



# 加压训练对中老年人下肢肌肉力量及肥大效应的Meta分析

## Effects of KAATSU Training on Lower Limb Muscle Strength in Middle-Aged and Elderly People: A Meta-Analysis

柳皓严<sup>1</sup>, 吴雪萍<sup>2</sup>, 邢玉<sup>1</sup>, 吴瑛<sup>2\*</sup>

LIU Haoyan<sup>1</sup>, WU Xueping<sup>2</sup>, XING Yu<sup>1</sup>, WU Ying<sup>2\*</sup>

**摘要:**目的:运用Meta分析方法系统评价加压训练(又称血流限制训练)对中老年人下肢肌肉力量及肌肉肥大效应的影响,并与传统抗阻训练及步行训练比较。方法:系统检索万方数字资源数据库、中国知网数据库、EBSCOhost、PubMed、Web of Science 以及 Cochrane 图书馆等数据库,检索日期为默认起始时间至2020年5月,由2名评价员依据纳入和排除标准独立筛选加压训练提高中老年人下肢肌肉力量及肥大的研究文献,采用 Revmen 5.3 对所有纳入文献进行评价,并对其数据进行分析。结果:1)经过4轮排除,最终纳入10篇文献,研究总样本量为242人;2)低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练对提高中老年人的肌肉力量和促进肌肉肥大均有显著效果,二者无显著性差异,合并效应量分别为  $SMD=-0.18$ ,  $95\% CI: -0.41, 0.05, P \geq 0.01$  和  $MD=0.15$ ,  $95\% CI: -0.37, 0.67, P \geq 0.01$ ; 3)在低强度抗阻训练中,加压方案的添加显著提高了中老年人的下肢肌肉力量,效应量为:  $SMD=0.74$ ,  $95\% CI: 0.29, 1.19, P < 0.01$ ; 4)在步行训练中,加压步行训练显著提高了中老年人的下肢肌肉力量和促进肌肉肥大,合并效应量分别为:  $SMD=1.84$ ,  $95\% CI: 1.08, 2.61, P < 0.01$  和  $SMD=1.06$ ,  $95\% CI: 0.61, 1.50, P < 0.01$ 。结论:低强度加压抗阻训练及加压步行训练能显著提高中老年人的下肢肌肉力量及促进肌肉肥大;低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练促进肌肉力量和肌肉肥大的效果相似。

**关键词:** 加压训练; 中老年人; 肌肉力量; 肌肉肥大; 荟萃分析

**Abstract:** Objective: To systematically evaluate the effect of KAATSU training or blood flow restriction training (BFRT) on the muscle strength and muscle hypertrophy of middle-aged and elderly people using Meta analysis method, and to compare it with resistance training and walking training programs. Methods: Wanfang, CNKI, EBSCOhost, PubMed, Web of Science and Cochrane Library were searched systematically. The retrieval date starts from the default starting time and ends in May 2020. Two reviewers independently screened the literature on the effects of BFRT on the lower limb muscles of middle-aged and elderly people according to the inclusion and exclusion criteria. The included literature is evaluated for methodological quality by Revmen 5.3, and statistical analysis is performed on its data. Results: 1) After 4 rounds of exclusion, 10 articles are finally included. The total sample size of the study is 242. 2) A significant effect of both the low-intensity BFR resistance training group and the high-intensity resistance training group to increase muscle strength and promote muscle hypertrophy, and there is no significant difference between the two. The pooled effect sizes are:  $SMD=-0.18$ ,  $95\% CI: -0.41, 0.05, P \geq 0.01$  and  $MD=0.15$ ,  $95\% CI: -0.37, 0.67, P \geq 0.01$ . 3) In the low-intensity resistance training program, the BFR resistance training significantly improves the lower limb muscle strength in middle-aged and elderly people, the pooled effect sizes are:  $SMD=0.74$ ,  $95\% CI: 0.29, 1.19, P < 0.01$ . 4) In walking training, the BFR walking training significantly improves the lower limb muscle strength and promote muscle hypertrophy in middle-aged and elderly people, the pooled effect sizes are:  $SMD=1.84$ ,  $95\% CI: 1.08, 2.61, P < 0.01$  and  $SMD=1.06$ ,  $95\% CI: 0.61, 1.50, P < 0.01$ . Conclusions: Low-intensity BFR resistance training and BFR walking

### 基金项目:

海南大学青年学者扶持项目

### 第一作者简介:

柳皓严(1992-),男,讲师,博士,主要研究方向为运动与老年人健康促进, E-mail: 418179354@qq.com。

### \*通信作者简介:

吴瑛(1957-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为运动训练, E-mail: wuying@sus.edu.com。

### 作者单位:

1. 海南大学, 海南海口 570228;  
2. 上海体育大学, 上海 200438  
1. Hainan University, Haikou 570228, China;  
2. Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China.

training can significantly improve lower limb muscle strength and promote lower limb muscle hypertrophy in middle-aged and elderly people. Moreover, the effects of low-intensity BFR resistance training and high-intensity resistance training on muscle strength and muscle hypertrophy are similar.

**Keywords:** blood flow of restriction training; middle-aged and elderly people; muscle strength; muscle hypertrophy; Meta analysis

**中图分类号:**G808.1 **文献标识码:**A

肌肉力量与质量是维持个体健康、生活质量和寿命的重要因素 (Seguin et al., 2003)。研究表明, 30 岁后, 成年人肌肉质量每 10 年下降约 3%~8% (English et al., 2010)。随着年龄的增长, 机体表现出与年龄相关的骨骼肌萎缩, 逐渐限制身体活动, 增加跌倒、骨折、残疾和心脏病等风险 (Marcell, 2003; Visser et al., 2005)。美国运动医学会 (American College of Sports Medicine, ACSM) 指出, 采用强度  $\geq 70\%$  最大重复力量 (1RM) 的抗阻训练, 可有效增强肌肉力量, 促进肌肉肥大, 改善神经适应 (Zajko et al., 2009)。然而, 高强度的抗阻训练效果虽然显著, 却大幅度增加了参与者的运动损伤风险。中老年人常伴有冠心病、糖尿病或肌肉骨骼损伤等疾病, 在高强度抗阻训练时往往受到限制, 而低强度抗阻训练又难以获得理想的增长肌肉力量的效果 (Papa et al., 2017)。因此, 探索中老年人增强肌肉力量及促进肌肉肥大的新训练方法十分关键。

近年来, 加压训练 (KAATSU training) 又称血流限制训练 (blood flow of restriction training, BFR) 逐渐得到各学科领域学者的关注和重视。它是一种起源于日本的训练方法, 指在训练期间利用止血带或特殊袖带在受试者肢体近端加压, 通过限制血流的方式提高训练效果。研究表明, 低强度加压抗阻训练和加压步行训练可促进下肢肌肉力量以及肌肉肥大, 其中, 低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练的效果相似 (孙科等, 2019; 王明波等, 2019; Karabulut et al., 2010)。相对而言, 低强度加压抗阻训练比高强度抗阻训练产生更少的负荷和关节机械应力。对于不能承受高强度训练的中老年人, 低强度加压抗阻训练和加压步行训练更易操作 (赵静等, 2020)。徐飞等 (2013) 建议, 抗阻训练中可添加加压方式作为高强度抗阻训练的补充, 减缓老年人肌肉的萎缩并促进其增长。目前, 加压训练对中老年人下肢肌肉力量及肥大效应影响的研究尚需进一步探索和证实。综上, 本研究通过 Meta 分析研究国内外加压训练对中老年人下肢肌肉力量及肥大效应的影响, 探讨加压训练对中老年人下肢肌肉力量和肌肉肥大效应的效应量, 分析各研究间的异质性及其原因。

## 1 研究方法

本研究严格遵循 Meta 分析指南的标准进行研究 (Liberati et al., 2009)。

### 1.1 文献检索

2 名检索人员登录万方数字资源数据库、中国知网数据库、EBSCOhost、PubMed、Web of Science 以及 Cochrane 图书馆等数据库完成文献检索, 时间截至 2020 年 5 月 30 日。中文检索词包括: 血流限制训练、加压训练、中年人、老年人、肌肉、肌肉力量、随机对照实验等, 英文检索词包括: blood flow restriction training、KAATSU training、occlusion training、middle-aged、muscle strength、strength、aging、elderly、older adults、a randomized control trial 等, 进行组合式检索。

### 1.2 文献纳入与排除标准

文献纳入标准: 1) 实验设计为随机对照实验或自身对照实验; 2) 实验对象为年龄  $\geq 50$  岁的健康中老年人, 种族、国家不限, 无心血管等方面疾病; 3) 至少有 1 个实验组以加压训练作为干预手段, 干预时间  $\geq 4$  周, 对照组包括步行或抗阻训练; 4) 结局指标至少包含下肢肌肉力量指标、下肢肌肉肥大效应指标中的 1 种; 5) 如果同一文献中有多组可用数据, 可作为多项研究。

文献排除标准: 1) 文献综述、会议文献或个案研究; 2) 非中文或英文文献; 3) 重复发表、低质量的文献; 4) 动物实验; 5) 实验干预为单次急性干预; 6) 实验数据未以平均值  $\pm$  标准差 ( $M \pm SD$ ) 形式表现; 7) 实验无有效数据, 且与该文献作者索要未果; 8) 实验组为组合干预的文献, 如加压训练结合有氧训练、药物摄入的组合干预; 9) 加压部位非位于下肢。

### 1.3 文献筛选

2 名评价员采用文献纳入、排除标准独立筛选, 根据题目和摘要选择相关文献, 下载符合标准的文献精读, 结束后共同对评价结果进行一致性统计。若意见不一致, 咨询第 3 名评价员, 共同讨论后决定是否纳入。

### 1.4 数据提取

采用表格形式提取纳入文献的基本信息: 1) 研究信息, 包括文献作者、年份、基线情况等; 2) 实验干预信息, 包括实验设计等; 3) 干预基本措施, 包括运动周期、运动强度、运动频率等; 4) 结局指标, 对缺少数据的文献通过邮件联系作者获取。

### 1.5 文献质量评价

2 名评价员通过 Cochrane Handbook 中的风险偏倚评估工具, 以高偏倚风险、低偏倚风险、此信息未提供对纳入文献逐条进行评估。

## 1.6 数据分析

采用 Revman 5.3 对纳入文献的结局指标进行统计。首先进行异质程度检验,采用  $I^2$  统计量进行各研究间的异质程度水平检验。依据 Cochrane Handbook 评价标准,当  $I^2=0$  时,各研究间不存在异质性;当  $I^2<50\%$  时,分析选用固定效应模型,并通过亚组分析探讨各研究之间异质程度的中间变量,反之则选用随机效应模型。纳入文献的结果指标测试单位一致,采用均数差(mean difference, MD)作为效应量,反之采用标准化均数差(standardized

mean difference, SMD)作为效应量,并以 95% 置信区间计算,以  $P<0.05$  为差异有显著性。采用漏斗图进行发表偏倚性分析,使用实验组和对照组的后测值进行 Meta 分析。

## 2 结果

### 2.1 文献检索信息

本研究共检索相关文献 861 篇,其他渠道手工检索 2 篇,分析文献标题、摘要、阅读文献全文等,剔除不合格的文献后,最终有 10 篇文献符合纳入标准(图 1)。

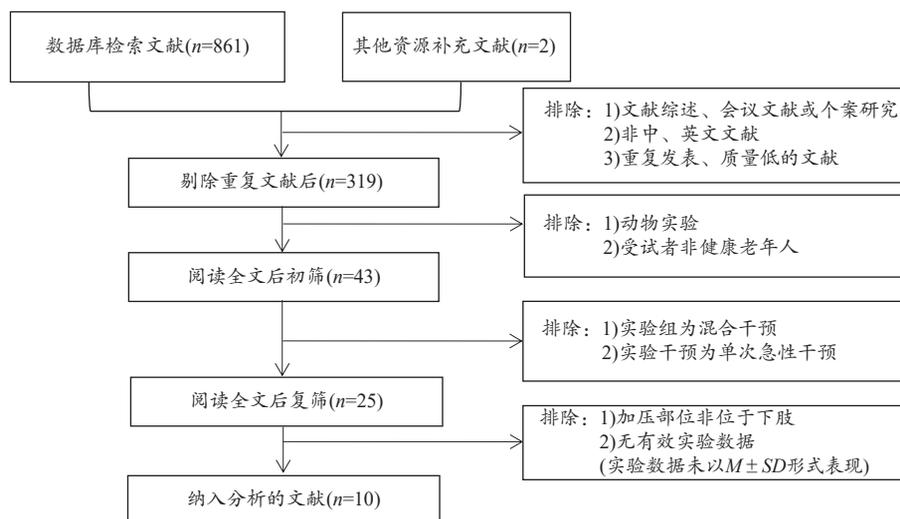


图1 纳入文献筛选流程

Figure 1. Flow Diagram of Study Selection

### 2.2 纳入文献的基本特征

纳入本研究的 10 篇文献发表年份为 2011—2019 年;所包含的受试者均为健康中老年人,样本量共计 242 人,其中,实验组共计 124 人,对照组共计 118 人,年龄为 57~90 岁;实验组干预方式为低强度加压抗阻或加压步行训练,对照组为常规步行、高强度或低强度抗阻训练;其他纳入信息还包括袖带宽度、运动周期、强度、频率和平均加压压力(表 1)。

### 2.3 纳入文献偏倚性分析

纳入文献共计 10 篇,其中,8 篇对随机分组方法进行了描述,3 篇详细描述了隐藏分配方案,1 篇使用双盲法,2 篇使用结局评估盲法;7 篇结果数据完整,3 篇实验数据已从原文作者处索取;3 篇质量较高,7 篇存在一定的风险偏倚性,属于中等质量文献(图 2)。

### 2.4 加压训练的 Meta 分析结果

#### 2.4.1 低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练对中老年人下肢力量的影响

有 5 篇纳入文献(14 项研究)探讨了低强度加压抗阻训练与控制组高强度抗阻训练对中老年人下肢肌肉力量的影响,共计 111 名实验对象。如图 3 所示, $P=0$ ,表示各

研究不存在异质性,因此分析选择固定效应模型。Meta 分析结果显示,2 种干预均能增强中老年人的下肢肌肉力量,干预效果无显著性差异,其中  $SMD=-0.18$ , 95% CI:  $-0.41, 0.05$ ,  $P\geq 0.01$ ,表明实验组与控制组中 2 种运动干预增强中老年人下肢力量的程度相似。

#### 2.4.2 低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练对中老年人下肢肌肉肥大效应的影响

有 3 篇纳入文献(3 项研究)探讨了低强度加压抗阻训练与控制组高强度抗阻训练对中老年人下肢肌肉肥大效应的影响,共计 57 名实验对象。如图 4 所示, $P=0$ ,分析选择固定效应模型。Meta 分析结果显示,2 种干预均能促进中老年人下肢肌肉肥大,干预效果差异无统计学意义,其中  $SMD=0.15$ , 95% CI:  $-0.37, 0.67$ ,  $P\geq 0.01$ ,表明实验组与控制组中 2 种运动干预促进中老年人下肢肌肉肥大的程度相似。

#### 2.4.3 低强度加压抗阻训练与低强度抗阻训练对中老年人下肢力量的影响

有 3 篇纳入文献(11 项研究)探讨了低强度加压抗阻训练与控制组低强度抗阻训练对中老年人下肢肌肉力量的影响,共计 93 名实验对象。如图 5 显示, $P=67\%$ ,表明

各项研究之间存在中度异质性,因此分析选择随机效应模型。Meta 分析结果显示,  $SMD=0.74$ , 95% CI: 0.29, 1.19,  $P<0.01$ , 表明实验组运动干预能够显著提高中老年人的下肢肌肉力量, 效果优于控制组。

表 1 纳入文献基本特征以及结局指标  
Table 1 Basic Information of Included Studies

文献	干预方式	n	年龄/岁	运动干预特征					结局指标	
				周数	频率 (次·周 <sup>-1</sup> )	运动强度	持续时间 (min·次 <sup>-1</sup> )	袖带宽度 /mm		平均压力 /mmHg
Cook 等 (2017)	LL-BFR	12	≥65	12	2	30%~50% 1RM	—	60	184	腿伸 1RM、腿屈 1RM、MVC、 腿举 1RM
	HL	12				70% 1RM				
Cook 等 (2019)	LL-BFR	10	67~90	12	2	30%~50% 1RM	—	60	184	膝伸 10RM、膝屈 10RM、膝伸 MVC、膝屈 MVC、股四头肌 CSA
	HL	11				70% 1RM				
Libardi 等 (2015)	LL-BFR	9	60.6~68.8	12	2	20%~30% 1RM	—	175	67	1RM、股四头肌 CSA
	HL	8				70%~80% 1RM				
Vechin 等 (2015)	LL-BFR	8	59~71	12	2	20%~30% 1RM	—	180	71	腿举 1RM、股四头肌 CSA
	HL	8				70%~80% 1RM				
Rubens 等 (2018)	LL-BRFa	11	63.71~73.89	16	3	20%~30% 1RM	—	—	高压:186 膝伸等速力矩、膝屈等速力矩 低压:105	
	LL-BRFb	11				20%~30% 1RM				
	HL	10				70%~80% 1RM				
Patterson 等 (2011)	LL-BFR	10	62~73	4	3	25% 1RM	—	—	110	跖屈肌 1RM、跖屈肌 MVC、跖 屈肌等速力矩
	LL	10				25% 1RM				
Shimizu 等 (2016)	LL-BFR	20	67~75	4	3	20% 1RM	—	100	200	跖屈肌 1RM、跖屈肌 MVC、跖 屈肌等速力矩
	LL	20				20% 1RM				
Ozaki 等 (2011a)	BFR-W	10	57~73	10	4	45% HRR	20	50	170	膝伸等速力矩、膝屈等速力 矩、30 s 坐站次数、股四头肌 CSA、大腿中部 CSA、腿部肌 肉量、股四头肌肌肉量
	常规步行	8				45% HRR				
Clarkson 等 (2017)	BFR-W	10	60~80	6	4	4 km/h	10	106	—	30 s 坐站次数
	常规步行	9				4 km/h				
Ozaki 等 (2011a)	BFR-W	13	57~76	10	4	45% HRR	20	50	200	膝伸等速力矩、膝屈等速力 矩、股四头肌 CSA
	常规步行	10				45% HRR				

注:LL-BFR 为低强度加压抗阻训练,HL 为高强度抗阻训练,LL 为低强度抗阻训练,BFR-W 为加压步行训练。MVC 为最大肌肉收缩,CSA 为生理横切面积,HRR 为储备心率。

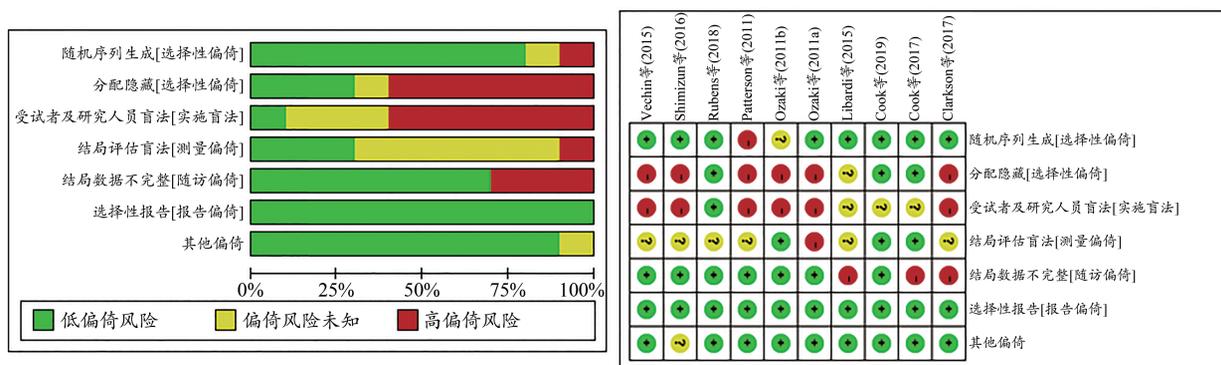


图 2 纳入文献偏倚风险分析  
Figure 2. Risk of Bias Analysis of Included Studies

2.4.4 加压步行训练与常规步行训练对中老年人下肢肌肉力量的影响

有 3 篇纳入文献(9 项研究)探讨了加压步行训练与控制组常规步行训练对中老年人下肢肌肉力量的影响,共

计 60 名实验对象。如图 6 所示,异质性  $P=75%$ ,因此分析选择随机效应模型。Meta 分析显示,  $SMD=1.84$ , 95% CI: 1.08, 2.61,  $P<0.01$ , 表明实验组运动干预能够显著提高中老年人的下肢肌肉力量, 效果优于控制组。

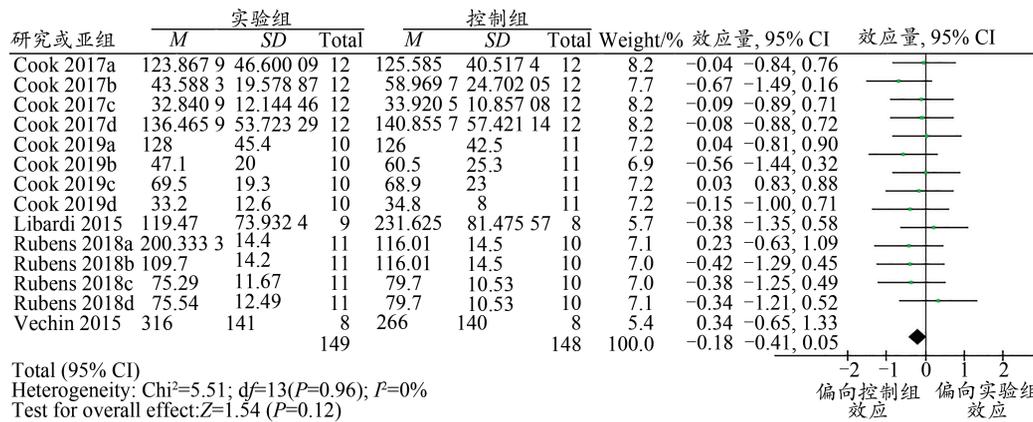


图3 低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练对下肢肌肉力量的影响

Figure 3. Effects of LL-BFR and HL on Lower Limb Muscle Strength

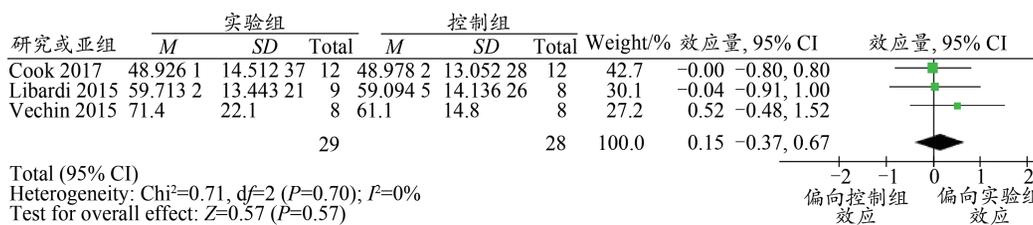


图4 低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练对下肢肌肉肥大效应的影响

Figure 4. Effects of LL-BFR and HL on Lower Limb Muscle Hypertrophy

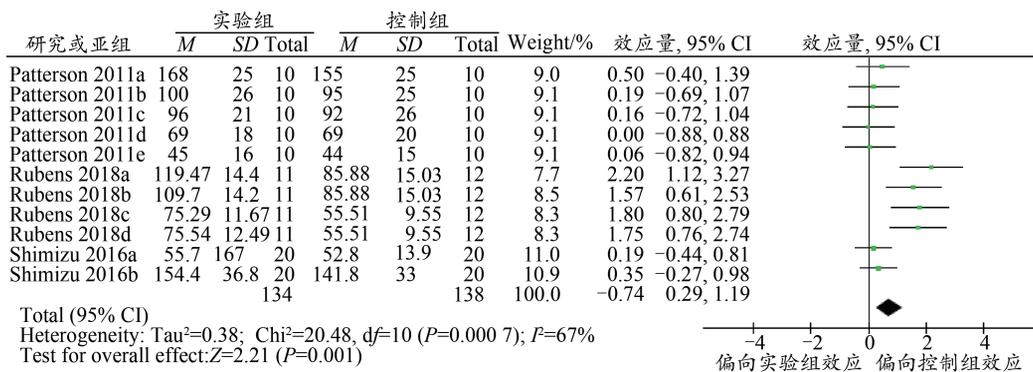


图5 低强度加压抗阻训练与低强度抗阻训练对下肢肌肉力量的影响

Figure 5. Effects of LL-BFR and LL on Lower Limb Muscle Strength

#### 2.4.5 加压步行训练与常规步行训练对中老年人下肢肌肉肥大效应的影响

有2篇纳入文献(5项研究)探讨了加压步行训练与控制组常规步行训练对中老年人下肢肌肉肥大效应的影响,共计算41名实验对象。如图7所示,  $P=0\%$ ,分析选择固定效应模型。Meta分析显示,  $SMD=1.06$ , 95% CI: 0.61, 1.50,  $P<0.01$ ,表明实验组运动干预能够显著促进中老年人下肢肌肉肥大,与控制组存在显著差异。

#### 2.5 发表偏倚分析

为探究发表偏倚,通常对超过10项研究的Meta分析做漏斗图,并进行分析(刘鸣,2011)。本研究中有2项Meta分析的研究个数超过10项,需进行发表偏倚分析。

分别以低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练对下肢肌肉力量的影响以及低强度加压抗阻训练与低强度抗阻训练对下肢肌肉力量的影响做漏斗图。从图8A可知,所有研究均有较好的对称分布,从图8B可知,左右基本呈对称分布,表明研究不存在明显发表偏倚。

#### 2.6 低强度加压抗阻训练与低强度抗阻训练对下肢力量的亚组分析

为探索异质性的缘由,本研究对低强度加压抗阻训练对中老年人肌肉力量的影响进行了亚组分析。对纳入文献按照干预周期分为4周和16周2个亚组;在加压压力方面,根据李卓倩等(2020)的研究,将平均压力分为0~140 mmHg和180~220 mmHg 2个亚组。

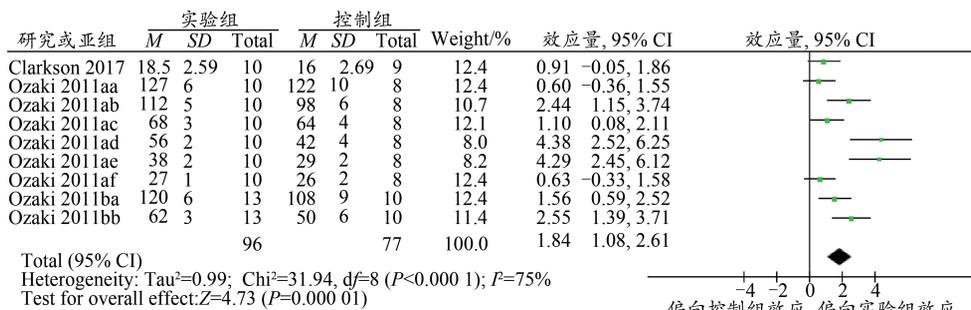


图 6 加压步行训练与常规步行训练对下肢肌肉力量的影响

Figure 6. Effects of BFR-W and Walking on Lower Limb Muscle Strength

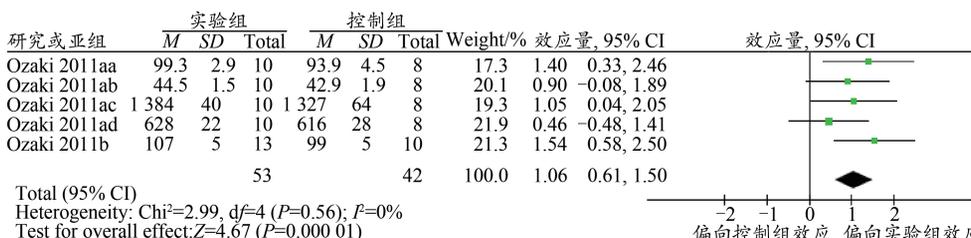


图 7 加压步行训练与常规步行训练对下肢肌肉肥大效应的影响

Figure 7. Effects of BFR-W and Walk on Lower Limb Muscle Hypertrophy

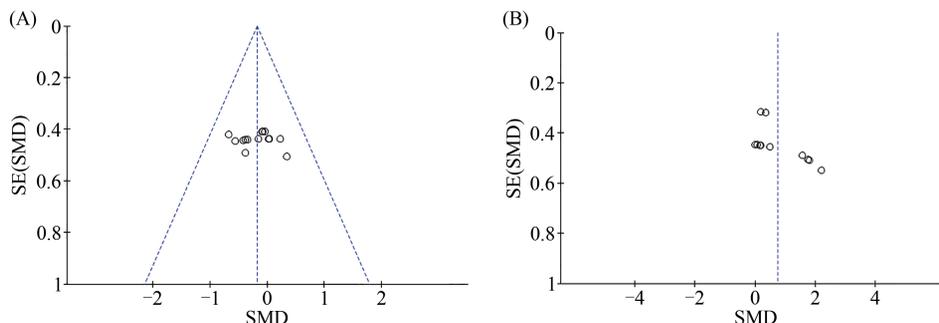


图 8 低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练(A)和低强度抗阻训练(B)对下肢肌肉力量的影响

Figure 8. Funnel Plot of LL-BFR and HL(A), LL(B) on Lower Limb Muscle Strength

亚组分析结果显示(表 2), 干预周期和平均加压压力亚组分析均具有统计学意义。从研究特征来看, 干预周期合并效应异质性为 96.5%, 因此, 干预周期可能不是异

质性的来源; 平均加压压力亚组分析结果显示, 合并效应的异质性为 0%, 因此, 平均加压压力可能是异质性的来源。

表 2 亚组分析结果

Table 2 Results of Subgroup Analysis

研究特征	分组	纳入文献(n)	SMD	95% CI	P	I <sup>2</sup> /%
干预周期/周	4	2(60)	0.22	-0.07, 0.51	0.14	0
	16	1(34)	1.81	1.31, 2.31	<0.000 01	0
	总体	3(94)	0.74	0.29, 1.19	0.001	96.5
平均加压压力/mmHg	0~140	2(62)	0.88	0.13, 1.63	0.02	73
	180~220	2(42)	0.66	0.04, 1.28	0.04	69
	总体	4(104)	0.74	0.29, 1.19	0.001	0

2.7 敏感性分析

为探究异质性是否由单项研究产生, 通过假设条件

对所获结果的稳定性进行检验, 对高异质程度的研究选用逐一剔除法进行合并效应量分析。

文献的低强度加压抗阻训练对中老年人下肢力量的合并效应量为  $SMD=0.74$ , 95% CI: 0.29, 1.19,  $P=67%$ ,  $P=0.001$ 。对单项研究逐一剔除后,合并效应  $SMD$  为 0.60~0.81,  $P$  为 59%~70%,  $P$  为 0.000 9~0.005。纳入文献的加压步行训练对中老年人下肢肌肉力量的合并效应量为  $SMD=1.84$ , 95% CI: 1.08, 2.61,  $P=75%$ 。对单项研究逐一剔除后,合并效应  $SMD$  为 1.59~2.02,  $P$  为 69%~78%, 均为  $P<0.000 1$ 。

逐篇剔除文献分析发现,排除单项研究的各合并效应量与纳入文献的总合并效应量间无明显变化,表明本研究 Meta 分析结果较为稳定。

### 3 讨论

#### 3.1 加压训练促进肌肉力量及肥大的作用机制

加压训练利用止血带或特殊袖带在受试者肢体近端加压,阻塞静脉血管中血液的流动,同时保持部分动脉血管的血流量,导致肌内缺血、急性缺氧以及代谢物蓄积等,从而促使肌内 pH 值下降,诱导代谢应激。不同学者从肌纤维募集和激素分泌等角度对加压训练的作用机制进行了探讨。

##### 3.1.1 肌纤维募集

根据肌纤维募集的大小原则,在传统抗阻训练中,慢肌纤维作为首选募集对象,快肌纤维因强度增加被相应募集。低强度加压抗阻训练能够快速招募快肌纤维,不依赖肌纤维招募的大小原则,即更易先招募促进肌肉肥大的快肌纤维(Yasuda et al., 2012)。这可能与低强度加压抗阻训练引起的缺氧效应和高代谢物累积有关(Schenfeld, 2013)。有学者分析肌电图发现,低强度加压训练的肌纤维激活数量显著多于低强度抗阻训练。这种不同于传统抗阻训练产生的肌纤维募集被认为可能是促进肌肉力量、肥大效应的潜在因素(Loenneke et al., 2012a, 2015)。

##### 3.1.2 肌肉蛋白合成相关激素

研究表明,高强度抗阻训练后,人体内的生长激素(growth hormone, GH)和胰岛素样生长因子-1(insulin like growth factor-1, IGF-1)等合成代谢激素显著升高(Kraemer et al., 2005)。此类激素与提高肌肉蛋白合成和降低肌肉蛋白分解有关,对促进肌肉力量及肌肉肥大有积极影响(Rooyackers et al., 1997)。加压训练可诱导代谢物积累、急性缺氧以及肌内 pH 值降低(Loenneke et al., 2012a),代谢物积累诱导的低 pH 环境可通过传入神经刺激垂体分泌 GH(Schoenfeld, 2013)。Fry 等(2010)发现,老年人进行低强度加压抗阻训练后,体内 GH 浓度显著升高了 9 倍。GH 还可通过 IGF-1 的释放提高骨骼肌有丝分裂和合成代谢(Haddad et al., 2004)。IGF-1 蛋白水平的增加与抗阻训练后肌肉力量的增加成正比,这一结论已得到证实(Scott et al., 1985)。已有研究表明,进行了低强度

加压抗阻训练后,IGF-1 蛋白水平显著升高(Takano et al., 2005)。低强度加压抗阻训练中,GH 与 IGF-1 浓度的显著升高可能是提高肌肉力量和促进肌肉肥大的重要原因(Loenneke et al., 2011; Madarame et al., 2010)。

高强度抗阻训练产生的睾酮也可能是调节运动后合成代谢适应的因素。睾酮能够直接促进肌肉蛋白的合成(Kadi, 2008),通过增强 IGF-1 和 GH 的释放间接促进肌肉蛋白的合成(Bhasin et al., 2001)。李卓倩等(2020)发现,低强度加压抗阻训练可以显著提高睾酮浓度。与此相反,Fujita 等(2007)采用加压抗阻训练后,发现被试体内的睾酮浓度无显著改变。目前,低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练促进中老年人下肢肌肉力量及肥大的研究较少,肌肉力量提高和肌肉肥大效应可在无 GH 和 IGF-1 等关键合成激素的情况下产生。因此,低强度加压抗阻训练促进中老年人下肢肌肉力量和肌肉肥大效应的作用机制仍有待进一步探讨。

##### 3.1.3 肌肉蛋白合成调节因子

正常生理状态下,热休克蛋白(heat shock proteins, HSPs)作为分子伴侣,主要负责组合及转运蛋白质(Kiang et al., 1998)。有研究表明,HSPs 可以从热、缺氧、缺血和代谢累积的环境中产生,对肌肉蛋白合成有促进作用(Kregel, 2002)。Cumming 等(2014)对 9 名受试者进行低强度加压抗阻训练后,发现其体内的 HSP 27 和 HSP 70 蛋白水平显著提高。在缺血、缺氧和代谢物累积升高的加压训练中,HSPs 活性的升高可能是促进肌肉肥大的因素之一。

作为转化生长因子家族成员之一,肌生成抑制素被认为是骨骼肌生长的负调节因子(Schiaffino et al., 2013)。这一蛋白的缺失,可能对肌肉蛋白合成起到一定的促进作用。研究表明,与正常小鼠相比,缺失肌生成抑制素的小鼠肌肉显著肥大(Kawada et al., 2005)。Laurentino 等(2012)发现,通过 8 周的低强度加压(20% 1RM, 95 mmHg)抗阻训练,体内肌生成抑制素基因表达下调,且与肌肉肥大和力量增加(6.3% 和 40.0%)呈正相关,但未在低强度抗阻训练中发现肌生成抑制素的显著变化。因此,低强度加压抗阻训练促进肌肉力量和肥大的原因,可能与肌生成抑制素表达降低有关。

目前,针对中老年人施加低强度加压抗阻训练和加压步行训练的研究较少,关于加压训练引起肌肉适应的作用机制观点尚未统一。已有研究表明,加压训练促进中老年人下肢肌肉力量和肌肉肥大的效果,可能是通过激素分泌和肌纤维募集等因素影响肌肉蛋白合成和分解产生。

#### 3.2 加压训练促进中老年人下肢肌肉力量及肥大的效果

##### 3.2.1 中老年人的体质特点与加压训练

研究表明,成人在 50~80 岁肌肉质量损失 30%~40%(Lexell, 1995)。肌肉质量下降是中老年人心脏病等疾病

发生的主要因素(Koopman et al., 2009),与年龄相关的肌肉力量下降可升高中老年人跌倒风险以及死亡率(Cooper et al., 2010; Wolfson et al., 1995)。因此,中老年人应积极采取适当的干预措施,延缓肌肉力量及质量下降。美国运动医学会指出,每周 2 次高强度的抗阻训练,能显著促进肌肉力量及肌肉肥大(Zajko et al., 2009)。但部分中老年人由于常伴有冠心病或肌肉骨骼损伤等疾病,往往无法进行高强度抗阻训练(Yoshiko et al., 2017),且高运动损伤风险和低身体活动能力严重阻碍了中老年人对高强度抗阻训练的参与。在训练动机和依从性方面,低强度抗阻训练比高强度抗阻训练更适合中老年人(Van Roie et al., 2015)。在促进肌肉力量和肌肉肥大方面,低强度抗阻训练结合加压条件已被证实与高强度抗阻训练效果相似,且与高强度运动相比,对关节施加更小的机械负荷(Slysz et al., 2016)。另有研究发现,加压步行训练也可显著增强下肢肌肉力量并促进肌肉肥大(Clarkson et al., 2017)。

虽然加压训练已具有临床意义,但仍需在制定运动处方时,注意训练的禁忌与风险防范(瞿超艺等, 2019)。Kacin 等(2015)开发了临床筛查工具,用于制定加压训练处方时排除相关风险。

### 3.2.2 加压训练促进中老年人下肢肌肉力量及肥大的效果

Meta 分析显示,低强度加压抗阻训练促进中老年人肌肉力量及肥大的效果与高强度抗阻训练相似,加压步行训练可显著提高下肢肌肉力量及肌肉肥大。

Vechin 等(2015)比较了低强度加压抗阻训练与高强度抗阻训练对中老年人下肢肌肉力量及肥大效应的效果,发现 2 组中腿举 1RM 值及股四头肌横截面积显著增加。Libardi 等(2015)对 25 名老年人进行了为期 12 周的低强度加压抗阻训练,结果表明,加压训练组下肢肌肉力量及股四头肌横截面积显著增加,训练效果显著优于不加压组。除了促进加压部位肢体肌肉力量外,进行低强度加压抗阻训练后会产生效果转移现象(Madarama et al., 2008)。Patterson 等(2011)发现,完成单侧下肢低强度加压抗阻训练后,受试者非训练侧下肢肌肉力量得到有效提高。

Abe 等(2010)研究指出,加压步行训练能有效提高中老年人的下肢肌肉力量并促进肌肉肥大。有学者通过对不同速度加压步行训练(如慢速 56 m/min、快速 87 m/min)和慢速步行训练(56 m/min)进行研究,指出慢速加压步行训练与快速加压步行训练在促进肌肉肥大方面均效果显著,但并未在慢速步行训练后发现促进肌肉肥大的现象(Ogawa et al., 2012)。提示,在加压步行训练中,行走速度可能不是促进肌肉肥大的主要原因。

加压训练具有低风险、低强度和效果转移的特点,在减少关节机械应力的同时,可获得较高的训练效果。因此,建议将低强度加压抗阻训练和加压步行训练作为促

进中老年人肌肉力量及肥大的辅助训练,预防肌少症,延缓肌肉萎缩。

### 3.2.3 中老年人与青年人加压训练效果的差异

有研究认为,低强度加压抗阻训练(20%~30% 1RM)可促进肌肉力量及肌肉肥大,训练效果与年龄无关(Yasuda et al., 2015)。Cook 等(2019)对 21 名 67~90 岁的老年人进行了为期 12 周 30% 1RM 的加压抗阻训练,发现受试者膝伸力量及股四头肌横截面积显著增加。Takarada 等(2002)研究发现,平均年龄为 25.6 岁的男性运动员在接受 8 周低强度加压抗阻训练后,膝关节伸肌力量及肌肉横截面积分别提高了 14.3% 和 15.0%。在加压步行训练方面,Ozaki 等(2011b)研究发现,13 名 65~67 岁的老年人在完成 10 周加压步行训练后,下肢肌肉力量显著提高 15%,大腿中部肌肉横截面积提高 3%。有研究证实,青年人进行 3 周的加压步行训练后,下肢肌肉力量及股四头肌横截面积分别提高 7.4% 和 4.1%(Abe et al., 2006)。

综上,已有研究表明,中老年人与青年人完成低强度加压抗阻训练后,提高肌肉力量和肥大的效果均较显著。但目前鲜有研究对中老年人及青年人加压训练促进肌肉适应的效果进行对比分析,未来研究可对其差异进行进一步深入探讨。

### 3.3 低强度加压训练与低强度抗阻训练对中老年人下肢力量影响的亚组分析

为探寻各研究间的异质性缘由,本研究对加压抗阻训练与低强度抗阻训练对中老年人下肢肌肉力量影响的研究进行亚组分析。结果显示:1)4 周、16 周的低强度加压抗阻训练均可提高老年人的下肢肌肉力量,16 周的干预效果更佳;2)低压组(105~140 mmHg)和高压组(181~220 mmHg)的低强度加压抗阻训练均能显著提升下肢肌肉力量,这表明加压压力可能是异质程度的来源。

#### 3.3.1 运动周期的亚组分析

Slysz 等(2016)发现,超过 8 周的低强度加压抗阻训练提高肌肉力量的效果优于不满 8 周的训练。Loenneke 等(2012b)的 Meta 分析发现,训练周数与肌肉力量的效应量有显著关系,与肌肉肥大效应量无显著关系。这与传统的抗阻训练不同。在传统训练中,机体首先通过神经适应提高肌肉力量,肌肉肥大现象会在随后的训练中出现。Loenneke 等(2012b)根据其研究结果推测,低强度加压抗阻训练与传统抗阻训练改善肌肉适应的方式可能相反,低强度加压抗阻训练在短期内获得的肌肉力量效果可能与肌肉肥大有关。因此,建议中老年人采用长期低强度加压抗阻训练,以获取更好的效果。有关不同时间低强度加压抗阻训练对肌肉力量影响的研究较少,仍需更多高质量、大样本的研究进一步探讨其作用机制。

#### 3.3.2 加压压力的亚组分析

低强度加压抗阻训练中,低压组(105~140 mmHg)和

高压组(181~220 mmHg)均能显著提高中老年人的下肢肌肉力量且效果相似。Rubens等(2018)提出,低压组(105 mmHg)与高压组(186 mmHg)在提高老年人下肢力量的效果方面均与高强度抗阻训练组相似,组间不存在显著差异。Loenneke等(2015)对40名参与者进行加压抗阻训练后发现,在低强度加压抗阻训练方案中,40%~50%动脉限制压力下,肌肉激活的程度显著升高,但肌肉激活程度并未随压力增加而提高。李卓倩等(2020)发现,在30% 1RM强度下,30次/组,共4组的低压(140 mmHg)与高压(220 mmHg)抗阻训练产生的GH浓度均显著高于非加压组;低压组产生的血睾酮浓度高于高压组,但2组无显著差异。这表明,在低强度加压抗阻训练中,低压与高压在促进中老年人下肢肌肉力量与肌肉肥大方面的效果可能相似。

然而,学者对此观点并未达成一致。Lixandrao等(2015)通过12周的低强度加压抗阻训练发现,40%袖带压力组与80%袖带压力组促进肌肉力量和肌肉肥大的效果有显著性差异。这表明,不同加压压力抗阻训练对促进中老年人下肢肌肉力量及肥大的效果仍需进一步探讨。由于中老年人常伴有冠心病、糖尿病或肌肉骨骼损伤等基础疾病,建议中老年人进行低强度加压抗阻训练时,谨慎选择高压。

#### 3.4 研究不足与展望

1)本研究纳入文献数量较少( $n=10$ ),主要原因是在研究质量方面有意选择了严格的纳入标准,但大多研究质量仍为中等。研究中分配隐藏和受试者与研究者双盲法是限制研究质量的主要因素,未来的研究应尽量运用分配隐藏及受试者与研究者双盲法,以提高文献质量。

2)低强度加压抗阻训练( $P=67$ )和加压步行( $P=75$ ),异质性较大,可能是由于干预方案不同(干预周期等)、样本量大小、下肢干预部位不同(股四头肌与跖屈肌等)和力量评估方式不同(最大重复力量、等长测试和等速测试)等因素造成的。

3)由于加压步行训练纳入研究较少,未采用亚组分析。在低强度抗阻训练方案中,因缺乏有效数据,无法探究低强度加压抗阻训练对中老年人下肢肌肉肥大的影响,未来可增加低强度加压抗阻训练对其影响的相关研究。

4)同一文献的多种相关研究在一定程度上影响了实验结果的同质性。

#### 4 结论

低强度加压抗阻训练及加压步行训练能显著促进中老年人下肢肌肉力量及肌肉肥大;低强度加压抗阻训练作为训练方法,在减少负荷和关节机械应力的同时可达到与高强度抗阻训练类似的效果;干预措施中,运动周期

是影响中老年人训练效果的因素。

#### 参考文献:

- 李卓倩,魏文哲,赵之光,等,2020.低强度抗阻运动中不同程度的血流限制对血清生长激素和睾酮分泌量的影响[J].中国体育科技,56(4):38-43.
- 刘鸣,2011.系统评价、Meta分析设计与实施方法[M].北京:人民卫生出版社.
- 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.
- 孙科,魏文哲,赵之光,等,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.
- 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.
- 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.
- 赵静,尹练,雷雪梅,等,2020.加压训练对中老年人肌肉适能的影响与优势[J].中国组织工程,24(23):3737-3743.
- ABE T, KEARNS C F, SATO Y, 2006. Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training [J]. Appl Physiol, 100(5): 1460-1466.
- ABE T, SAKAMAKI M, FUJITA S, et al., 2010. Effects of low-intensity walk training with restricted leg blood flow on muscle strength and aerobic capacity in older adults [J]. J Geriatr Phys Ther, 33(1):34-40.
- BHASIN S, WOODHOUSE L, STORER T W, 2001. Proof of the effect of testosterone on skeletal muscle [J]. J Endocrinol, 170(1): 27-38.
- CLARKSON M J, CONWAY L, WARMINGTON S A, 2017. Blood flow restriction walking and physical function in older adults: A randomized control trial [J]. J Sci Med Sport, 20(12):1041-1046.
- COOK S B, CLERRY C J, 2019. Progression of blood flow restricted resistance training in older adults at risk of mobility limitations [J]. Front Physiol, doi:10.3389/fphys.2019.00738.
- COOK S B, LAROCHE D P, VILLA M R, et al., 2017. Blood flow restricted resistance training in older adults at risk of mobility limitations [J]. Exp Gerontol, 99: 138-145.
- COOPER R, KUH D, HARDY R, et al., 2010. Objectively measured physical capability levels and mortality: Systematic review and Meta-analysis [J]. BMJ, doi: 10.1136/bmj.c4467.
- CUMMING K T, PAULSEN G, WERNBOM M, et al., 2014. Acute response and subcellular movement of HSP27,  $\alpha$ B-crystallin and HSP70 in human skeletal muscle after blood-flow-restricted low-load resistance exercise [J]. Acta Physiol, 211(4): 634-646.
- ENGLISH K L, PADDON-JONES D, 2010. Protecting muscle mass and function in older adults during bed rest [J]. Curr Opin Clin Nutr Metab Care, 13(1):34-39.
- FRY C S, GLYNN E L, DRUMMOND M J, et al., 2010. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men [J]. Appl Physiol, 108(5):1199-1209.
- 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.
- HADDAD F, ADAMS G R, 2004. Inhibition of MAP/ERK kinase prevents IGF-1 induced hypertrophy in rat muscles[J]. *J Appl Physiol*, 96(1): 203-210.
- KACIN A, ROSENBLATT B, GRAPAR ŽARGIT, et al., 2015. Safety considerations with blood flow restricted resistance training[J]. *Ann Kinesiol*, 6(1):3-26.
- KADI F, 2008. Cellular and molecular mechanisms responsible for the action of testosterone on human skeletal muscle: A basis for illegal performance enhancement[J]. *Br J Pharmacol*, 154(3): 522-528.
- KARABULUT M, ABE T, SATO Y, et al., 2010. The effects of low-intensity resistance training with vascular restriction on leg muscle strength in older men[J]. *Eur J Appl Physiol*, 108(1):147-155.
- KAWADA S, ISHII N, 2005. Skeletal muscle hypertrophy after chronic restriction of venous blood flow in rats[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 37(7): 1144-1150.
- KIANG J G, TSOKOS G C, 1998. Heat shock protein 70 kDa: Molecular biology, biochemistry, and physiology[J]. *Pharmacol Ther*, 80(2):183-201.
- KOOPMAN R, VAN LOON L J C, 2009. Aging, exercise, and muscle protein metabolism[J]. *J Appl Physiol*, 106(6):2040-2048.
- KRAEMER W J, RATAMESS N A, 2005. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training[J]. *Sports Med*, 35(4): 339-361.
- KREGEL K C, 2002. Heat shock proteins: Modifying factors in physiological stress responses and acquired thermotolerance[J]. *J Appl Physiol*, 92(5):2177-2186.
- LAURENTINO G C, UGRINOWITSCH C, ROSCHEL H, et al., 2012. Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin gene expression[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 44(3):406-412.
- LEXELL J, 1995. Human aging, muscle mass, and fiber type composition[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 50: 11-16.
- LIBARDI C A, CHACON-MIKAHIL M P T, CAVAGLIERI C R, et al., 2015. Effect of concurrent training with blood flow restriction in the elderly[J]. *Int J Sports Med*, 36(5):395-399.
- LIBERATI A, ALTMAN D G, TETZLAFF J, et al., 2009. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and Meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: Explanation and elaboration[J]. *BMJ*, doi:10.1136/bmj.b2700.
- LIXANDRAO M E, UGRINOWITSCH C, LAURENTINO G, et al., 2015. Effects of exercise intensity and occlusion pressure after 12 weeks of resistance training with blood-flow restriction[J]. *Eur J Appl Physiol*, 115(12): 2471-2480.
- LOENNEKE J P, ABE T, WILSON J M, et al., 2012a. Blood flow restriction: How does it work? [J]. *Front Physiol*, doi: 10.3389/fphys.2012.00392.
- LOENNEKE J P, FAHS C A, WILSON J M, et al., 2011. Blood flow restriction: The metabolite/volume threshold theory[J]. *Med Hypotheses*, 77(5):748-752.
- LOENNEKE J P, KIM D, FAHS C A, et al., 2015. Effects of exercise with and without different degrees of blood flow restriction on torque and muscle activation[J]. *Muscle Nerve*, 51(5): 713-721.
- LOENNEKE J P, WILSON J M, MARIN P J, et al., 2012b. Low intensity blood flow restriction training: A Meta-analysis[J]. *Eur J Appl Physiol*, 112(5):1849-1859.
- MADARAME H, NEYA M, OCHI E, et al., 2008. Cross-transfer effects of resistance training with blood flow restriction[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 40(2):258-263.
- MADARAME H, SASAKI K, ISHII N, 2010. Endocrine responses to upper- and lower-limb resistance exercises with blood flow restriction[J]. *Acta Physiol Hung*, 97(2):192-200.
- MARCELL T J, 2003. Sarcopenia: Causes, consequences, and preventions[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 58(10):M911-M916.
- OGAWA M, LOENNEKE J P, YASUDA T, et al., 2012. Time course changes in muscle size and fatigue during walking with restricted leg blood flow in young men[J]. *JPEsm*, 3(1):14-19.
- OZAKI H, SAKAMAKI M, YASUDA T, et al., 2011a. Increases in thigh muscle volume and strength by walk training with leg blood flow reduction in older participants[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 66(3):257-263.
- OZAKI H, MIYACHI M, NAKAJIMA T, et al., 2011b. Effects of 10 weeks walk training with leg blood flow reduction on carotid arterial compliance and muscle size in the elderly adults[J]. *Angiology*, 62(1) 81-86.
- PAPA E V, DONG X, HASSAN M, 2017. Skeletal muscle function deficits in the elderly: Current perspectives on resistance training[J]. *J Nat Sci*, 3(1):e272.
- PATTERSON S D, FERGUSON R A, 2011. Enhancing strength and postocclusive calf blood flow in older people with training with blood-flow restriction[J]. *J Aging Phys Act*, 19(3):201-213.
- ROOYACKERS O E, NAIR K S, 1997. Hormonal regulation of human muscle protein metabolism[J]. *Annu Rev Nutr*, 17(1): 457-485.
- RUBENS V L, TEIXEIRAB A M, FURTADOB G E, et al., 2018. Effect of 16 weeks of resistance exercise and detraining comparing two methods of blood flow restriction in muscle strength of healthy olderwomen: A randomized controlled trial[J]. *Exp Gerontol*, 114: 78-86.
- SCHIAFFINO S, DYAR K A, CICILLOT S, et al., 2013. Mechanisms regulating skeletal muscle growth and atrophy[J]. *FEBS J*, 280(17):4294-4314.
- SCHOENFELD B J, 2013. Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training[J]. *Sports Med*, 43(3):179-194.
- SCOTT C D, MARTIN J L, BAXTER R C, 1985. Rat hepatocyte insulin-like growth factor I and binding protein: Effect of growth hormone in vitro and in vivo[J]. *Endocrinology*, 116(3): 1102-1107.
- SEGUIN R, NELSON M E, 2003. The benefits of strength training for older adults[J]. *Am J Prev Med*, 25(3 Suppl 2): 141-149.
- 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.
- SLYSZ J, STULTZ J, BURR J F, 2016. The efficacy of blood flow restricted exercise: A systematic review and Meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*, 19(8):669-675.
- TAKANO H, MORITA T, IIDA H, et al., 2005. Hemodynamic and