat exercises with varying levels of arterial occlusion pressure during blood flow restriction training induce a post-activation performance enhancement and improve vertical height jump in female football players [J]. *J Sports Sci Med*, 22(2): 212-225.
- TAKARADA Y, TAKAZAWA H, SATO Y, et al., 2000. Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans [J]. *J Appl Physiol*, 88(6): 2097-2106.
- TEIXEIRA E L, BARROSO R, SILVA-BATISTA C, et al., 2018. Blood flow restriction increases metabolic stress but decreases muscle activation during high-load resistance exercise [J]. *J Muscle Nerve*, 57(1): 107-111.
- WERNBOM M, JÄRREBRING R, ANDREASSON M A, et al., 2009. Acute effects of blood flow restriction on muscle activity and endurance during fatiguing dynamic knee extensions at low load [J]. *J Strength Cond Res*, 23(8): 2389-2395.
- WILK M, KRZYSZTOFIK M, FILIP A, et al., 2020. Does post-activation performance enhancement occur during the bench press exercise under blood flow restriction? [J]. *Int J Environ Res Public Health*, DOI: 10.3390/ijerph17113752.
- YASUDA T, FUJITA T, MIYAGA Y, et al., 2006. Electromyographic responses of arm and chest muscle during bench press exercise with and without KAATSU [J]. *Int J KAATSU Train Res*, 2(1): 15-18.
- YOSHIDA T, WATARI H, 1997. Effect of circulatory occlusion on human muscle metabolism during exercise and recovery [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 75(3): 200-205.

(收稿日期:2023-07-11; 修订日期:2023-11-16; 编辑:尹航)

