



加压运动原理及运用的研究进展

盛菁菁¹, 魏文哲^{2*}, 沈勇伟¹

摘要: 加压运动法是限制静脉血流量,造成肢体远端出现静脉池效应,诱发肌细胞体积增大,以较小的运动强度促进蛋白质合成、刺激肌肉生长和提高肌肉适能的一种新方法,由于其训练方式的安全性及效果的优越性,已经成为国际上人们追捧的训练方法。加压运动是在肢体近端用加压带捆绑,加压后进行低强度、短时间运动,达到增加肌肉力量,改善肌肉功能的目的。这种新方法不仅应用于提高运动员竞赛成绩、预防老年人及术后患者肌肉萎缩、对抗宇航员在轨时失重生理效应导致的骨骼、肌肉等多方面的退行性变化,也为骨性疾病、心脑血管、肥胖、糖尿病和神经肌肉疾病患者提供新的康复治疗手段。本文从加压运动的方法、应用及原理机制,进一步完善加压运动的效果机制,为其推广做好科学基础及理论指导。

关键词: 加压运动;血流限制;肌肉力量;生理机制

中图分类号:G804.2 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2018)05-0092-08
DOI:10.12064/ssr.20180513

Research progress on Mechanism and application of KAATSU Training

SHENG Jingjing¹, WEI Wenzhe², SHEN Yongwei¹

(1. School of Physical Education and Sports Science, Soochow University; Suzhou 215021, China

2. Beijing Research Institute of Sports Science; Beijing 100075, China)

Abstract: KAATSU Training is a new method involving compressing venous to reduce blood flow, resulting in the distal limb vein pool effect and inducing increasing in size of muscle cells, which leads to promoting protein synthesis, stimulating muscle growth and improving muscle fitness even when exercise at relatively lower intensities. Due to its safety and superior effect, KAATSU Training has become internationally popular. KAATSU Training uses compressive belts on the proximal end of the limb. The training is at low-intensity and with short-term exercises to increase muscle strength and improve muscle function. This new method is not only applied in improving the athletes' competition performance, preventing in the elderly and postoperative patients with muscle atrophy, and resisting the degenerative changes of bones and muscles caused by the physiological effects of astronauts' weight loss in orbit, it is also applied for patients with bony disease, cardiovascular conditions, obesity, diabetes, and neuromuscular disease, providing a new rehabilitation treatments. By reviewing practical applications and methods, principle and mechanism of KAATSU Training, the paper furtherly discussed the mechanism of compressive training, and provides scientific basis and theoretical guidance for its promotion.

Key Words: KAATSU Training; Blood Flow Restriction; Muscle strength; Physiological mechanism

加压运动(KAATSU Training),也称限制血流运动(Blood Flow Restriction, BFR)或缺血性运动,这种加压设备和训练方法由日本佐藤仪昭博士发明和建立,是日本非常流行的一种运动方式,也在向世界其

他地区传播。加压运动是在加压限制或短时间间断性阻断静脉血流量的条件下,以较小的训练强度刺激肌肉生长、改善肌肉功能的一种新的训练方法。这项新的运动方式的特点在肢体血流限制下,即使是低

收稿日期:2018-09-12

第一作者简介:盛菁菁,女,硕士研究生在读。研究方向:运动人体科学。E-mail: 18896589736@163.com。

* 通讯作者简介:魏文哲,男,副研究员。主要研究方向:运动生理学。E-mail: wei-0228@163.com。

作者单位:1.苏州大学体育学院,江苏苏州 215021;2.北京市体育科学研究所,北京 100075。

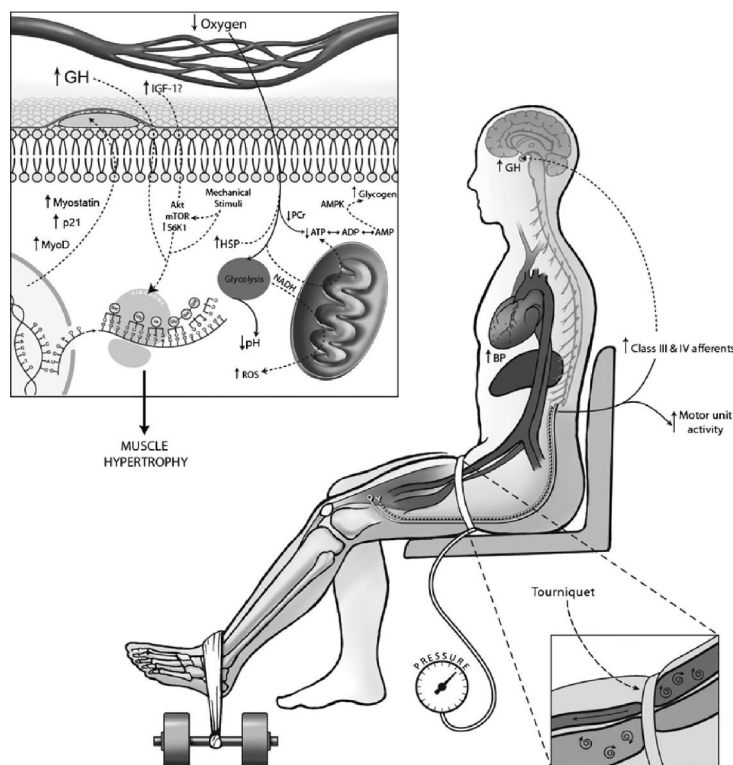


强度的运动训练也能显著增加肌肉力量、促进肌肉肥大。由于高强度运动在老年人和肌肉骨骼或神经系统疾病患者中往往很难实现，因此其应用具有相当大的临床意义。

1 加压运动生理机制

加压运动中，肢体近端加压带的使用使静脉回流受阻，适当的限制动脉流动，进行短时间小强度的训练。加压后膨胀的加压带限制静脉回流、减少动脉流入、改变中枢和外周血流动力学^[1]，并增加运动过程中的代谢压力，同时，使肢体远端出现静脉池效

应，诱发肌细胞肿胀，这可能是导致肌肉肥大的重要机制^[2]。加压后肢体远端处于缺氧状态，而乳酸等代谢产物因血流限制无法排除，在肢体远端大量堆积。肌肉内的感受器（本体感受器、化学感受器），把代谢产物堆积的信息传给IIIa神经，再上传到下丘脑—垂体，分泌生长激素，分泌的激素再进行反馈调节。也可能从运动中枢直接发出神经刺激下丘脑—神经垂体系统来进行反馈调节，就像大脑误认为肢体进行了大负荷的训练，从而分泌生长激素等利于肌肉生长的物质^[3]，促进蛋白质合成，达到促进肌肉生长、增加肌力等效果。



注：GH, 生长激素；BP, 血压；Oxygen, 氧气；IGF-1, 胰岛素样生长因子-1；p21, 激酶抑制因子 1A；mTOR, 哺乳动物的雷帕霉素；S6K1, 核糖体蛋白 S6 激酶；HSP, 热休克蛋白；ROS, 活性氧；ATP, 三磷酸腺苷；ADP, 二磷酸腺苷；AMP, 腺苷酸；AMPK, 腺苷酸活化蛋白激酶；NADH, 烟酰胺腺嘌呤二核苷酸。

图 1 加压运动 (KAATSU) 生理反应的概念模型示意图^[4]

Figure 1 Conceptual Model of the Physiological Responses of KAATSU Training

1.1 加压运动与心血管指标

与无加压运动相比，低强度加压运动可使运动心率增加、血压升高。相关研究表明加压训练会给心血管系统带来额外的压力，与无加压的对照组相比，加压实验组的训练心率证明了这一点。16名受试者随机分为实验组（加压 N=8）和对照组（无加压 N=8），跑步机上以 5 km/h、每分钟增加 1 km/h，直至力竭。结果显示实验组最大心率明显高于对照组 (P<0.05)^[5]。Renzi 等的研究已证实加压运动能够改

变心率，17名健康男性受试者每天 2 分钟 / 组，每周 5 组，共 3 周，在跑步机上以 2 英里 / 小时慢走，组间休息 1 min。BFR 组大腿绑有加压带（160 mmHg），对照组没有加压。结果在 BFR 组，心率增加，搏出量减少。加压训练期间，血压显著升高，对照组没有变化^[6]。有研究对受试者加压坐姿和卧床后 24 h 相关血流量指标的研究，在 24 h 卧床休息后，身体质量、血流量 (BV)、血浆体积 (PV) 和下腔静脉直径 (IVC) 都显著减少。去甲肾上腺素 (NOR)、抗利尿激素 (ADH)



和血浆肾素活性(PRA)也在减少。加压压力越大,搏出量(SV)越小,心率(HR)加快。同时也证明站立位和卧位加压压力在150~200 mmHg时搏出量的减少是相同的。提示加压运动对宇航员长期处于失重下对抗肌肉萎缩等具有重大意义^[7]。不同压力下加压运动中受试者的心输出量不同,加压压力越大心输出量越少,相应的心率会随着心输出量的减少而缓慢加快,血管的外周阻力增加^[8]。加压引起心率增加可能是由于腿部加压带引起的静脉回流减少和/或局部血管阻力的升高以及伴随的负荷增加^[9]。在低强度运动的腿部加压训练中,心肌需氧量更大,为了增加回心血量,维持心脏输出,心率增加,以抵消心输出量的下降^[10]。

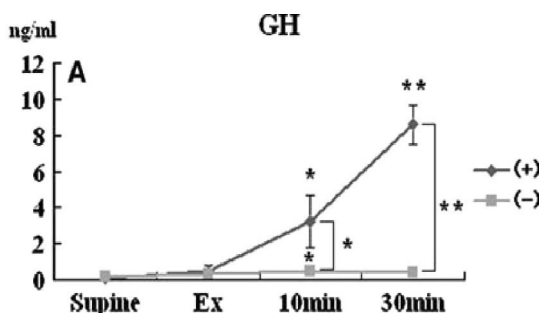
加压运动是在较低负荷下进行,不会对心脏形成很大的负荷。且加压运动产生的生长激素和胰岛素样生长因子-1(IGF-1)等生长因子不仅有助于骨骼肌的肥大也有助于心肌肥大和心肌力量的增强。因此,轻负荷的加压运动是对慢性心功能不全患者有效的运动疗法^[11]。

加压运动可使静息舒张压和收缩压分别下降2%和4%。虽然降压幅度不大,但舒张压每降低3 mmHg即可使全因死亡率降低4%,中风发生率降低8%~14%,心脏死亡率降低5%~9%。在对肢体近端加压后,由于静脉回流受阻,血液就会在肢体远端出现滞留。肢体远端为了容纳更多的血液,就必须开放更多的血管来满足储存血液的需求,这样原本处于封闭状态的中小动脉和毛细血管就会被全部“打开”。在解除压力后,充盈的中小血管和毛细血管就会快速地回到大静脉中去,同时带走血管内的代谢废物。通过反复的加压、去除压力,就能使中小血管和毛细血管得到锻炼和清洁,提高血管弹性并减少血流阻力,有助于血压的降低^[12-13]。

1.2 加压运动与血液激素

加压运动在诱导肌肉肥厚的过程中,生长激素、IGF-1等肌肉生长调节因子扮演着重要的角色。11名男大学生以50 m/min进行加压(压力为130%收缩压)步行训练,2分钟/组,共5组,组间休息1 min。血清生长激素(GH)浓度由运动前(1.72±0.83) ng/ml升高到运动后即刻(12.4±3.2) ng/ml,运动后15 min(13.1±2.4) ng/ml。游离睾酮也从运动前(12.7±1.2) pg/ml升高到运动后即刻(16.0±1.3) pg/ml。对照组GH从运动前(1.67±0.97) ng/ml到运动后即刻(1.39±0.91),运动后15 min为(1.26±0.92) ng/ml,游离睾酮从运动前(14.3±1.3) pg/ml到运动后即刻(14.1±1.2) pg/ml^[14]。

Abe等的研究有相同的结果,在运动后5 min,加压步行(KAATSU-walk)组血清生长激素比控制步行组(CON-walk)高40%($P<0.05$),运动后15 min($P<0.05$)和60 min($P<0.05$)仍保持着较高水平,血清生长激素在KAATSU-walk组运动后5 min达到运动前水平的2.2倍^[15]。Takarada等对6名男性运动员用20%1RM强度进行5组双侧伸膝力竭性训练,发现加压运动后生长激素可增加290倍(图2),且运动后24 h白细胞介素-6相比对照组都有显著增加^[16]。



注:+:加压;-:无加压。

图2 生长激素(GH)变化^[16]

Figure 2 Changes of Growth Hormone (GH)

在加压运动中观察到血清生长激素的大量增加,低强度(30%1RM)的加压运动使血清生长激素浓度增加4倍,而传统高强度(70%1RM)阻力运动仅增加了一倍。我们发现加压运动能够使肌肉肥大,提高肌肉功能,这些动作经济性改善是肌肉力量增强的直接结果,这可能是由血清合成代谢激素引起的,生长素等激素分泌亢进,会直接或间接刺激血管内皮生长因子(VEGF)的增加和一氧化氮的释放,促进肝细胞增殖因子分泌,抑制生长抑制素的分泌,使肌肉卫星细胞进入分裂周期,肌肉量出现增长^[17]。通常认为这些改变与雷帕霉素(mTOR)和丝裂原活化蛋白激酶(PAMK)信号通路机械目标激活有关^[18]。加压带松开后的再回流过程中,缺血部位黄嘌呤氧化酶活性升高产生活性氧,而活性氧可通过修饰调节蛋白的氧化还原水平,促进某些组织中生长和繁殖有关信号的转换,从而使肌肉肥大。因此,人们在进行增肌训练时,需要达到一定的运动强度,生长激素才会分泌增多。而在加压运动中,20%~30%1RM的强度就能使生长激素大量分泌,从而刺激蛋白质的合成,加快肌肉的生长。同时,加压运动后肌肉中的IGF-1是运动前的两倍多,能增强对葡萄糖和氨基酸的吸收,提高人体对胰岛素的敏感性,大幅度提高肌肉对血糖的吸收能力,降低糖尿病患者的糖化血红蛋白,改善血糖水平^[19,20]。



1.3 加压运动与肌纤维募集和肌电变化

26 名受试者随机分为低强度运动(L, 20% 1RM), 加压低强度运动(LR, 20% 1RM, 1.3 倍安静收缩压)和高强度运动(H, 65% 1RM), 完成单侧踮屈, 30 次/分钟, 共 2 min。结果肌肉内的磷酸肌酸(PCr)减少, 双质子磷酸($H_2PO_4^-$)增多, LR 组肌肉内的 pH 值下降明显多于 L 组($P < 0.001$), 但少于 H 组($P < 0.001$)。有研究发现, 低强度抗阻训练结合限制血流运动, Pi 分裂数量(用无机磷酸盐分裂评估的快肌纤维的募集)增多^[21], 快速(FT)纤维的募集增多^[22]。加压运动增强肌肉力量的进一步证据来自 Yusada^[23], 采用相同强度的加压和常规训练, 发现加压组肌电图(EMG)信号(肌肉募集强度的指示)更强, 激活的运动单位和 / 或其频率的增加导致 EMG 信号的幅度更大。在最大随意收缩(MVC), 特别是加压运动组, 检测到特定神经肌肉适应的迹象, 神经适应包括增加运动单位同步和增加肌肉激活^[24], 这表明加压运动组能增加肌肉激活, 增加运动单元同步也会导致更大的 EMG 振幅^[25], 从而增加肌肉力量^[26]。同时加压带的使用降低了表面 EMG 波动的规律性, EMG 振幅显著升高, 这与先前的发现一致^[27]。因此, 血流限制训练刺激肌肉引起的反应, 包括更多的肌肉激活, 肌肉肥大和力量增强。

快肌纤维(II 型肌纤维)的肌肉横截面积大, 其运动单位动员阈值高, 在较大强度运动时动员; 而慢肌纤维(I 型肌纤维)则相反, 较低强度的运动即可动员慢肌纤维。根据 Henneman 原则^[28], 当运动强度小, 速度慢时, 主要募集的是进行有氧代谢的慢肌纤维; 当运动强度和速度逐渐增加时, 快肌纤维也逐渐动员参与。有人认为在加压运动中 I 型肌纤维的过早疲劳, II 型肌纤维的募集将发生在持续性缺血运动中^[27]。快肌纤维内毛细血管、肌红蛋白、线粒体数量少, 因此在收缩时有氧代谢少, 糖酵解供能多, 刺激一氧化氮的大量产生, 且肌肉增粗主要是通过快肌增粗实现的。通过肌肉活检证实, 加压运动可提高神经系统的协调调节能力, 使中枢神经兴奋、扩散, 从而动员快肌纤维发生变化^[29]。

Fujita 证明相比对照组, 加压抗阻训练 S6K1 磷酸化增加, 其主要发生在快肌纤维募集增多^[18]。血流限制的低负荷阻力训练会引起血液和组织中氧气浓度降低, 需要招募额外的运动单位来维持一定的力量, I 型肌纤维的过早疲劳需要补充 II 型糖酵解纤维, 从而增加这些可用纤维的机械负荷, 并随着时间的推移增加适应性^[30]。这将导致在运动过程中从 I

型到 II 型肌纤维的募集形式发生更早的转变^[31]。快肌纤维通过糖代谢把化学能变为机械能的同时产生大量的乳酸, 产生的乳酸等疲劳物质因血液循环受阻无法顺利排出体外而在体内大量堆积, 被加压者感觉到好像血乳酸增加很多, 但实际上低强度的加压训练后血乳酸浓度略有增加, 与高负荷的运动相比, 乳酸增长要小得多^[32]。乳酸等酸性物质堆积到一定程度, 就会对该肌肉产生抑制作用。这时, 若想继续进行运动, 就需要快肌纤维等更多的肌纤维参与进来, 并代偿性地完成本来应由慢肌纤维完成的工作。因此, 加压力量训练虽然负荷很小, 但随着运动的持续, 仍然能够动员大量的快肌纤维参与工作。

此外, 也有人认为加压运动诱导的肌肉肥厚不仅包括生长激素分泌增多、快肌募集及收缩蛋白的增殖, 也包括增大肌糖原储存和增加毛细血管密度^[33]。Nygren 等推测 4 周单腿加压训练后股四头肌横截面积增加, 主要是、肌糖原增加和线粒体体积增大所致^[34]。结合 Terzis 等的最新研究结果, 股四头肌的最大重复次数和横截面积的增加^[35], 表明在加压训练中肌肉毛细血管密度增加, 糖原储备增加。因此, 建议进行加压运动, 从而创造一个更有压力的肌肉环境, 这可能会为身体适应提供更大的刺激^[22]。

2 加压运动应用

加压运动采用专业的充气压力带, 对受试者大腿或手臂近端施加一定的压力(图 3), 使血液循环受到适度控制, 在这种情况下结合某种运动形式, 如抗阻运动、自行车、步行等进行训练。大量研究报告表明, 在血流限制情况下, 30% 1RM 运动强度即可引起肌肉肥厚和力量增加^[36], 达到传统 60%~70% 1RM 高强度力量训练的效果, 同时还缩短了训练周期。目前加压运动主要应用于竞技训练领域, 运动健身领域及康复医学领域。



图 3 加压带的放置位置示意图

Figure 3 Placement of Compressive Belts

加压运动的特点是: 短时间, 低强度, 高效率。通过佐藤仪昭博士的反复试验证明: 抗阻训练第一组能做 25~30 次的负荷重量, 其余每组能做 20 次左右。组间休息上肢 15 s 最为适宜, 下肢 30 s^[37]。加压运动疲劳恢复极快, 尤其在短期集中训练时, 能作为肌肉增粗、提高肌力的极有效运动方法。现阶段加压



运动处方的频率规定在1次/周到3次/天。区别于传统训练。加压运动的不同点在于加压,进行加压运动时先用基础压加压,即加压带捆绑时的压力,上肢在20~30 mmHg,下肢在30~40 mmHg,随着加压时间的增多,肌力提高,基础压也要做相应的调整。加压强度,即加压压力大小,并不是越大越好,必须适中。目前在训练中压力区间在50~250 mmHg^[2,6,7,15,16]。也有学者通过个体收缩压来确定加压强度:加压强度=收缩压 \times 1.44,但并没有理论依据^[38]。也有用1.3倍的收缩压为加压强度^[14,22]。需要我们研究适宜的加压强度。

2.1 加压运动在竞技领域应用

据报道低负荷阻力运动或步行结合血流限制,一定程度上可有效替代高负荷运动,达到增加肌肉大小和力量的效果。Yasuda 等对10名受试者进行为期6周的加压运动,在加压(160 mmHg)情况下完成30%1RM哑铃训练(4组,共75次),3天/周,6周后肘部屈肌的肌肉厚度(MTH)明显增加($P<0.01$),MRI(磁共振成像技术)结果显示肘关节上方10 cm处和肱骨中点处的肌肉横截面积(CSA)分别增加了12.0%和10.6%,肘部屈肌的肌肉体积增加12.5% ($P<0.01$),肘部屈肌的最大等长收缩强度增加了8.6% ($P<0.05$)^[2]。Kacin 等也证明加压训练有增肌的效果,招募10名健康的男性进行了4周(4次/周)的膝部伸展运动,15%的最大随意肌肉收缩(MVC)。一条腿进行自由血流量(C-leg)的训练,而另一条腿(I-leg)是由一个充气加压带(230 mmHg)捆绑进行限制血流训练。结果I-leg组股四头肌横截面积增加3.4% ($P<0.05$),最大随意肌肉收缩的重复的次数增加了63% ($P<0.01$),C-leg增加了36%。NIRS(近红外光学成像技术)所测得的肌肉氧合血红蛋白浓度在I-leg组中减少56% ($P<0.01$),C-leg减少21%^[39]。Takarada 等也发现同样的结果^[40],在橄榄球运动员中,进行了8周的低负荷阻力训练。双侧膝关节伸展,50%1RM,4组力竭,30 s组间休息,2次/周。实验组加压(196 \pm 6) mmHg,对照组没有加压。结果显示膝关节肌肉力量和耐力增加,肌肉横截面积显著增加,对照组中没有变化。有趣的是,Manimmanakorn 等^[41]发现增强的肌肉反应可转化提高体能测试中的表现,如50 m冲刺,灵敏性测试,20 m往返跑测试。以上研究表明相比传统增肌训练,在加压的情况下,即使是很低强度(20%1RM)的抗阻训练,也可以增加人体骨骼肌体积和力量,增加肌肉的围度。

氧供应充足时,肌肉收缩的能量是脂肪和糖的

有氧化;氧供应不足时,肌肉收缩的能量来源是糖的无氧酵解。当糖进行无氧酵解时,作为副产物,会产生大量乳酸。阻断静脉需要的压力很小,虽然产生的乳酸少,但由于不能排出体外而逐渐积累。当捆绑加压带压力达到适度限制动脉时,肌肉内没有氧供应,运动开始就出现糖酵解供能现象,出现乳酸等代谢产物。虽然负荷很小,由于加压带限制了血液循环,因而运动产生的乳酸、磷酸等致疲劳物质无法顺利排出。乳酸的大量堆积,就会刺激该部位的感受器,使大脑误认为承受了很大的负荷,进而分泌有利于组织再生的物质,加强肌肉合成,达到增肌效果^[3]。

2.2 加压运动在运动健身领域应用

前人研究证明腿部加压结合低强度训练会引起肌肉肥大,步行训练是一个非常好的选择^[42]。在随机实验中7名女性[年龄:(64 \pm 2)岁],分为加压(200 mmHg)步行实验组(KAATSU-walk)和无加压的对照组(CON-walk),用45%的心率储备进行20 min的步行训练。训练过程中,在受试者下肢近端部绑有5 cm宽的加压带。在运动前、运动后即刻和运动后15 min进行取血。KAATSU-walk组运动后15 min,胰岛素水平升高,生长激素在运动后即刻和运动后15 min显著升高^[43]。Ozaki 等研究10周加压步行训练对大腿肌肉体积和膝关节伸展强度的影响后发现大腿肌肉横截面积(CSA)平均增加了3个百分点,膝关节伸展强度平均增加了5.9%^[44]。还有研究表明运动员进行了两周的每日加压步行训练,其最大摄氧量(VO_{2max})显著增加^[45],此效果是常规步行训练较难达到的。因此,对于术后康复的病人和肌肉水平低下的老年人而言,加压步行训练是一种极佳的治疗方式。

2.3 加压运动在康复医学领域应用

低强度阻力训练(LIT;20%~50% 1RM)很少会产生大量的肌肉肥厚或力量增加^[46],而高强度的阻力训练(HIT;>65%1RM)又增加了受伤的风险,尤其是对体弱和老年人群^[47]。大量研究证明加压运动对肌肉生长产生许多益处,如抗术后肌肉萎缩等^[48],即使在较低的锻炼强度下,老年人及术后康复病人的肌肉大小、强度、功能能力和骨密度也会增加。

相关研究表明高强度阻力训练可增加骨密度、提高骨代谢率,如骨特异性碱性磷酸酶(BAP),此类变化在中低强度训练中较难出现,因此低强度加压运动在这方面有其独特优势。有研究表明,经过3周的加压训练,肌肉CSA($P<0.01$)、1RM($P<0.01$)以及血清BAP水平($P<0.05$)显著增加,BAP的变化



百分比在 KAATSU-walk 为 10.8%,Control-walk 为 0.3%(表 1)^[49]。加压运动产生大量的生长素、胰岛素生长因子等物质,这些能够诱导骨芽细胞分化和骨形成因子的分泌量亢进,实现骨密度的改善。

表 1 加压运动前后肌肉力量,横截面积和血液参数的变化^[49]

Table I Muscle Strength, Cross-Sectional Area and Blood Parameters Before and After KAATSU Training

	腿部推举 1RM	股四头肌 横截面积	BAP	胰岛素样 生长因子-1
控制组	1.3±3.8	-0.6±2.9	0.3±8.9	-0.2±14.7
加压组	7.5±6.2*	5.8±3.8#	10.8±0.6*	3.5±15.0

注: *P<0.05;# 加压组与控制组组间 P<0.01

对重建前交叉韧带的卧床病人研究后发现 KAATSU 训练使大腿肌肉和屈肌的 CSA 分别减少了 9%, 而对照组(无 KAATSU)大腿肌肉和屈肌 CSA 分别下降了 21%和 11%^[50]。加压带的使用对肢体的血液循环造成较大的压力限制,动脉血难以流入肌肉组织,形成肌肉内部缺氧状态,导致肌肉通过糖酵解获得能量,生成大量乳酸,降低生长抑制素的分泌,从而防止肌肉萎缩。加压运动也可以用于术后康复,髌骨肌腱炎患者在保守治疗效果不佳的情况下,采用加压训练(160~180 mmHg, 30%1RM),结合提踵、下蹲、髌关节外展内收等运动,3 周后症状缓解(MRI 信号和疼痛感均减弱),且无肌萎缩症状(MRI 证实大腿围度增加 9 mm)^[48]。通过 BFR 训练增加肌肉的激活和生长,不会增加肌肉的损伤^[51]。

3 展望

肌肉适能是体适能的重要组成部分,是人体生命活动的重要条件。传统训练增肌至少需要达到 60%~70%1RM,流行病学研究证实超过 90%的损伤与负荷设置过高有关,且运动损伤发生率与肌肉力量的增龄性下降呈显著正相关(女性更为明显)^[52]。此外,对于运动能力下降的老年人、骨折和术后康复者、受伤的运动员和肥胖、糖尿病、关节炎、缺血性心脏病等患者而言,难以保证完成大强度抗阻训练。所以,探索既能促进肌肉适能、提高训练效率,又能降低损伤风险的方法就极有研究价值。

在低强度运动训练时,伴随 BFR 运动是一种越来越流行的方法,表现出许多的优势。已经证实加压运动产生的影响包括运动心率的增加、肌肉募集的增强、相关肌肉生长激素的增加和肾上腺激素的升高^[53],低强度的血流量限制的腿部训练,激活更多的快肌纤维,增加肌肉横截面积,氧化酶的上调和最大

摄氧量的增加^[54]。近期研究表明,使用加压带的短期缺血训练可以增强肌肉微血管的过滤能力,并增加了血液流动^[55]。同时,BFR 训练结合步行增加了老年人的小腿静脉顺应性(CVC)^[56]。事实上,与同等负荷的无加压训练相比,加压运动可以在更大程度上增强解除限制后的小腿血流^[1]和增加肱动脉直径^[57]。部分国家的科研机构已经证实加压运动结合低强度的抗阻训练和慢速步行训练在增肌、运动康复以及老年人健身方面的效果,而国内对于加压运动机制与效果的研究还相对较少,需要我们进一步探究。

参考文献:

- [1] Patterson S. D., Ferguson R. A. Increase in calf post-occlusive blood flow and strength following short-term resistance exercise training with blood flow restriction in young women[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2010, 108(5):1025-1033.
- [2] Yasuda T., Loenneke J. P., Thiebaud R. S., et al. Effects of blood flow restricted low-intensity concentric or eccentric training on muscle size and strength[J]. *Plos. One*, 2012, 7(12):e528-543.
- [3] Sato Y. kaatsu training theoretical and practical perspective[M]. Japanese: Kodansha Ltd, 2007:35.
- [4] Manini T. M., Clark B. C. Blood flow restricted exercise and skeletal muscle health.[J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 2009, 37(2):78-85.
- [5] Paton C. D., Addis S. M., Taylor L. A. The effects of muscle blood flow restriction during running training on measures of aerobic capacity and run time to exhaustion [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(1):1-7.
- [6] Renzi C. P., Tanaka H., Sugawara J. Effects of leg blood flow restriction during walking on cardiovascular function [J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2010, 42(4):726-732.
- [7] Nakajima T., Iida H., Kurano M., et al. Hemodynamic responses to simulated weightlessness of 24-h head-down bed rest and KAATSU blood flow restriction[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008, 104(4):727-737.
- [8] Iida H., Kurano M., Takano H., et al. Hemodynamic and neurohumoral responses to the restriction of femoral blood flow by KAATSU in healthy subjects[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2007, 100(3):275-285.
- [9] Renzi C. P., Tanaka H., Sugawara J. Effects of leg blood flow restriction during walking on cardiovascular function[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2010, 42(4):726-732.



- [10] Loenneke J. P., Thrower A. D., Balapur A., et al. The energy requirements of walking with restricted blood flow [J]. *Sport Science*, 2011, 4(2):7-11.
- [11] Corvoisier P. L., Hittinger L., Chanson P., et al. Cardiac Effects of Growth Hormone Treatment in Chronic Heart Failure: A Meta-Analysis[J]. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 2007, 92(1):180-185.
- [12] Whelton S. P., Chin A., Xin X., et al. Effect of Aerobic Exercise on Blood Pressure: A Meta-Analysis of Randomized, Controlled Trials [J]. *Annals of Internal Medicine*, 2002, 136(7):493-503.
- [13] Sato Y. kaatsu training theoretical and practical perspective[M]. Japanese: Kodansha Ltd, 2007:67-82.
- [14] Abe, Takashi, Sato, et al. Acute Hormonal Responses To Restriction Of Leg Muscle Blood Flow During Walking [J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2005, 37(1):329-339.
- [15] Abe T., Kearns C. F., Filho H. C. M., et al. Muscle, tendon, and somatotropin responses to the restriction of muscle blood flow induced by KAATSU - walk training [J]. *Equine Veterinary Journal*, 2010, 38(S36):345-348.
- [16] 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]. *European Journal of Applied Physiology*, 2005, 95(1):65.
- [17] Beaven C. M., Cook C. J., Gill N. D. Significant strength gains observed in rugby players after specific resistance exercise protocols based on individual salivary testosterone responses[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2008, 22(2):419-425.
- [18] Fujita S., Abe T., Drummond M. J., et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2007, 103(3):903.
- [19] Braith R. W., Stewart K. J. Resistance exercise training: its role in the prevention of cardiovascular disease[J]. *Circulation*, 2006, 113(22):2642-2650.
- [20] Fluckey J. D., Hickey M. S., Brambrink J. K., et al. Effects of resistance exercise on glucose tolerance in normal and glucose-intolerant subjects[J]. *Journal of Applied Physiology*, 1994, 77(3):1087-1092.
- [21] Park J. H., Brown R. L., Park C. R., et al. Functional pools of oxidative and glycolytic fibers in human muscle observed by 31P magnetic resonance spectroscopy during exercise[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1987, 84(24):8976-8980.
- [22] Suga T., Okita K., Morita N., et al. Intramuscular metabolism during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2009, 106(4):1119-1124.
- [23] Yasuda T., Brechue W. F., Fujita T., et al. Muscle activation during low-intensity muscle contractions with restricted blood flow[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2009, 27(5):479-489.
- [24] Sears T. A., Stagg D. Short term synchronization of intercostal motoneurone activity[J]. *Journal of Physiology*, 1976, 263(3):357-381.
- [25] Yao W., Fuglevand R. J., Enoka R. M. Motor-unit synchronization increases EMG amplitude and decreases force steadiness of simulated contractions[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2000, 83(1):441-452.
- [26] Manimmanakorn A., Manimmanakorn N., Taylor R., et al. Effects of resistance training combined with vascular occlusion or hypoxia on neuromuscular function in athletes[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2013, 113(7):1767-1774.
- [27] Takarada Y., Takazawa H., Sato Y., et al. Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2000, 88(6):2097.
- [28] Henneman E., Somjen G., Carpenter D. O. Functional significance of cell size in spinal motoneurons[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1965, 28(3):560-580.
- [29] 于亮,王瑞元,陈晓萍.加压运动对去负荷肌萎缩的影响及机制研究进展[J].*生理科学进展*,2016,47(3):227-230.
- [30] Manini T. M., Clark B. C. Blood flow restricted exercise and skeletal muscle health[J]. *Exercise & Sport Sciences Reviews*, 2009, 37(2):78-85.
- [31] Kawada S., Ishii N. Skeletal muscle hypertrophy after chronic restriction of venous blood flow in rats[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2005, 37(7):1144-1150.
- [32] Abe T., Yasuda T., Midorikawa T., et al. Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily "KAATSU" resistance training[J]. *Int.j. kaatsu Training Res.*, 2008, 1(1):6-12.
- [33] Esbjörnsson M., Jansson E., Sundberg C. J., et al. Muscle fibre types and enzyme activities after training with local leg ischaemia in man[J]. *Acta Physiologica*, 2010, 148(3):233-242.
- [34] Nygren A. T., Sundberg C. J., Goransson H, et al. Effects of dynamic ischaemic acin & Strazar raining on human skeletal muscle imensions[J]. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 2000, (2):137-141.



- [35] Terzis G., Spengos K., Manta P., et al. Fiber type composition and capillary density in relation to submaximal number of repetitions in resistance exercise[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2008, 22(3):845.
- [36] Abe T., Loenneke J. P., Fahs C. A., et al. Exercise intensity and muscle hypertrophy in blood flow-restricted limbs and non-restricted muscles: a brief review[J]. *Clinical Physiology & Functional Imaging*, 2012, 32(4):247-252.
- [37] Sato Y. kaatsu training theoretical and practical perspective[M]. Japanese: Kodansha Ltd, 2007:2-4.
- [38] Kim S., Sherk V. D., Bemben M. G., et al. Effects of Short Term Low Intensity Resistance Training with Blood Flow Restriction on Bone Markers and Muscle Cross-Sectional Area in Young Men[J]. *International Journal of Exercise Science*, 2012(2):136-147.
- [39] Kacin A., Strazar K. Frequent low-load ischemic resistance exercise to failure enhances muscle oxygen delivery and endurance capacity[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2011, 21(6):e231-e241.
- [40] Takarada Y., Sato Y., Ishii N. Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2002, 86(4):308-314.
- [41] Manimmanakorn A., Hamlin M. J., Ross J. J., et al. Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes[J]. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 2013, 16(4):337-342.
- [42] Abe T., Kearns C. F., Sato Y. Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2006, 100(5):1460.
- [43] Ozaki H., Loenneke J. P., Abe T. Blood flow-restricted walking in older women: does the acute hormonal response associate with muscle hypertrophy?[J]. *Clinical Physiology & Functional Imaging*, 2017, 37:379-383.
- [44] Ozaki H., Sakamaki M., Yasuda T., et al. Increases in Thigh Muscle Volume and Strength by Walk Training with Leg Blood Flow Reduction in Older Participants[J]. *Journals of Gerontology*, 2011, 66(3):257.
- [45] Park S., Kim J. K., Choi H. M., et al. Increase in maximal oxygen uptake following 2-week walk training with blood flow occlusion in athletes[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2010, 109(4):591-600.
- [46] Kraemer W. J., Ratamess N. A. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2004, 36(4):674.
- [47] Haykowsky M. J., Findlay J. M., Ignaszewski A. P. Aneurysmal subarachnoid hemorrhage associated with weight training: three case reports[J]. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 1996, 6(1):52-55.
- [48] Ohtn H., Kurosawa H., Ikeda H., et al. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Ac. Orthop. Scndd.*, 2003, 74(1):62-68.
- [49] Beekley M. D., Sato Y., Abe T. KAATSU-walk training increases serum bone-specific alkaline phosphatase in young men[J]. *International Journal of Kaatsu Training Research*, 2005, 1(2):77-81.
- [50] Takarada Y., Takazawa H., Ishii N. Applications of vascular occlusion diminish disuse atrophy of knee extensor muscles[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2000, 32(12):2035-2039.
- [51] Wilson J. M., Lowery R. P., Joy J. M., et al. Practical blood flow restriction training increases acute determinants of hypertrophy without increasing indices of muscle damage[J]. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2013, 27(11):3068.
- [52] Kraemer W. J., Adams K., Cafarelli E., et al. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2009, 41(3):687-708.
- [53] Loenneke P. J., Pujol, et al. The Use of Occlusion Training to Produce Muscle Hypertrophy[J]. *Strength & Conditioning Journal*, 2009, 31(3):77-84.
- [54] Eiken O., Sundberg C. J., Esbjörnsson M, et al. Effects of ischaemic training on force development and fibre-type composition in human skeletal muscle.[J]. *Clinical Physiology & Functional Imaging*, 2010, 11(1):41-49.
- [55] Evans C., Vance S., Brown M. Short-term resistance training with blood flow restriction enhances microvascular filtration capacity of human calf muscles[J]. *J. Sports Sci.*, 2010, 28(9):999-1007.
- [56] Iida H., Nakajima T., Kurano M., et al. Effects of walking with blood flow restriction on limb venous compliance in elderly subjects.[J]. *Clinical Physiology & Functional Imaging*, 2011, 31(6):472-476.
- [57] Hunt J. E., Walton L. A., Ferguson R. A. Brachial artery modifications to blood flow-restricted handgrip training and detraining[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2012, 112(6):956-961.

(责任编辑:刘畅)