



## 加压训练对田径运动员下肢表面肌电信号特征的影响研究

### Research on the Influence of KAATSU Training on the Characteristics of Lower Limbs Surface Electromyogram Signals of Track and Field Athletes

李欣鑫\*

LI Xinxin\*

**摘要:**目的:不同水平加压训练对训练过程中人体下肢表面肌电信号的影响以及训练后一段时间内的持续影响效果。方法:受试者为25名大学生田径运动员,平均年龄为(21.7±2.1)岁。对受试者右侧下肢分别施加100、120和180 mmHg 3种压力,以训练负荷为单次重复最大力量的20%进行仰卧腿举训练。用表面肌电仪记录受试者训练前、训练中、训练后即刻、训练后10、20和30 min的双侧下肢股直肌和股二头肌的原始表面肌电信号。利用便携式超声诊断仪记录训练前后肌肉厚度变化情况。结果:加压侧肌肉均方根肌电百分比显著高于非加压侧。训练结束后,非加压侧股直肌中值频率显著大于加压侧,加压侧股二头肌中值频率显著大于非加压侧。训练结束后30 min,加压侧股直肌与股二头肌中值频率均未能恢复到训练前水平,且与非加压侧相比,存在显著性差异。加压训练结束后,股直肌肌肉厚度显著增加,且持续效果超过30 min;股二头肌肌肉厚度显著增加,在20 min后恢复至训练前水平。结论:低负荷抗阻训练与加压训练相结合,可以提高肌肉激活水平,增加下肢主动肌表面肌电信号中的高频成分,诱发肌肉中II型肌纤维疲劳度增加和训练后肌肉肿胀的持续时间。对主动肌肌肉激活的效果取决于压力水平的选择。提示,在训练过程中应适当选择压力强度,并根据肌肉工作性质分别设计训练方案。

**关键词:**加压训练;田径;下肢;表面肌电

**Abstract:** Objective: To explore the influence of different levels of KAATSU training on surface electromyogram signals, and the continuous effect after training. Methods: Subjects were 25 college track and field athletes, with an average age of (21.7±2.1) years. Three pressures of 100, 120 and 180 mmHg were applied to the right lower limbs of the subjects. Take the training load as 20% of the maximum strength of a single repetition for supine leg training. The electromyogram raw signals of the rectus femoris and biceps femoris of the subjects' bilateral lower limbs before, during, immediately after training, 10, 20 and 30 min after training were recorded by a surface electromyography instrument. Using the portable ultrasonic diagnostic apparatus to record changes in muscle thickness before and after training. Results: The EMG percentages on the blood flow restriction side were significantly higher than those on the non-blood flow restriction side. After training, the median frequency of the rectus femoris on the none blood flow restriction side was significantly greater than that on the blood flow restriction side, and the median frequency of the biceps femoris on the blood flow restriction side was significantly greater than that on the none blood flow restriction side. Thirty min after the training, the median frequency of the rectus femoris and biceps femoris on the blood flow restriction side failed to return to the pre-training level, and there was a significant difference compared with the none blood flow restriction side. After KAATSU training, the thickness of the rectus femoris muscle increased significantly, and the effect lasted for more than 30 min; the thickness of the biceps femoris muscle increased significantly, and it returned to the pre-training level after

**基金项目:**

国家社会科学基金项目(18BTY117)

**\*通信作者简介:**

李欣鑫(1986-),男,讲师,博士,主要研究方向为田径教学与训练, E-mail: lxx19861007@163.com。

**作者单位:**

首都体育学院,北京 100191  
Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100191, China.

20 min. Conclusions: The combination of low-load resistance training with KAATSU training could increase not only the muscle activation, but also the high-frequency components in the sEMG signal. KAATSU training could also induce an increase in the fatigue of type II muscle fibers and prolonged muscle swelling time after training. The effect of muscle activation depends on the choice of KAATSU pressure level. It suggested that the pressure intensity should be appropriately selected during the training process, and training programs should be designed according to muscle work condition.

**Keywords:** KAATSU training; athletics; lower limbs; surface electromyogram

**中图分类号:**G804.2 **文献标识码:**A

加压训练(KAATSU Training)起源于日本,是指在适宜的限制血液流动条件下结合低负荷的抗阻训练模式,目前已广泛应用于康复和健身训练领域(盛菁菁等,2019;徐飞等,2013)。其优点是可以采用较小的训练负荷获得与高强度抗阻训练同等的训练效果。同时,“抗阻+加压”训练能够在各种人群中诱发肌肉肥大和肌肉功能的改善(芦劭明等,2020),这对于运动功能损伤患者以及老年体育健身爱好者等不适宜做大幅度抗阻训练的人群来说,是一种极好的替代性锻炼方式。但目前鲜见有关“抗阻+加压”训练诱发肌肉增能效果的潜在机制的研究。加压干预可诱导表面肌电(surface electromyogram, sEMG)信号的幅值和频率增加,说明可能改变中枢神经系统对运动单位的控制策略(Moritani et al., 1992)。对 sEMG 的频谱分析发现,加压与 sEMG 信号中高频成分增加有关,推测缺血缺氧环境可能诱发更多 II 型肌纤维激活。

加压训练可以诱发 sEMG 频域信号的变化,但对于不同水平加压训练与 sEMG 频域信号变化量之间的关系,目前尚无法确定。此外,对于加压训练诱发 sEMG 信号变化的可持续时间也有待讨论。基于此,本研究旨在观察加压压力与肌肉激活水平是否存在相关关系,并探讨加压训练与延长训练效果之间是否存在相关关系。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 受试者

选取大学生田径运动员 25 名(男性 14 名,女性 11 名)(表 1)。所有受试者均有 2 年以上抗阻训练经验,且最近 4 周没有参加过高强度力量训练;无高血压和下肢静脉曲张等心血管疾病史,无下肢肌肉、骨骼和关节损伤史。受试者在实验前均填写了知情同意书。

表 1 受试者基本身体情况表

Table 1 Basic Physical Condition of Subjects

	样本量(n=25)	男性(n=14)	女性(n=11)
年龄/岁	21.7±2.1	23.6±2.7	19.3±1.9
体质量/kg	68.3±10.3	76.9±8.1	61.7±7.5
身高/cm	171.3±10.3	178.9±3.4	165.7±7.1
BMI/(kg·m <sup>-2</sup> )	24.3±2.3	25.9±3.1	23.4±1.9
腿举 1RM/kg	85.3±20.3	100.9±18.6	61.7±12.5

### 1.2 单次重复最大力量(1RM)测试

参照美国国家体能协会的最大力量测试标准与程序(Lawler, 2012)进行递增负荷测试,直到只能完成 1RM。此外,让受试者对加压训练流程进行模拟,明确实验要求,次日进行正式训练并采集数据。

### 1.3 加压训练方案

受试者先慢跑热身约 5 min 后,将充气袖带(美国 B Strong 公司, BSTRONG 加压训练套件)绑在右腿根部,拧开气囊阀门充气加压至目标气压时拧紧阀门。动作结束后即刻,松开阀门卸下袖带。

抗阻训练采用仰卧腿举动作,躯干与地面倾角保持约 45°,挺胸抬头,双脚与肩同宽,踏于踏板,脚尖向外展 30°左右,膝关节角度约为 45°,双手抓握手柄,完成腿举。要求膝关节完全伸直至 180°后缓慢回到起始姿势,动作过程中头部和躯干保持稳定。抗阻训练负荷为 20% 1RM (Cook et al., 2013)。

加压压力一般为 50~220 mmHg(瞿超艺等,2019)。考虑到本研究受试者为具有一定训练经验的大学生运动员,因此将最低和次低适当压力提升至 100 和 120 mmHg。由于单次训练时间较长,考虑到安全性因素,适当降低最大压力至 180 mmHg。

训练过程由 3 套训练动作组成,每套训练分别对应 1 种加压压力(图 1),压力随机选择。每套动作由 4 组负荷为 20% 1RM 的腿举动作组成。每组重复次数分别为第 1 组 30 次,第 2~4 组各 15 次,间歇时间为 30 s (Scott et al., 2015),每套动作间休息 10 min。

### 1.4 表面肌电信号采集

使用 16 导无线表面肌电信号采集系统(美国 Delsys 公司)采集 sEMG 信号。用酒精擦拭并剔除体毛,电极黏粘位置:1)股直肌(rectus femoris, RF):左右下肢髌前下棘与髌底连线距髌底 1/3 处。2)股二头肌(biceps femoris, BF):左右下肢坐骨结节与腓骨头外侧连线的中点处。采样频率为 1 500 Hz。训练前、中、后期,分别记录 3 次测试动作的 sEMG 信号,并计算均值。

### 1.5 肌肉厚度测量

使用飞利浦 CX50 便携式超声诊断仪(荷兰飞利浦公司),在训练前、训练后即刻、训练后 10、20 和 30 min,分别测量双腿 RF 和 BF 肌肉厚度。RF 的测量部位为股骨大转

子最高点与髌骨点上缘外侧连线的中点,BF为坐骨结节与腓骨头外侧连线的中点。通过人工判读超声图像(图2)中RF和BF肌肉上、下筋膜测量点(A点和B点),计算两点间最大垂直距离,即为肌肉厚度。测试精度精确到1 mm。

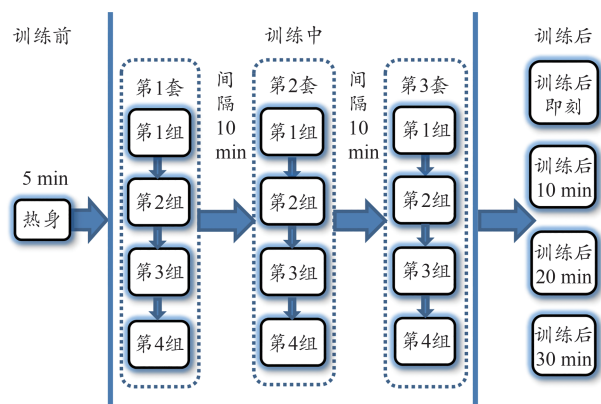


图1 加压训练流程图

Figure 1. KAATSU Training Flow

注:训练前:5 min慢跑。训练中:训练动作为腿举,右侧下肢为加压侧,训练负荷20% 1RM。每次腿举动作持续时间约为5 s。整个训练时间约为30 min。分别在训练前、中、后3部分进行sEMG信号测试。训练中,记录第1组动作的第14、15、16次腿举以及第2、3、4组的第6、7、8次腿举sEMG信号。在第3套腿举动作结束后即刻,卸掉加压带,记录3次腿举的sEMG信号。在10、20和30 min末,分别完成3次腿举动作,并记录sEMG信号。

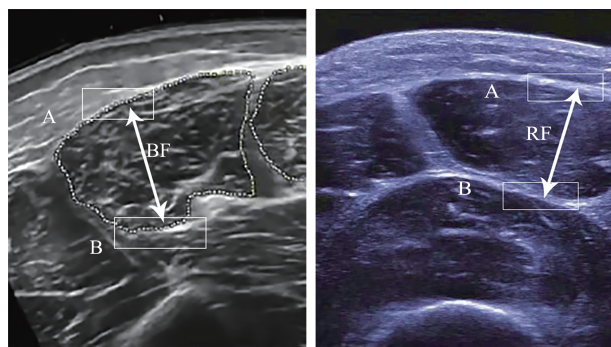


图2 肌肉厚度超声测量图

Figure 2. Muscle Thickness Measurement by Ultrasound

注:RF,股直肌超声轮廓;BF,股二头肌超声轮廓。A、B两点为股直肌、股二头肌上、下筋膜测量判读点。

## 1.6 数据统计与分析

利用EMGWorks 4.0软件,对表面肌电信号原始数据进行翻转、滤波和平滑处理。参照Falconer等(1985)提出的计算方法,对原始肌电信号进行整流和滤波(20~500 Hz)处理,并以1RM测试时的均方根肌电信号(root mean square, RMS)值进行归一化处理。

加压和非加压条件下sEMG信号、肌肉厚度的差异采用配对*t*检验比较。不同加压压力下的sEMG信号、肌肉厚度的差异,采用单因素方差分析比较(ANOVA)。

## 2 研究结果

### 2.1 不同加压压力组合和不同运动阶段的表面肌电信号

中值频率(median frequency, MF)一般认为与肌纤维募集的类型以及肌肉的疲劳有关(王健等,2003)。均方根肌电百分比(root mean square %, RMS%)可在一定程度上反映肌肉的激活程度。表2为不同加压压力的sEMG比较结果。ANOVA分析表明,第1、2套训练中,加压压力对股直肌RMS%有显著影响( $F=28.3, P=0.00; F=5.10, P=0.015$ ),对股直肌MF、股二头肌MF以及股二头肌RMS%均无影响。

配对样本*t*检验表明,股直肌RMS%在各组别中均表现出显著性差异。股二头肌RMS%除在第1套180 mmHg组和第3套100 mmHg组无显著性差异外,其余组均表现出显著性差异。股直肌MF在180 mmHg压力下均表现出显著性差异。股二头肌MF在各组别中均无显著性差异。单因素方差分析表明,无论股直肌或股二头肌,同套训练中的不同压力之间均无显著性差异。

表3为6种不同加压压力顺序组合分别在训练前、中、后期的sEMG信号比较结果。配对*t*检验表明,训练前,序号2~4的股直肌RMS%具有显著性差异。训练中,序号3的股直肌MF,序号1、3~6的股直肌RMS%以及序号1~5的股二头肌RMS%存在显著性差异。训练后,序号1~5的股直肌MF,序号1、3~6的股二头肌MF存在显著性差异。单因素方差分析显示,不同压力组合的变化,对训练后下肢非加压侧的股二头肌MF( $F=2.9, P=0.04$ )以及RMS%( $F=3.38, P=0.02$ )具有显著性影响。

双因素方差分析(表4)表明,运动阶段对股二头肌MF( $F=119.16, P=0.00$ )、股直肌MF( $F=574.42, P=0.00$ )、股直肌RMS%( $F=20.14, P=0.00$ )存在主效应。压力组合与运动阶段之间无交互作用。

### 2.2 加压训练对表面肌电信号的持续性影响效果

股直肌和股二头肌MF在加压与非加压条件下随时间的变化(表5)表明,训练前下肢肌肉的MF无显著性差异。训练后即刻、10、20、30 min,股直肌加压组与非加压组的MF呈显著性差异。股直肌非加压组的MF随时间增加呈明显递增趋势。在非加压条件下,股直肌的MF 30 min后基本恢复至训练前水平。在加压条件下,股直肌MF随时间增加而递增的趋势并不明显,30 min后MF仍显著低于训练前水平。股二头肌MF训练前无显著性差异,在训练后即刻、10、20、30 min,加压与非加压组差异显著,且在训练后30 min,加压组MF仍未恢复到训练前水平。

### 2.3 加压训练对肌肉厚度的影响

非加压侧股直肌厚度在训练后30 min时已恢复到训练前水平。单因素方差分析表明,训练前后,加压侧与非加压侧的股直肌厚度均存在显著性变化。其中,加压侧股直肌厚度在训练后30 min仍显著增加;非加压侧股直肌厚度在训练后30 min与训练前无显著性差异(表6)。

表 2 同套训练中的 sEMG 测试结果比较

Table 2 Test Results Comparison of sEMG in the Same Training Set

加压压力	股直肌 MF/Hz		股直肌 RMS%		股二头肌 MF/Hz		股二头肌 RMS%	
	非加压	加压	非加压	加压	非加压	加压	非加压	加压
第 1 套								
100 mmHg(n=7)	78.9±10.8	82.5±2.1	23.8±7.9	34.4±1.6 <sup>#</sup>	70.1±12.1	69.2±6.4	24.8±9.1	37.4±2.3 <sup>###</sup>
120 mmHg(n=13)	70.8±9.9	80.4±2.8	24.9±9.6	27.5±2.4 <sup>#</sup>	70.1±12.7	67.0±5.2	24.3±12.3	35.0±3.9 <sup>#</sup>
180 mmHg(n=5)	70.7±11.9	81.8±3.2 <sup>#</sup>	24.9±8.5	29.6±3.5 <sup>#</sup>	69.5±10.5	68.7±6.5	24.0±12.6	37.0±2.0
<i>F</i>	0.08	1.54	0.04	28.30	0.01	0.37	0.01	1.49
<i>P</i>	0.92	0.24	0.97	0.00*	0.99	0.70	0.99	0.25
第 2 套								
100 mmHg(n=11)	77.9±12.4	81.0±3.6	25.4±10.6	33.3±1.2 <sup>#</sup>	70.8±10.6	72.8±6.2	24.4±11.2	36.5±3.3 <sup>###</sup>
120 mmHg(n=6)	70.8±12.6	82.1±3.6	23.6±10.5	32.0±1.5 <sup>#</sup>	68.1±12.7	75.7±6.5	25.0±9.8	35.9±3.8 <sup>#</sup>
180 mmHg(n=8)	70.7±12.5	80.4±3.3 <sup>#</sup>	24.9±9.0	31.3±1.6 <sup>###</sup>	69.5±11.0	69.9±5.8	24.0±12.6	35.1±3.8 <sup>#</sup>
<i>F</i>	0.16	0.42	0.06	5.10	0.12	1.56	0.01	0.33
<i>P</i>	0.85	0.66	0.94	0.02*	0.89	0.23	0.99	0.73
第 3 套								
100 mmHg(n=7)	79.9±11.2	79.6±4.2	24.6±9.4	33.3±1.0 <sup>#</sup>	67.6±8.2	71.3±7.1	24.1±12.5	36.2±3.5
120 mmHg(n=6)	71.3±7.7	78.4±6.1	27.2±5.9	30.7±0.8 <sup>#</sup>	71.7±12.6	65.2±5.5	25.1±12.3	34.5±2.8 <sup>#</sup>
180 mmHg(n=12)	70.1±11.4	77.9±5.8 <sup>#</sup>	24.9±8.9	32.3±1.6 <sup>#</sup>	69.5±10.9	68.8±7.5	24.0±13.0	36.1±3.6 <sup>###</sup>
<i>F</i>	0.02	0.21	0.19	5.70	0.24	1.21	0.02	0.50
<i>P</i>	0.98	0.81	0.83	0.10	0.79	0.32	0.98	0.61

注: \*表示不同加压压力组间存在显著性差异; #表示加压侧与非加压侧差异显著, ##表示差异极显著; 表 3 同。

表 3 同一运动阶段的 sEMG 测试结果比较

Table 3 Test Results Comparison of sEMG in the Same Exercise Stage

压力组合 序号	股直肌 MF/Hz		股直肌 RMS%		股二头肌 MF/Hz		股二头肌 RMS%	
	非加压	加压	非加压	加压	非加压	加压	非加压	加压
训练前								
1(n=4)	72.4±9.5	70.9±2.1	20.2±0.7	25.6±4.6	59.1±9.9	64.2±0.8	25.0±1.9	36.6±4.1
2(n=3)	67.3±3.4	67.4±2.7	21.5±0.6	31.1±3.6 <sup>#</sup>	62.1±4.8	63.6±1.4	24.0±3.3	37.8±2.4
3(n=8)	69.4±6.7	72.3±2.1	20.8±0.8	28.5±4.0 <sup>###</sup>	57.9±8.2	59.8±3.3	23.9±2.1	35.5±3.4
4(n=5)	72.2±8.3	70.7±3.4	21.7±1.2	29.1±2.3 <sup>###</sup>	64.5±5.7	61.3±2.5	24.3±2.9	33.3±2.6
5(n=3)	67.7±11.0	70.5±4.1	21.6±1.1	27.4±3.1	60.8±8.3	59.5±3.0	24.7±1.8	34.5±4.3
6(n=2)	72.4±0.1	71.9±2.9	21.3±0.9	21.1±1.0	59.6±5.2	60.5±0.6	22.5±3.0	34.9±5.8
<i>F</i>	0.33	1.44	1.67	2.46	0.52	2.38	0.34	0.78
<i>P</i>	0.89	0.25	0.19	0.07	0.76	0.08	0.89	0.58
训练中								
1(n=4)	81.3±3.9	81.7±4.7	21.2±1.5	32.8±2.2 <sup>#</sup>	72.3±5.8	69.7±7.8	22.8±1.8	36.5±3.4 <sup>#</sup>
2(n=3)	87.0±7.4	81.2±5.0	30.4±1.3	31.4±1.6	72.1±3.6	68.9±5.5	27.4±1.9	34.3±2.2 <sup>#</sup>
3(n=8)	70.7±6.9	79.1±4.0 <sup>#</sup>	22.0±2.0	31.2±2.9 <sup>###</sup>	61.8±2.6	70.5±7.4	21.9±2.4	36.4±3.3 <sup>###</sup>
4(n=5)	77.3±3.9	80.7±2.6	21.3±1.6	30.8±3.2 <sup>#</sup>	69.3±2.4	70.2±5.2	26.6±1.7	34.9±3.7 <sup>#</sup>
5(n=3)	72.7±4.6	80.5±4.5	30.5±0.8	31.2±2.7 <sup>#</sup>	71.9±5.5	67.2±5.7	21.5±1.7	36.6±3.5 <sup>#</sup>
6(n=2)	80.0±1.7	79.2±4.6	21.8±0.5	32.2±1.4 <sup>#</sup>	72.3±4.2	70.2±8.3	24.3±0.4	36.7±2.9
<i>F</i>	1.23	0.92	0.68	1.02	0.41	0.36	0.79	1.06
<i>P</i>	0.34	0.48	0.65	0.41	0.84	0.88	0.57	0.39
训练后								
1(n=4)	60.3±6.1	56.9±3.8 <sup>#</sup>	27.3±3.1	27.0±4.6	44.3±2.7	55.3±4.5 <sup>#</sup>	33.7±3.4	35.5±3.4
2(n=3)	65.6±3.8	56.7±4.1 <sup>#</sup>	30.0±4.8	28.2±4.3	38.6±5.0	55.9±4.1	38.8±3.4	34.6±3.3
3(n=8)	60.1±5.3	57.9±4.2 <sup>###</sup>	30.1±4.5	27.2±4.5	44.3±3.5	55.8±4.6 <sup>###</sup>	36.7±2.3	35.5±3.2
4(n=5)	66.0±3.4	56.8±5.1 <sup>#</sup>	25.0±4.8	27.2±5.0	39.6±2.1	55.0±4.5 <sup>###</sup>	32.5±0.7	33.9±3.0
5(n=3)	65.2±2.3	56.6±3.9 <sup>#</sup>	27.8±1.2	29.3±3.9	39.2±2.2	54.9±5.6 <sup>#</sup>	36.3±0.7	36.2±3.5
6(n=2)	61.2±3.3	58.4±4.3	20.7±2.9	28.3±5.2	43.8±4.6	56.3±4.1 <sup>#</sup>	38.2±2.5	34.4±2.0
<i>F</i>	1.68	0.41	2.28	0.56	2.90	0.19	3.38	1.20
<i>P</i>	0.19	0.84	0.09	0.73	0.04*	0.96	0.02*	0.32

注: 组合序号根据不同受试者随机抽取加压压力进行训练的的顺序决定, 序号 1 表示第 1、2、3 套训练的加压压力为 100、120、180 mmHg; 序号 2 表示 100、180、120 mmHg; 序号 3 表示 120、100、180 mmHg; 序号 4 表示 120、180、100 mmHg; 序号 5 表示 180、100、120 mmHg; 序号 6 表示 180、120、100 mmHg。

表4 不同压力组合与不同运动阶段交互作用的主体间效应检验结果

Table 4 Intersubjective Effect Test Results of Interaction between Different Pressure Combinations and Different Movement Stages

加压压力/ mmHg	运动 阶段	股直肌	股直肌	股二头肌	股二头肌
		MF/Hz	RMS%	MF/Hz	RMS%
100	训练前	73.2±7.5	25.8±0.9	62.4±7.7	34.6±2.4
	训练中	81.8±5.7	33.9±1.9	72.4±3.9	36.5±2.2
	训练后	62.0±4.8	29.7±4.6	43.0±4.2	36.4±3.5
120	训练前	70.2±7.7	20.9±0.7	65.4±7.8	34.4±2.3
	训练中	80.1±5.9	30.3±0.8	69.9±1.7	35.4±2.0
	训练后	61.8±7.3	27.4±2.8	42.9±3.7	35.1±2.7
180	训练前	70.9±7.3	21.4±1.1	60.4±7.4	33.8±2.3
	训练中	80.1±3.7	30.9±1.2	69.1±3.9	36.6±1.3
	训练后	64.2±3.0	25.0±4.8	40.1±3.3	35.3±3.3
<i>F</i>		0.41	0.96	1.48	0.60
<i>P</i>		0.94	0.48	0.15	0.82

表5 训练前后中值频率变化情况表

Table 5 Variation of MF before and after Training Hz

	股直肌		股二头肌	
	非加压	加压	非加压	加压
	训练前	70.2±7.0	70.4±7.1	60.4±7.1
训练后即刻	61.1±6.0*	55.7±5.6*#	41.4±3.6*	50.9±6.0*#
10 min	62.8±5.1*	57.5±5.9*#	41.9±3.9*	55.4±5.1*#
20 min	66.6±9.3*	57.3±3.2*#	45.2±1.2*	57.1±3.3*#
30 min	69.4±5.9	59.1±4.4*#	52.1±2.4	58.8±5.9*#

注:\*表示与训练前相比, MF存在显著性差异;#表示非加压组与加压组MF存在显著性差异。

表6 训练前后肌肉厚度测量结果

Table 6 Test Results of Muscle Thickness before and after Training cm

	股二头肌		股直肌	
	非加压侧	加压侧	非加压侧	加压侧
	训练前	5.11±0.66	4.82±0.67	5.91±0.72
训练后即刻	5.28±0.72#	5.25±0.92#	6.41±0.61*	6.29±0.66*
10 min	5.09±0.69	5.17±0.89#	6.18±0.83*	6.26±0.81*
20 min	5.10±0.52	5.11±0.67	6.13±0.71*	6.21±0.82*
30 min	5.10±0.71	5.07±0.64	5.93±0.64	6.12±0.83*

注:\*表示与训练前相比股直肌肌肉厚度差异显著,#表示与训练前相比股二头肌肌肉厚度差异显著。

加压侧股二头肌厚度在训练后即刻和训练后10 min显著增加[肌肉厚度<sub>股二头肌训练后即刻</sub>为(5.25±0.92)cm;肌肉厚度<sub>股直肌10 min</sub>为(5.17±0.89)cm],20 min后肌肉厚度与训练前比较无显著性差异。非加压侧股二头肌厚度在训练后即刻显著增加,10 min之后与训练前比较无显著性差异(表6)。

### 3 分析与讨论

本研究部分证实了与非加压训练相比,加压训练使肌肉表现出更大的电生理反应,而且加压训练效果影响的持续时间更长。

#### 3.1 加压训练对肌肉激活情况的影响

本研究中,受试者采用随机抽取加压压力的方式进行抗阻练习,随机抽取的加压压力组合对加压侧下肢的sEMG信号未见显著影响。有研究认为,加压训练会使sEMG的振幅增加(Wernbom et al., 2009)。本研究中也存在类似现象:即使受试者进行训练的压力组合是随机抽取的,加压侧股直肌、股二头肌RMS%均有明显增高趋势。个别压力组合下未表现出显著性差异,可能与该压力组合下样本数量偏少有关。此外,RMS%幅度的增加可能反映了肌肉组织对II型肌纤维募集的增强(Moore et al., 2004),通常这种募集的增强被认为是由于代谢物局部积累造成的(Loenneke et al., 2015),这也可以解释本研究中训练后的股直肌RMS%仍高于训练前水平。

此外,虽然在第1、2套训练中不同压力对股直肌RMS%有显著影响,但当压力水平高于120 mmHg且持续升高后,肌肉的激活程度并没有表现出继续上升的趋势。在第3套训练中,受到前2套训练代谢物累积的影响,由加压压力造成的肌肉激活差异性被进一步削弱,并未表现出显著差异性。由于负荷量和肌肉做工相对固定,这意味着加压训练并非压力越大肌肉激活效果越好。加压训练可以在运动过程中增强神经激活并增强对II型肌纤维运动单位的募集,通过这种生理补偿作用来对抗由于压力增加而产生对肌纤维收缩的抑制作用(Takarada et al., 2000)。如果肌肉中II型肌纤维的数量相对固定,那么这种生理补偿作用将不会一直持续。因此,加压压力的变化会使肌肉激活程度在短时间内表现出一定程度的应激性波动,随着训练时间的增加,该波动趋于稳定。

RMS%没有继续增加也可能是在加压条件下下肢肌肉组织出现供血、供氧不足,肌纤维活性下降导致肌肉激活程度降低(Takarada et al., 2002)。在机械压力的挤压作用下,局部肌肉神经接头处兴奋传递受限,也可能导致部分肌纤维未能有效激活,使肌肉总体RMS%下降。而这种抑制作用在一定程度上抵消了对II型肌纤维运动单位增加募集的效果,使得整体的肌肉激活程度维持不变。因此,对加压压力的优化选择,是决定其训练效果的关键因素之一。也有学者提出,用动脉闭塞压力百分比(Freitas et al., 2020)或者通过使用0~10的主观感知压力范围来个性化加压强度(Wilson et al., 2013),达到加压压力选择最优化,而非压力越大效果越好,也从一定程度上证实了上述结果。

#### 3.2 加压训练对表面肌电信号中值频率(MF)的影响

本研究中,与训练前水平相比,训练中加压与非加压组股直肌和股二头肌MF均显著增加,该现象可能与更多II型肌纤维参与募集有关(Cook et al., 2013)。本研究表

明,在训练结束后,股直肌与股二头肌的 MF 较训练前均有显著下降。已有研究证实,疲劳诱发肌电信号 MF 的降低与肌纤维传导速度的降低密切相关(Eberstein et al., 2010),肌肉疲劳导致内环境酸度增加以及肌浆网  $Ca^{2+}$  摄取减少都会影响到肌肉的收缩功能(Place et al., 2010),从而降低 MF。如果该假设成立,则可以解释加压与非加压侧 MF 同时降低的现象。

值得注意的是,训练后加压侧股直肌 MF 下降幅度显著大于非加压侧,说明加压诱导疲劳的效果较为明显,但股二头肌 MF 却表现出训练后非加压侧下降幅度大于加压侧的特点,目前尚不清楚这种反应的确切机制,有可能与神经疲劳的类型有关。现有关于拮抗肌的表面肌电信号研究表明,腿举练习时拮抗肌主要以共激活的形式参与关节运动(贾谊等, 2017; 张肃等, 2015),并且其活动远低于主动肌(文烨, 2012),因此,推测在低负荷抗阻训练结合加压训练过程中,股二头肌 I 型肌纤维的活跃程度高于 II 型肌纤维,加压训练可能对提高拮抗肌 I 型肌纤维的募集程度效果更好。另外,加压袖带固定于大腿近侧端,气囊压迫部位更靠近于股直肌肌腹中央,与股二头肌相比可能更易引起神经肌肉疲劳。

### 3.3 加压训练对肌肉训练的持续效果

本研究中,股直肌和股二头肌训练后的 MF 均出现下降,可能是肌肉中 II 型肌纤维运动后疲劳导致。肌肉的 MF 随负荷的增加而逐渐下降,且主动肌更易发生疲劳(Nyakayiru et al., 2019)。在非加压条件下,随着恢复时间的延长, MF 逐步回归到原有水平。加压条件下,肌肉 MF 在训练后 30 min 仍未恢复到原有水平,说明加压训练诱发肌肉疲劳程度更深,且恢复所需时间更久。王健等(2003)的研究表明,诱发肌肉疲劳而导致肌电信号变化的生理学机制有中枢和外周两方面,但诱发中枢疲劳一般需要较大负荷量和较长的运动持续时间,这与本研究的实验条件不符,因此本研究结果更倾向于由外周疲劳所致。结合本研究中训练前后肌肉厚度变化的测量结果,表明加压训练后肌肉肿胀更为明显,可能抑制兴奋-收缩耦联过程,从而减慢兴奋传导速度,导致 MF 下降。

### 3.4 肌肉厚度变化情况

本研究表明,加压训练可以有效增加股直肌厚度,持续时间比非加压条件更为持久。对股二头肌也存在类似效果,但持续时间较短。这与 Yasuda 等(2014)的研究结果类似,原因可能是加压训练导致运动中细胞水合作用增加的急性细胞肿胀反应(Loenneke et al., 2015)。虽然血浆生长激素浓度的升高与肌肉增长之间的内在关系机制目前尚不清楚,但现有研究结果普遍认为,加压结合抗阻训练能够达到预防肌肉萎缩(Takarada et al., 2002)和增肌效果(Loenneke et al., 2012)。

在本研究中,低强度抗阻训练与加压训练相结合,会引起肌肉厚度的显著增加,但训练负荷量却只有传统负

荷量的 1/3~1/4,并且与大负荷抗阻训练相比,加压训练可导致运动后急性肌肉肿胀,并且主动肌肌肉肿胀效果的持续时间更长。

## 4 结论

低负荷抗阻训练与加压训练相结合可以提高肌肉激活水平,增加下肢主动肌 sEMG 信号中的高频成分,诱发肌肉中 II 型肌纤维疲劳度增加。未证明加压压力与肌肉激活水平之间存在相关性。随训练时间的增加,由加压压力不同而造成的肌肉激活水平差异性会逐渐减小。加压训练可以延长下肢肌肉训练后的肿胀持续时间,更有效提高下肢拮抗肌对 I 型肌纤维的募集效果。

## 5 不足与局限性

1)由于受试者是一次性完成实验,加压压力与压力次序都会对实验结果产生影响,造成实验信度较低。应对受试者分组进一步优化,采用多次重复测量法提高实验信度。2)腿举实验具有一定局限性,一侧(实验侧或对照侧)下肢先出现疲劳后,非疲劳侧会代偿性做功,从而影响实验结果。3)由于各组合样本量差异较大,出现相互比较可信度低和样本量过小影响统计结果等问题。

## 参考文献:

- 贾谊,薛瑞婷,魏亮,2017. 人体快速起跳动作的下肢表面肌电信号特征研究[J]. 中国体育科技, 53(2):64-70.
- 芦劭明,刘善云,孙鹏,等,2020. 不同压力血流限制结合低强度抗阻训练对大学生下肢肌肉及心肺功能影响[J]. 中国应用生理学杂志, 36(6): 595-599.
- 瞿超艺,覃飞,徐旻霄,等,2019. 加压训练在体育应用时的禁忌与风险防范[J]. 中国体育科技, 55(5): 3-7.
- 盛菁菁,魏文哲,孙科,等,2019. 加压状态下慢速下坡步行的生理负荷与增肌效果研究[J]. 中国体育科技, 55(3):13-19.
- 王健,刘加海,2003. 肌肉疲劳的表面肌电信号特征研究与展望[J]. 中国体育科技, 39(2):4-7.
- 文烨,2012. 优秀乒乓球运动员肘关节等动屈伸运动时拮抗肌共激活现象研究[J]. 中国体育科技, 48(4):71-77, 89.
- 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.
- 张肃,高峰,2015. 膝关节最大和次最大等速运动至疲劳过程中主动肌与拮抗肌肌电特征分析[J]. 中国组织工程研究, 19(33):5344-5350.
- COOK S B, MURPHY B G, LABARBERA K E, 2013. Neuromuscular function after a bout of low-load blood flow-restricted exercise[J]. Med Sci Sport Exerc, 45(1):67-74.
- EBERSTEIN A, BEATTIE B, 2010. Simultaneous measurement of muscle conduction velocity and EMG power spectrum changes during fatigue[J]. Muscle Nerve, 8(9):768-773.
- FALCONER K, WINTER D A, 1985. Quantitative assessment of co-contraction at the ankle joint in walking[J]. Electromyogr Clin Neurophysiol, 25(23):135-149.

(下转第 26 页)