



## 血流限制训练的应用效果与作用机制

魏佳<sup>1</sup>, 李博<sup>1</sup>, 杨威<sup>1</sup>, 王欣欣<sup>1</sup>, 冯连世<sup>2\*</sup>, 黎涌明<sup>1,2\*</sup>

(1. 上海体育学院 体育教育训练学院, 上海 200438; 2. 国家体育总局体育科学研究所, 北京 100061)

**摘要:** 血流限制训练(BFRT)又称加压训练(KAATSU training), 指在运动期间通过特殊加压装置对肢体进行外部加压, 使静脉血流闭塞的同时部分阻塞动脉血流以提高训练效果的方法。近年来, BFRT 越来越广泛地应用于大众健身、竞技体育和医疗康复领域, 但国内对于其应用效果和作用机制尚不清楚。通过对国内外相关文献的整理与总结表明, BFRT 可有效增加肌肉质量和力量、提高有氧能力、防止废用性肌萎缩、加速损伤和手术后的康复进程, 并可能对治疗骨骼肌肉相关疾病具有积极作用。BFRT 产生效果的主要机制可能是代谢应激的增加, 其涉及激素分泌、蛋白质合成与抑制调节、肌纤维募集和细胞肿胀等过程。BFRT 为运动员和无法承受大强度力量训练的人群提供了发展肌肉力量的替代方法。伴随 BFRT 倍受欢迎的同时, 实践应用和科学研究领域还需进一步探究 BFRT 剂量效应、安全性、长期训练效应等问题。BFRT 可作为运动员竞技能力提升的一种新方法。

**关键词:** 血流限制训练; 加压训练; 力量训练; 肌肉肥大; 废用性肌萎缩

**中图分类号:** G808.1 **文献标识码:** A

### 0 前言

人体肌肉质量在 30 岁后以每 10 年 3%~8% 的速率下降 (Cruz-Jentoft et al., 2010), 肌肉质量的下降可能会导致一系列健康问题, 并可能增加跌倒、残疾, 甚至死亡的风险 (Visser et al., 2005)。力量训练被认为是提高肌肉质量和力量、延缓肌肉萎缩、预防跌倒和损伤、改善健康的有效方法 (Fleck, 1988; Kraemer et al., 2017), 近年来, 力量训练在中国乃至全球范围内都是健身领域的热门健身趋势 (黎涌明等, 2018, 2019; Thompson, 2017)。美国运动医学学会 (American College of Sports Medicine, ACSM) 建议使用  $\geq 70\%$  1RM (1RM 表示只能完成一次的最大重量) 的重量进行训练可以有效引起肌肉肥大 (Ratamess et al., 2009)。然而, 对于康复人群 (包括受伤的运动员) 和老年人群而言, 进行大强度力量训练难度较大, 且对于无训练经验的普通人群, 进行大强度力量训练可能会增加损伤风险和引起主观不适。

血流限制训练 (blood flow restriction training, BFRT) 又称加压训练 (KAATSU<sup>①</sup> training), 是指在运动期间通过特殊加压装置 (一般为气动袖带或弹性绷带) 对肢体 (上肢和或下肢最近端) 进行外部加压, 使静脉血流闭塞的同时部分阻塞动脉血流以提高训练效果的训练方法 (Loenneke et al., 2014b; Sato, 2005)。近年来, 由于实验证明 BFRT 可以以较小的运动强度产生与大强度力量训练相似的训练效果

(Loenneke et al., 2012c), 越来越受到训练实践和科学研究领域的关注, 其应用也逐渐由健身领域拓展到竞技体育和医疗康复领域。在竞技体育领域, 我国将 BFRT 作为备战东京奥运会和北京冬奥会科技助力过程中的一种新方法进行推广和应用。然而, 众多教练员和运动员在尝试使用 BFRT 的过程中, 对该训练方法的应用效果和作用机制缺少客观、全面的认识, 严重制约了 BFRT 在我国奥运备战过程中作用的有效发挥, 并可能导致对这一训练方法片面、盲目甚至是错误地使用。为此, 本研究试图从应用效果和作用机制两方面对 BFRT 进行综述, 旨在为科学地认

收稿日期: 2018-12-12; 修订日期: 2019-04-01

**基金项目:** 国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项课题 (2108YFF0300901), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位计划 (TP2017063), 上海市科委科研项目 (18080503400), 国家体育总局体育科学研究所基本科研业务费资助项目 (基本17-10)

**第一作者简介:** 魏佳 (1994-), 男, 主要研究方向为血流限制训练, E-mail: weijia\_gavin0807@163.com。

**\*通信作者简介:** 黎涌明 (1985-), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为人体运动的动作和能量代谢, E-mail: liyongming@sus.edu.cn。

冯连世 (1964-), 男, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要研究方向为运动生理与生化、体育健康促进, E-mail: fenglianshi@ciss.cn。

①KAATSU为日文加压一词的罗马音。

识和应用该训练方法提供理论支撑和实践指导。

## 1 历史起源与研究现状

1966年, Sato (2005) 在参加佛教活动时, 发现长时间跪坐后引起的腿部肿胀和不适感与提踵训练后的感觉相似, 由此获得了BFRT的灵感, 于1983年开发出了最早的BFRT装置, 开始在大众人群中推广使用, 并在1997年6月获得了专利。1997年, Shinohara等(1997)首次报道了使用血流限制装置进行训练可提升肌肉力量的现象。目前, BFRT已被医疗、私人训练和体育俱乐部等机构用于提高肌肉质量和力量、抗衰老、促进康复以及提升运动表现等(Yasuda et al., 2017)。

在中国知网体育类全部期刊以“血流限制训练”和“加压训练”为检索词进行主题检索(截至2018年3月30日), 共检索到8篇文献, 除去不相关文献3篇, 得到5篇相关文献, 其中仅1篇为实验性研究。以“KAATSU training”和“blood flow restriction training”为检索词, 在Google Scholar、Web of Science和Ebsco体育运动全文数据库对国外关于血流限制的研究进行检索(截至2018年3月30日), 通过参考文献进行补充, 共得到419篇文献, 经删选最终得到相关文献364篇。国外关于BFRT的发文量较大且自2009年起逐年大幅增加, 研究主要集中在应用效果和生理机制两个方面, 而反观国内相关文献较少, 对BFRT关注不足。

## 2 血流限制训练的应用效果

关于限制血流进行训练的研究可追溯到20世纪60年代(Fales et al., 1962), 然而直到外部加压血流限制设备的问世, 血流限制(BFR)的应用才开始被人们所关注。过去20多年对BFRT效果的研究证明, 将BFR与低强度运动相结合可以产生有益的肌肉适应, 并在提高肌肉质量和力量、提高有氧能力、促进康复治疗 and 预防废用性肌萎缩方面有良好的效果。

### 2.1 提高肌肉质量与力量

肌肉质量和力量的维持或提高是保证日常生活质量(Md et al., 2002)、降低受伤风险(Visser et al., 2005)的重要基础, 也是运动员提升竞技能力的重要影响因素, 而实现这一目的往往需要通过大强度力量训练。对于无力量训练经验人群、老年人和康复人群等而言, 大强度力量训练可能会增加训练的损伤风险, 但BFRT为此类人群提供了一种替代方法。研究表明, BFRT即使在低至20% 1RM的运动强度下也显示出有益的训练效果(Abe et al., 2005b)。Shinohara等(1997)于1997年进行了第一例使用加压装置的研究。该研究对5名无训练经验受试者的两侧下肢(仅单侧BFR)进行了为期4周的单腿伸膝训练, 阻力为40%最大自主收缩力(MVC), 结果发现, BFR侧腿在2周

和4周后的MVC增幅显著高于无BFR腿。此后相关研究开始验证BFRT的效果。Takarada等(2000c)将无力量训练经验受试者分为低强度BFR组(LIBFR组, 50% 1RM)、高强度组(HI组, 80% 1RM)和低强度对照组(LI组, 50% 1RM), 经过16周的坐姿屈肘训练后发现, LIBFR和HI组的力量增长分别为18.4%和22.6%(二者间无显著差异), 均显著大于LI组(1.04%)。此外, 尽管LIBFR、HI和LI组都显著增加了肱二头肌和肱肌的横截面积(CSA), 但LIBFR组(20.3%和17.8%)的增幅显著高于LI组(6.9%和3.8%), 且与HI组无显著差异。另外, 针对无力量训练经验的年轻男性(Abe et al., 2005b)和老年人群(Patterson et al., 2011; Yasuda et al., 2016)的其他研究也有类似发现。

BFRT不仅在普通人群中显示出良好的训练效果, 在运动员训练中也有益处。Luebbbers等(2017)对3组高中举重运动员进行了6周的深蹲训练, 研究发现, 低强度BFR组(30% 1RM)的最大深蹲力量显著提高, 而低强度组( $\leq 30\%$  1RM)和高强度组( $\geq 65\%$  1RM)相比训练前无显著变化。举重运动员的力量本身就处于较高的水平, 进一步发展其肌肉质量和力量较为困难(Ahtiainen et al., 2003), 而BFR的加入似乎为训练提供了一个额外刺激。Yamanaka等(2012)对36名NCAA I级足球运动员进行了4周20% 1RM的卧推和深蹲训练, 发现上下肢BFR组最大卧推和深蹲力量以及上下胸围的增幅均显著大于对照组。此外, 研究还发现, BFRT除了有助于运动员肌肉肥大和力量增长外(Luebbbers et al., 2017; Yamanaka et al., 2012), 还可以提高运动员在相关测试中的运动表现, 如短距离冲刺(Abe et al., 2005a; Cook et al., 2014; Manimmanakorn et al., 2013)、反向跳功率(Cook et al., 2014)、505敏捷测试(Manimmanakorn et al., 2013)、垂直跳(Manimmanakorn et al., 2013)和多级20m往返跑测试(Manimmanakorn et al., 2013)。

传统观点认为, 有氧运动不会导致肌肉肥大(Kraemer et al., 1995), 甚至在与力量训练进行同期化训练时还会削弱力量训练的肌肥大效果(Bell et al., 2000)。然而BFRT相关研究发现, BFR与低强度有氧运动(步行或自行车)相结合可以引起肌肉肥大和力量增长(盛菁菁等, 2019; Abe et al., 2010; Ozaki et al., 2011; Sakamaki et al., 2011)。Abe等(2010)对19名普通男性进行了8周40%  $\dot{V}O_{2max}$ 的自行车训练, 结果显示, BFR组(每次15 min)大腿肌肉CSA和伸膝MVC显著增大, 而对照组(每次45 min)相较于训练前无显著变化。同样, Ozaki等(2011)对23名老年人进行了10周45%储备心率(HRR)的步行训练, 研究发现, BFR组最大等速伸膝扭矩和屈膝扭矩及大腿肌肉CSA显著增大, 而对照组并未出现类似的效果。这种运动强度较小且技术单一的运动方式对于不适宜进行大强度训练的人群来说具有重大意义。除此之外, 还有研究将

BFR 与其他训练形式相结合,如神经肌肉电刺激(NEMS)(Natsume et al.,2015; Ozaki et al.,2015)、水阻训练(Araújo et al.,2015)、弹力带训练(Thiebaud et al.,2013; Yasuda et al.,2014b)和自重训练(Ishii et al.,2005; Kang et al.,2015),上述研究均发现,BFR可引起肌肉质量和力量的显著增加。

然而在BFRT中需要注意的是,虽然受试者的绝对最大力量出现明显增长,但其相对力量(最大力量/肌肉CSA)并没有显著变化(Fujita et al.,2008; Yasuda et al.,2010c),并且,低强度BFRT也没有产生与传统高强度训练相似的肌肉激活增加(Cook et al.,2013; Manini et al.,2009)。因此,与传统大强度力量训练(神经适应和肌肉肥大)提升力量的机制不同,BFRT提升肌肉力量可能是肌肉肥大所致。而对于运动员来说,仅通过肌肉肥大增加肌肉力量是远远不够的。Yasuda等(2011)发现,低强度BFRT(30% 1RM)结合传统高强度力量训练(75% 1RM)(2天BFRT+1天高强度力量训练)进行6周的训练后,结合组最大卧推力量增长与传统高强度组相似(分别为15.3%和19.9%),显著高于单独使用BFR组(8.7%)。此外,传统高强度训练组和组合组的肱二头肌相对力量都显著增加(分别为10.5%和6.7%),但单独BFR组却未显著增加。相比于单独BFR组,高强度训练组和组合组产生的训练效果可以归因于神经适应(Yamanaka et al.,2012)。鉴于此,有研究将BFRT作为NCAA II级橄榄球运动员高强度力量训练后的增补训练(即在高强度力量训练完成后进行BFRT),并发现,采用BFRT增补方案组力量增长效果显著大于单独高强度力量训练组和单独BFRT组(Kriley,2014; Luebbbers et al.,2014)。因此,运动员可通过BFRT与传统高强度力量训练相结合来实现对肌肉形态和神经的有效刺激。

综上所述,现有研究已反复证明,BFRT可有效引起肌肉肥大和力量增长(徐飞等,2013; 吴旻等,2019; Pope et al.,2013),较无BFR的相同低强度运动方案更加有效(Abe et al.,2009; Yasuda et al.,2012),且效果与高强度训练相似(Sousa et al.,2017; Yasuda et al.,2010b)。BFRT对普通人群、康复人群和运动员都能产生有效的训练效果。低强度BFRT在降低训练中的机械应力和减缓训练导致的肌肉损伤的同时(魏佳等,2019; Loenneke et al.,2014a),可以达到高强度力量训练类似的效果。运动员可在力量训练周期中适当插入BFRT,如每周进行2次大强度力量训练和1次低强度BFRT,在获得有效肌肉形态和神经适应(力量)的同时减少运动员所承受的机械负荷。

## 2.2 提高有氧能力

良好的有氧能力水平对于一些项目运动员的竞技能力至关重要(黎涌明,2015)。最大摄氧量( $\dot{V}O_{2max}$ )是反映有氧能力的重要指标,一般认为中高运动强度(60%~

90%  $\dot{V}O_{2max}$ )的耐力训练是提高 $\dot{V}O_{2max}$ 的主要训练方法(Garber et al.,2011; Swain et al.,2002)。然而BFR相关研究发现,BFR结合低强度有氧运动(步行和自行车)除了可以引起有益的肌肉适应外,还可以提高受试者的 $\dot{V}O_{2max}$ 。Abe等(2010)对19名普通男性进行了8周40%  $\dot{V}O_{2max}$ 的自行车训练。尽管对照组每次的训练时间是BFR组的3倍(45 min vs. 15 min),但只有BFR组出现 $\dot{V}O_{2max}$ 的显著提高。与此类似,Park等(2010)对14名大学生篮球运动员进行了2周4~6 km/h的步行训练,研究发现,只有BFR组的 $\dot{V}O_{2max}$ 出现显著提高。综合其他类似文献,除了一项步行研究未观察到 $\dot{V}O_{2max}$ 提高外(De Oliveira et al.,2014),其余低强度BFR步行或自行车运动后均发现 $\dot{V}O_{2max}$ 的显著提高(Abe et al.,2010; Park et al.,2010; Ursprung et al.,2017)。这种既可以引起有效的肌肉适应,也可以改善人体心肺功能的BFR有氧运动对于老年人和康复人群来说可能是一种改善身体功能的良好选择。

## 2.3 促进康复治疗

提高肌肉质量和力量,恢复骨骼肌肉的功能是康复治疗优先考虑的重点。然而,患有骨骼肌肉损伤的康复人群由于肢体功能退化、疼痛和损伤风险等原因很难进行大强度的力量训练(Hoyt et al.,2015),而BFRT为这类人群提供了恢复肌肉功能的新途径。Hylden等(2015)对7名表现为股四头肌和腘绳肌肌无力的有过外伤性下肢损伤的患者进行了为期2周的BFR低强度(20%~30% 1RM)力量训练,发现受试者伸膝和屈膝平均扭矩提高了13~37%,平均功率提高了42%~81%,等速运动次数测试增加了35%~55%。此外,在一项前交叉韧带(ACL)重建手术后的康复研究中,Ohta等(2003)将44名ACL术后重建患者分为常规康复组和BFR康复组(两组康复训练内容相同)。16周训练后,仅在BFR康复组发现膝关节力量和伸膝肌CSA显著提高。其他文献也报道了类似的积极康复效果(Giles et al.,2017; Tillma,2017; Yow et al.,2018)。

除此之外,还有研究发现,BFR结合低强度运动不仅可以引起BFR部位肢体肌肉的有益适应,还可引起非BFR部位肢体的有益适应(Abe et al.,2012)。Abe等(2005b)对年轻男性受试者进行了2周的下肢加压深蹲和屈腿训练(20% 1RM)发现,BFR组不仅出现了股四头肌和股二头肌体积的显著增大,还出现臀大肌体积的显著增大。与此类似,Yasuda等(2010b)的研究发现,经过2周30% 1RM的卧推训练后,BFR组不仅出现肱三头肌厚度的显著增加,还出现胸大肌厚度的显著增加。此外,研究还发现BFRT具有远程效应。May等(2018)将受试者分为下肢BFR组和下肢无BFR组,进行了7周的上下肢力量训练(3组50% 1RM的单侧屈肘+4组30% 1RM的双侧屈膝和伸膝)后发现,下肢BFR组的单侧运动上肢的最大力量提升幅度显著大于下肢无BFR组,即下肢BFR对上肢力量

的提升具有远程效应。此发现给患侧部位无法进行大强度运动的人群提供了治疗的新视角。

与此同时,一些个案研究还发现,BFRT对老年人和慢性病患者具有积极的治疗效果,包括改善老年人的血管功能(降低血管僵硬度和提高静脉顺应性)(Fahs et al., 2014; Ozaki et al., 2011; Shimizu et al., 2016),促进微血管生成(Evans et al., 2010; Larkin et al., 2012),降低运动后血压(Maior et al., 2015; Neto et al., 2015),提高痴呆患者的日常活动能力(Fukuda et al., 2011),降低无脑回畸形的颈部不稳定性(Iwashita, 2015),减缓帕金森引起的活动功能下降(Douris et al., 2018),治疗股骨头坏死和股骨内侧髁骨坏死(Hiraizumi et al., 2016; Nakajima et al., 2015)、病态窦房结综合征(Satoh, 2006)和脑白质软化(Iwashita et al., 2014)。Loenneke等(2012a)也提出了BFR康复训练的渐进模型,认为康复人群可以循序渐进地进行以下4种训练:1)在卧床休息或肢体固定期间单独使用BFR;2)BFR结合低强度步行;3)BFR结合低强度力量训练;4)BFR低强度力量训练结合高强度力量训练。

#### 2.4 预防废用性肌萎缩

人体的肌肉质量和力量一方面随着年龄的增长逐渐下降(Frontera et al., 2000),另一方面,在长期无负荷状态下会出现废用性肌萎缩(Yasuda et al., 2005)。有研究证明,BFR可以有效防止伤病卧床或肢体固定期间由于长期处于无负荷状态造成的废用性肌萎缩(Clark et al., 2006; Kubota et al., 2008; Takarada et al., 2000b)。Kubota等(2008)对15名健康受试者进行2周的左脚踝固定并保持无负荷状态,将其分为BFR组和下肢等长力量练习组,结果发现,只有BFR组未出现屈膝肌和跖屈肌肌力和下肢围度的显著下降。另外,Takarada等(2000b)对ACL重建患者术后第3~14天进行了BFR,发现相比于对照组(正常康复训练),BFR组在手术14天后膝伸肌CSA的下降幅度小于对照组(9.4% vs. 20.7%),并且后续康复期间BFR显著缩短了患者的康复时间。当然,不同的研究在这方面的结论并不一致。Iversen等(2016)针对ACL重建运动员进行了2周的BFR和正常康复训练,发现两组患者股四头肌CSA都显著减少,且相互间无显著差异,作者认为这可能是由于所采用的运动强度小于10% 1RM(肌肉肥大所需最小强度)和受试者实验前肌肉萎缩程度存在显著差异(-8.5%~22.8%)所致。

综上所述,BFRT可有效引起肌肉肥大和力量增长,BFR结合低强度有氧运动还有利于提升有氧能力,并且BFR的单独使用和/或与康复训练相结合可以有效防止由于长期无负荷状态期间导致的废用性肌萎缩和肌无力,有利于促进损伤康复或术后康复进程。BFRT对于普通人群、老年人群、康复人群和运动员而言是一种低损伤风险的肌肉增长方法。

### 3 血流限制训练的作用机制

BFR对肢体的主要影响是动脉血流流入减少和静脉血液聚集,这一影响导致肢体进入一个相对缺血和缺氧的状态(Yasuda et al., 2010a),由于乳酸等代谢产物在这一过程中无法得到有效清除(Teixeira et al., 2017; Yasuda et al., 2014a),使得代谢压力水平随之显著增加。基于此,不同学者从不同角度对BFRT作用机制进行了解释,这些解释涉及激素分泌、蛋白质合成和抑制合成调节、肌纤维募集和细胞肿胀等方面。

#### 3.1 激素分泌

力量训练后生长激素(GH)和类胰岛素增长因子1(IGF-1)等合成代谢激素的浓度增加有利于肌肉的生长(Kraemer et al., 2005)。有学者认为,在BFRT后引起肌肉肥大的机制可能是由于合成代谢激素分泌的增加(Takarada et al., 2000a)。由于血流被限制的运动中代谢产物大量累积(Kraemer et al., 2017; Yasuda et al., 2014a),导致内环境pH值降低并通过III和IV组传入神经的化学感受性反射刺激垂体释放GH(Gosselink et al., 1998)。Takarada等(2000a)发现,在20% 1RM的BFR伸膝训练后GH浓度显著增加,达到静息时的290倍。此外,GH的分泌可刺激肝脏中IGF-1的释放(Scott et al., 1985),研究同样在BFRT运动后发现IGF-1浓度的显著提高(Madarama et al., 2010; Seo et al., 2016)。当然,也有研究不支持这一观点。Mitchell等(2013)并未发现BFRT后GH、IGF-1和睾酮浓度的变化,并且认为运动后IGF-1浓度的提高不是GH的分泌所致。还有研究将IGF-1浓度变化归因于血浆浓度的变化(Madarama et al., 2010)。

#### 3.2 蛋白质合成与抑制合成调节

理论上,任何有利于蛋白质平衡趋于正向的机制都有利于肌肉的生长。哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(mammalian Target of Rapamycin, mTOR)被认为是调节骨骼肌生长的主网路(Bodine et al., 2001),可参与调节mRNA翻译起始和蛋白质合成(Wang et al., 2006)。在运动中蛋白激酶(Akt)被IGF-1激活进而诱导mTOR以刺激蛋白质翻译(Bodine et al., 2001),并在促进肌肉生长中发挥重要作用。mTOR信号通路已被发现在BFRT中被其下游效应物核糖体S6激酶1(SK61)磷酸化刺激,进而促进蛋白质生成和抑制蛋白质水解(Fry et al., 2010; Fujita et al., 2007; Gundermann et al., 2014),同时SK61磷酸化有利于翻译的起始和延长(Wang et al., 2006),这都有利于肌肉生长。此外,热休克蛋白(HSP)在正常状态下作为分子伴侣有助于蛋白质的组装与转运(Kiang et al., 1998),并对维持细胞稳态起到一定的作用(Simar et al., 2007),可在缺氧、缺血再灌注和酸中毒的环境中被诱导(Kregel, 2002),这表明,在缺血、缺氧和代谢产物累积增大的BFRT中,HSP活性可能发生改变。Kawada等(2005)对大鼠进行了2周BFRT后,发现跖肌

中的 HSP72 显著增加。

与此相反, Fry 等 (2010) 的研究中并没有发现 HSP70 的增加, 因此, 可能只有某种 HSP (HSP72) 才对肌肉肥大产生作用。此外, 由于 HSP72 具有抑制肌肉萎缩信号通路的作用 (Dodd et al.,2009; McClung et al.,2008), 可在肌肉收缩活动减少期间防止蛋白质的降解 (Naito et al.,2000)。因此, HSP 增加可能是 BFRT 引起肌肉肥大和预防肌肉萎缩的潜在机制之一。

研究还发现, BFR 运动中由于细胞内  $Ca^{2+}$  浓度升高或血流再灌注可激活神经一氧化氮合酶 (NOS-1) 并产生一氧化氮 (NO) (Uematsu et al.,1995)。一方面, NO 可直接激活 mTOR 信号通路以促进蛋白质的合成 (Ito et al.,2013); 另一方面, NO 在运动中可能通过合成肝细胞生长因子 (HGF) 激活卫星细胞, 并导致卫星细胞的增殖 (Anderson,2000)。随后卫星细胞不断分化并相互融合形成新的肌纤维和/或融合现有的肌纤维, 使肌纤维肥大 (Snijders et al.,2015)。已有研究在 BFRT 后观察到 NOS 表达显著增加 (Kawada et al.,2005; Larkin et al.,2012)。因此, NO 对 BFRT 产生的肌肉适应可能具有重要作用。

除了促进蛋白质合成外, 抑制肌肉生长蛋白表达的降低对蛋白质平衡趋于正向合成也可能产生一定作用。肌肉生长抑制素可调节卫星细胞的活性和自我更新 (McCroskery et al.,2003), 这一蛋白的缺失将引起肌肉组织的过度生长 (McCroskery et al.,2003; Mesires et al.,2002), 其主要通过受体调节型 Smad 蛋白 (Smad2/3) 的磷酸化来抑制成肌细胞和肌管的分化 (McCroskery et al.,2003; McPherron et al.,1999; Rebbapragada et al.,2003), 进而负调节肌肉生长 (Lin et al.,2002; Trendelenburg et al.,2009)。已有研究发现, BFRT 中肌肉生长抑制素表达的降低 (Drummond et al.,2008; Laurentino et al.,2012)。Laurentino 等 (2012) 将 29 名年轻男性受试者分为 BFRT 组 (20% 1RM)、高强度训练组 (HI 组, 80% 1RM) 和低强度训练对照组 (LIT 组, 20% 1RM), 8 周的伸膝训练后, 仅在 BFRT 和 HI 组发现肌肉生长抑制素表达显著降低 (分别下降 45% 和 41%), 而 LIT 组未见显著变化。这表明, 肌肉生长抑制素表达降低也可能对 BFRT 引起肌肉肥大具有一定的作用。

### 3.3 肌纤维募集

肌纤维募集的增加也可能是引起肌肉增长的一种机制。早期研究证明, 高阈值运动单位除了与肌肉收缩的力和速度相关, 还与运动中的氧浓度有关 (Katz et al.,1987; Moritani et al.,1992)。BFRT 中代谢产物累积的增大可以通过 III 和 IV 组传入神经的代谢刺激 (Krogh-Madsen et al.,2010) 或横桥循环抑制 (Kubota et al.,2011) 更快地引起神经肌肉疲劳。根据肌纤维募集的大小原则 (size principle), 肌肉在运动中首先募集慢肌纤维, 但随着运动强度的增加, 肌肉不断增加对高阈值快肌纤维的募集 (Henneman et

al.,1965), 而 BFRT 被认为可对更多数量的肌纤维进行刺激。运用肌电图对 BFRT 的研究表明, 低强度 BFRT 组的肌肉放电频率和幅度显著大于低强度对照组 (Kim,2009; Loenneke et al.,2011), 并由此证明了该机制在 BFRT 中产生作用的可能。然而, 学者对此机制的观点并不一致, 如 Cook 等 (2013) 未发现 BFRT 组肌肉激活较对照组显著更大。

### 3.4 细胞肿胀

Loenneke 等 (2012b) 提出, 因运动中细胞水合作用增加的细胞肿胀反应 (Cell Swelling) 可能是 BFRT 引起肌肉肥大适应的潜在机制。由于 BFR 运动中代谢产物大量累积所产生的压力梯度, 使血液流进肌纤维并引起细胞肿胀, 这种反应不仅可以促进蛋白质合成, 还有助于减少细胞中的蛋白质水解 (Lang et al.,1998)。虽然的确已有研究在 BFR 运动后发现了肌肉肿胀的现象 (Yasuda et al.,2015; Yasuda et al.,2012), 但是目前对这一机制研究较少, 还没有研究证明由于细胞肿胀引起的蛋白质水解减少是否有利于 BFRT 后肌肉的生长。

综上所述, 尽管目前已经提出多种 BFRT 的可能作用机制, 但支持 BFRT 产生肌肉适应的机制尚不统一。有限的证据表明代谢应激可能起主导作用, 其通过激素分泌、肌纤维募集和肌细胞肿胀, 最终影响了蛋白质合成和抑制过程。

## 4 血流限制训练有待解决的问题

尽管作为一种高强度力量训练的替代方法, BFRT 对于健身人群、医疗康复人群和竞技运动员显示出了其特有优势, 但作为一种新型的负荷刺激方法, BFRT 还存在众多有待解决的问题, 需要未来更多的实践应用和科学研究。

1) 文献中 BFRT 的应用人群目前还以无训练经验或康复人群为主, 以高水平运动员为对象的研究相对有限。高水平运动员在保持现有训练形式 (内容、强度、量、课次频率等) 的前提下如何合理运用 BFRT 替代部分现有高强度训练, 并且最终促进运动成绩的提升, 还有待更多的研究。

2) 现有研究主要证明低强度 BFRT 能够达到甚至超过无 BFR 限制的低强度训练, 但 BFRT 的剂量效应尚未确定, 即如何根据练习人群的特征在合适的训练阶段选择合适的 BFRT 运动方式、强度、量、间歇、组数、周课次频率等。

3) 一些影响 BFRT 的方法学问题还有待更多地关注, 这些问题包括: BFRT 器材 (材质、宽度、松紧)、BFRT 的交互效果 (即 BFR 部位对其他部位的影响)、BFRT 的营养补充等。

4) BFRT 的安全性问题。BFR 对代谢压力的增加是否

在个体(尤其是老年人群和康复人群)的安全承受范围内还有待进一步研究。

5) BFRT 可能存的负面效果(如是否影响神经冲动和肌肉收缩速度)和长期训练效应还尚不明确。

## 5 总结与展望

肌肉质量和力量是改善健康、预防跌倒和损伤、提升运动表现的重要保障, ≥70% 1RM 被认为是发展肌肉质量的有效强度。然而对于包括运动员在内的损伤康复人群和没有大强度训练(包括力量训练在内)经验的健身人群来说, 大强度力量训练可能会增加损伤风险和主观不适。BFRT 以低强度达到高强度训练效果的优势受到了健身人群、医疗康复人群和竞技运动员的欢迎。现有研究表明, BFRT 可以有效地引起肌肉肥大和力量增长, BFR 结合低强度有氧运动有利于提升有氧能力, BFR 的单独使用和/或与康复训练相结合使用, 可以有效防止由于长期无负荷状态期间导致的废用性肌萎缩和肌无力, 有利于促进损伤或术后康复进程。BFRT 产生效果的主要作用机制为代谢压力(缺血缺氧和乳酸堆积)增加, 并主要涉及激素分泌(GH 和 IGF-1)、蛋白质合成(mTOR、HSP 和 NO)和抑制(肌肉生长抑制素)调节、肌纤维募集和细胞肿胀等过程。

在竞技体育领域, 我国在备战东京奥运会和北京冬奥会的科技助力过程中将 BFRT 作为一种新的训练方法进行推广和使用, 一些运动项目的教练员和运动员在摸索的过程中也感受到了 BFRT 的训练优势。但需要注意的是, 竞技体育的训练是一个综合应用各种方法的过程, 只有从项目特征和需求出发, 合理搭配应用各种方法才能真正有助于竞技能力的提升。

## 参考文献:

- 黎涌明,2015.周期性耐力项目的训练量与强度[J].体育科学, 35(2): 67-72.
- 黎涌明,韩甲,刘阳,等,2018.2018年中国健身趋势:针对国内健身行业从业人员的网络问卷调查[J].上海体育学院学报, 42(1): 41-46.
- 黎涌明,王然,刘阳,等,2019.2019年中国健身趋势:针对国内健身行业从业人员的网络问卷调查[J].上海体育学院学报, 43(1):86-92.
- 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
- 吴旻,李倩,包大鹏,2019.加压力量训练对下肢骨骼肌影响的 Meta 分析[J].中国体育科技, 55(3): 20-26.
- 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.
- 魏佳,李博,冯连世,等,2019.血流限制训练的方法学因素及潜在安全性问题[J].中国体育科技, 55(3): 3-12.
- ABE T, FUJITA S, NAKAJIMA T, et al.,2010. Effects of low-intensity cycle training with restricted leg blood flow on thigh muscle volume

- and VO<sub>2</sub>max in young men[J]. J Sports Sci Med, 9(3): 452-458.
- ABE T, FUJITA S, SAKAMAKI M, et al.,2009. Skeletal muscle size and strength are increased following walk training with restricted leg muscle blood flow: implications for training duration and frequency[J]. Int J KAATSU Training Res, 5(1): 9-15.
- ABE T, KAWAMOTO K, YASUDA T, et al.,2005a. Eight days KAATSU-resistance training improved sprint but not jump performance in collegiate male track and field athletes[J]. Int J KAATSU Training Res, 1(1): 19-23.
- ABE T, YASUDA T, MIDORIKAWA T, et al.,2005b. Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily "KAATSU" resistance training[J]. Int J KAATSU Training Res, 1(1): 6-12.
- ABE T, LOENNEKE J P, FAHS C A, et al.,2012. Exercise intensity and muscle hypertrophy in blood flow-restricted limbs and non-restricted muscles: A brief review[J]. Clin Physiol Funct Imaging, 32(4): 247-252.
- AHTIAINEN J P, PAKARINEN A, ALEN M, et al.,2003. Muscle hypertrophy, hormonal adaptations and strength development during strength training in strength-trained and untrained men[J]. Eur J Appl Physiol, 89(6): 555-563.
- ANDERSON J E,2000. A role for nitric oxide in muscle repair: Nitric oxide-mediated activation of muscle satellite cells[J]. Mol Biol Cell, 11(5): 1859-1874.
- ARAÚJO J P, NETO G R, LOENNEKE J P, et al.,2015. The effects of water-based exercise in combination with blood flow restriction on strength and functional capacity in post-menopausal women[J]. Age, 37(6): 110.
- BELL G, SYROTUIK D, MARTIN T, et al.,2000. Effect of concurrent strength and endurance training on skeletal muscle properties and hormone concentrations in humans[J]. Eur J Appl Physiol, 81(5): 418-427.
- BODINE S C, STITT T N, GONZALEZ M, et al.,2001. Akt/mTOR pathway is a crucial regulator of skeletal muscle hypertrophy and can prevent muscle atrophy in vivo[J]. Nature Cell Biology, 3(11): 1014-1019.
- CLARK B C, FERNHALL B, PLOUTZ-SNYDER L L,2006. Adaptations in human neuromuscular function following prolonged unweighting: I. Skeletal muscle contractile properties and applied ischemia efficacy[J]. J Appl Physiol, 101(1): 256-263.
- COOK C J, KILDUFF L P, BEAVEN C M,2014. Improving strength and power in trained athletes with 3 weeks of occlusion training[J]. Int J Sports Physiol Perform, 9(1): 166-172.
- 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. Sports Exerc.,45(1): 67-74.
- CRUZ-JENTOFT A J, JEAN PIERRE B, BAUER J M, et al.,2010. Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People[J]. Age Ageing, 39(4): 412-423.
- DE OLIVEIRA F B D, LIMA L C, OLIVEIRA T P, et al.,2014. Blood Flow Restriction Walking Training Influences Running Economy?:

- 1202 Board# 6 May 29, 8[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 46(5S): 301.
- DODD S, HAIN B, JUDGE A, 2009. Hsp70 prevents disuse muscle atrophy in senescent rats[J]. *Biogerontology*, 10(5): 605-611.
- DOURIS P C, COGEN Z S, FIELDS H T, et al., 2018. THE effects of blood flow restriction training on functional improvements in an active single subject with parkinson disease[J]. *Int. J. Sports Phys Ther*, 13(2): 247-254.
- DRUMMOND M J, FUJITA S, TAKASHI A, et al., 2008. Human muscle gene expression following resistance exercise and blood flow restriction[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 40(4): 691-698.
- EVANS C, VANCE S, BROWN M, 2010. Short-term resistance training with blood flow restriction enhances microvascular filtration capacity of human calf muscles[J]. *J Sports Sci*, 28(9): 999-1007.
- FAHS C A, ROSSOW L M, THIEBAUD R S, et al., 2014. Vascular adaptations to low-load resistance training with and without blood flow restriction[J]. *Eur J Appl Physiol*, 114(4): 715-724.
- FALES J T, HEISEY S R, ZIERLER K L, 1962. Blood flow from and oxygen uptake by muscle, during and after partial venous occlusion[J]. *Am J Physiol*, 203(3): 470-474.
- FLECK S J, 1988. Cardiovascular adaptations to resistance training[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 20(5 Suppl): S146-151.
- FRONTERA W R, HUGHES V A, FIELDING R A, et al., 2000. Aging of skeletal muscle: A 12-yr longitudinal study[J]. *J. Appl. Physiol*, 88(4): 1321-1326.
- 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]. *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.
- FUJITA T, WF B, KURITA K, et al., 2008. Increased muscle volume and strength following six days of low-intensity resistance training with restricted muscle blood flow[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 4(1): 1-8.
- FUKUDA T, FUKUMURA K, UCHIDA Y, et al., 2011. A case of dementia presenting remarkable improvement in activities of daily living through KAATSU training[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 7(1): 13-17.
- GARBER C E, BLISSMER B, DESCHENES M R, et al., 2011. American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 43(7): 1334-1359.
- GILES L, WEBSTER K E, MCCLELLAND J, et al., 2017. Quadriceps strengthening with and without blood flow restriction in the treatment of patellofemoral pain: A double-blind randomised trial[J]. *Br J Sports Med*, 51(23): 1688-1694.
- GOSELINK K, GRINDELAND R, ROY R, et al., 1998. Skeletal muscle afferent regulation of bioassayable growth hormone in the rat pituitary[J]. *J Appl Physiol*, 84(4): 1425-1430.
- GUNDERMANN D M, WALKER D K, REIDY P T, et al., 2014. Activation of mTORC1 signaling and protein synthesis in human muscle following blood flow restriction exercise is inhibited by rapamycin[J]. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 306(10): 1198-1204.
- HENNEMAN E, SOMJEN G, CARPENTER D O, 1965. Functional significance of cell size in spinal motoneurons[J]. *J Neurophysiol*, 28(3): 560-580.
- HIRAIZUMI Y, NAKAJIMA T, SATO Y, et al., 2016. KAATSU training as a new effective exercise therapy in a case of femoral medial condyle osteonecrosis[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 12(1): 1-4.
- HOYT B W, PAVEY G J, PASQUINA P F, et al., 2015. Rehabilitation of lower extremity trauma: A review of principles and military perspective on future directions [J]. *Curr Trauma Rep*, 1(1): 50-60.
- HYLDEN C, BURNS T, STINNER D, et al., 2015. Blood flow restriction rehabilitation for extremity weakness: A case series[J]. *J Spec Oper Med*, 15(1): 50-56.
- ISHII N, MADARAME H, ODAGIRI K, et al., 2005. Circuit training without external load induces hypertrophy in lower-limb muscles when combined with moderate venous occlusion[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 1(1): 24-28.
- ITO N, RUEGG U T, KUDO A, et al., 2013. Activation of calcium signaling through Trpv1 by nNOS and peroxynitrite as a key trigger of skeletal muscle hypertrophy[J]. *Nat Med*, 19(1): 101.
- IVERSEN E, RØSTAD V, LARMO A, 2016. Intermittent blood flow restriction does not reduce atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *J Sport Health Sci*, 5(1): 115-118.
- IWASHITA H, 2015. A pediatric case with an unstabilized neck treated with skeletal muscle electrical stimulation and KAATSU training®[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 11(1): 7-12.
- IWASHITA H, MORITA T, SATO Y, et al., 2014. KAATSU training® in a case of patients with periventricular leukomalacia (PVL)[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 10(1): 7-11.
- KANG D Y, KIM H S, LEE K S, et al., 2015. The effects of bodyweight-based exercise with blood flow restriction on isokinetic knee muscular function and thigh circumference in college students[J]. *J Phys Ther Sci*, 27(9): 2709-2712.
- KATZ A, SAHLIN K, 1987. Effect of decreased oxygen availability on NADH and lactate contents in human skeletal muscle during exercise[J]. *Acta Physiol Scand*, 131(1): 119-127.
- 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.
- KIM L J, 2009. Changes of compound muscle action potential after low-intensity exercise with transient restriction of blood flow: A randomized, placebo-controlled trial[J]. *J Phys Ther Sci*, 21(4): 361-366.
- KRAEMER W J, PATTON J F, GORDON S E, et al., 1995. Compatibility of high-intensity strength and endurance training on

- hormonal and skeletal muscle adaptations[J]. *J Appl Physiol*, 78(3): 976-989.
- KRAEMER W J, RATAMESS N A, 2005. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training[J]. *Sports Med*, 35(4): 339-361.
- KRAEMER W J, RATAMESS N A, FLANAGAN S D, et al., 2017. Understanding the science of resistance training: An evolutionary perspective[J]. *Sports Med*, 47(12): 2415-2435.
- KREGEL K C, 2002. Invited Review: Heat shock proteins: Modifying factors in physiological stress responses and acquired thermotolerance [J]. *J Appl Physiol*, 192(5): 2177-2186.
- KRILEY L, 2014. Effects of a Seven-Week Practical Blood Flow Restriction Training Program on Lower-Body Strength and Power[D]. Emporia: Emporia State University.
- KROGH-MADSEN R, THYFAULT J P, BROHOLM C, et al., 2010. A two-week reduction of ambulatory activity attenuates peripheral insulin sensitivity[J]. *J Appl Physiol*, 108(5): 1034-1040.
- KUBOTA A, SAKURABA K, KOH S, et al., 2011. Blood flow restriction by low compressive force prevents disuse muscular weakness[J]. *J Sci Med Sport*, 14(2): 95-99.
- KUBOTA A, SAKURABA K, SAWAKI K, et al., 2008. Prevention of disuse muscular weakness by restriction of blood flow[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 40(3): 529-534.
- LANG F, BUSCH G L, RITTER M, et al., 1998. Functional significance of cell volume regulatory mechanisms[J]. *Physiol Rev*, 78(1): 247-306.
- LARKIN K A, MACNEIL R G, DIRAIN M, et al., 2012. Blood flow restriction enhances post-resistance exercise angiogenic gene expression[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 44(11): 2077-2083.
- 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.
- LIN J, ARNOLD H B, DELLA-FERA M A, et al., 2002. Myostatin knockout in mice increases myogenesis and decreases adipogenesis [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 291(3): 701-706.
- 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, ABE T, WILSON J, et al., 2012a. Blood flow restriction: An evidence based progressive model[J]. *Acta Physiol Hung*, 99(3): 235-250.
- LOENNEKE J P, FAHS C A, ROSSOW L M, et al., 2012b. The anabolic benefits of venous blood flow restriction training may be induced by muscle cell swelling[J]. *Med Hypotheses*, 78(1): 151-154.
- LOENNEKE J P, WILSON J M, MARÍN P J, et al., 2012c. Low intensity blood flow restriction training: A meta-analysis[J]. *Eur J Appl Physiol*, 112(5): 1849-1859.
- LOENNEKE J, THIEBAUD R, ABE T, 2014a. Does blood flow restriction result in skeletal muscle damage? A critical review of available evidence[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 24(6): e415-422.
- LOENNEKE J P, THIEBAUD R S, ABE T, et al., 2014b. Blood flow restriction pressure recommendations: The hormesis hypothesis [J]. *Med Hypotheses*, 82(5): 623-626.
- LUEBBERS P E, FRY A C, KRILEY L M, et al., 2014. The effects of a 7-week practical blood flow restriction program on well-trained collegiate athletes[J]. *J Strength Cond Res*, 28(8): 2270-2280.
- LUEBBERS P E, WITTE E V, OSHEL J Q, 2017. The Effects of practical blood flow restriction training on adolescent lower body strength[J]. *J Strength Cond Res*, 1, Publish Ahead of Print.
- 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.
- MAIOR A S, SIMÃO R, MARTINS M S, et al., 2015. Influence of blood flow restriction during low-intensity resistance exercise on the postexercise hypotensive response[J]. *J Strength Cond Res*, 29(10): 2894-2899.
- MANIMMANAKORN A, HAMLIN M J, ROSS J J, et al., 2013. Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes[J]. *J Sci Med Sport*, 16(4): 337-342.
- MANINI T M, CLARK B C, 2009. Blood flow restricted exercise and skeletal muscle health[J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 37(2): 78-85.
- MAY A K, RUSSELL A P, WARMINGTON S A, 2018. Lower body blood flow restriction training may induce remote muscle strength adaptations in an active unrestricted arm[J]. *Eur J Appl Physiol*, 118(3): 617-627.
- MCCROSKERY S, THOMAS M, MAXWELL L, et al., 2003. Myostatin negatively regulates satellite cell activation and self-renewal[J]. *J Cell Biol*, 162(6): 1135-1147.
- MCPHERRON A C, LAWLER A M, LEE S-J, 1999. Regulation of anterior/posterior patterning of the axial skeleton by growth/differentiation factor 11[J]. *Nat Genet*, 22(3): 260.
- MD J F B, KIELY D K, HERMAN S, et al., 2002. The relationship between leg power and physical performance in mobility - limited older people[J]. *J Am Geriatr Soc*, 50(3): 461-467.
- MESIRES N T, DOUMIT M E, 2002. Satellite cell proliferation and differentiation during postnatal growth of porcine skeletal muscle[J]. *Am J Physiol Cell Physiol*, 282(4): C899-C906.
- MITCHELL C J, CHURCHWARD-VENNE T A, BELLAMY L, et al., 2013. Muscular and systemic correlates of resistance training-induced muscle hypertrophy[J]. *PLoS One*, 8(10): e78636.
- MORITANI T, SHERMAN W M, SHIBATA M, et al., 1992. Oxygen availability and motor unit activity in humans[J]. *Eur J appl physiol occupational physiol*, 64(6): 552-556.
- NAITO H, POWERS S K, DEMIREL H A, et al., 2000. Heat stress attenuates skeletal muscle atrophy in hindlimb-unweighted rats[J]. *J Appl Physiol*, 88(1): 359-363.
- NAKAJIMA T, YASUDA T, FUKUMURA K, et al., 2015. KAATSU training® as a new exercise therapy for femoral head avascular necrosis: A case study[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 11(1): 1-6.
- NATSUME T, OZAKI H, SAITO A I, et al., 2015. Effects of electrostimulation with blood flow restriction on muscle size and strength[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 47(12): 2621-2627.
- NETO G R, SOUSA M S, COSTA P B, et al., 2015. Hypotensive



- effects of resistance exercise with continuous and intermittent blood flow restriction[J]. *J Strength Cond Res*, 29(4): 1064-1070.
- OHTA H, KUROSAWA H, IKEDA H, et al.,2003. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *Acta Orthop Scand*, 74(1): 62-68.
- OZAKI H, MIYACHI M, NAKAJIMA T, et al.,2011. 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.
- OZAKI H, NATSUME T, ABE T, et al.,2015. Effect of neuromuscular electrical stimulation with blood flow restriction on muscle size and strength [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 47(5S): 536.
- PARK S, KIM J K, CHOI H M, et al.,2010. Increase in maximal oxygen uptake following 2-week walk training with blood flow occlusion in athletes[J]. *Eur J Appl Physiol*, 109(4): 591-600.
- 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.
- POPE Z K, WILLARDSON J M, SCHOENFELD B J,2013. Exercise and blood flow restriction[J]. *J Strength Cond Res*, 27(10): 2914-2926.
- RATAMESS N A, ALVAR B A, EVETECH T K, et al.,2009. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 41(3): 687-708.
- REBBAPRAGADA A, BENCHABANE H, WRANA J, et al.,2003. Myostatin signals through a transforming growth factor  $\beta$ -like signaling pathway to block adipogenesis[J]. *Mol Cell Biol*, 23(20): 7230-7242.
- SAKAMAKI M, BEMBEN M G, ABE T,2011. Legs and trunk muscle hypertrophy following walk training with restricted leg muscle blood flow[J]. *J Sports Sci Med*, 10(2): 338.
- SATO Y,2005. The history and future of KAATSU training[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 1(1): 1-5.
- SATOH I,2006. KAATSU resistance training decreased the sinus pause in a patient demonstrating sick sinus syndrome. A case report[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 2(2): 53-56.
- 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.
- SEO D-I, SO W-Y, SUNG D J,2016. Effect of a low-intensity resistance exercise programme with blood flow restriction on growth hormone and insulin-like growth factor-1 levels in middle-aged women[J]. *South Afr J Res Sports Phys Educ Rec*, 38(2): 167-177.
- SENT S M, DODD S L, MCCLUNG J M, et al., 2008. Hsp70 over-expression inhibits NF-kappaB and Foxo3a transcriptional activities and prevents skeletal muscle atrophy[J]. *FASEB J*, 22(11): 3836-3845.
- 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.
- SHINOHARA M, KOUZAKI M, YOSHIHISA T, et al.,1997. Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance[J]. *Eur J Appl Physiol Occupational Physiol*, 77(1-2): 189-191.
- SIMAR D, MALATESTA D, BADIOU S, et al.,2007. Physical activity modulates heat shock protein-72 expression and limits oxidative damage accumulation in a healthy elderly population aged 60 ~ 90 years[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 62(12): 1413-1419.
- SNIJDERS T, NEDERVEEN J P, MCKAY B R, et al.,2015. Satellite cells in human skeletal muscle plasticity[J]. *Front Physiol*, 6:283.
- SOUSA J, NETO G, SANTOS H, et al.,2017. Effects of strength training with blood flow restriction on torque, muscle activation and local muscular endurance in healthy subjects[J]. *Biol Sport*, 34(1): 83.
- SWAIN D P, FRANKLIN B A,2002. VO<sub>2</sub> reserve and the minimal intensity for improving cardiorespiratory fitness[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 34(1): 152-157.
- TAKARADA Y, NAKAMURA Y, ARUGA S, et al.,2000a. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion[J]. *J Appl Physiol*, 88(1): 61-65.
- TAKARADA Y, TAKAZAWA H, ISHII N,2000b. Applications of vascular occlusions diminish disuse atrophy of knee extensor muscles[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 32(12): 2035-2039.
- TAKARADA Y, TAKAZAWA H, SATO Y, et al.,2000c. 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.,2017. Blood flow restriction increases metabolic stress but decreases muscle activation during high-load resistance exercise[J]. *Muscle Nerve*, 57(1): 107-111.
- THIEBAUD R S, LOENNEKE J P, FAHS C A, et al.,2013. The effects of elastic band resistance training combined with blood flow restriction on strength, total bone - free lean body mass and muscle thickness in postmenopausal women[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 33(5): 344-352.
- THOMPSON W R,2017. Worldwide survey of fitness trends for 2018: The CREP edition[J]. *ACSM's Health Fit J*, 21(6): 10-19.
- TILLMA R,2017.The Use of Blood Flow Restriction Therapy in the treatment of a professional baseball player status post meniscectomy: A case report[R]. Iowa: The University of Iowa.
- TRENDELENBURG A U, MEYER A, ROHNER D, et al.,2009. Myostatin reduces Akt/TORC1/p70S6K signaling, inhibiting myoblast differentiation and myotube size[J]. *Am J Physiol Cell Physiol*, 296(6): C1258-C1270.
- UEMATSU M, OHARA Y, NAVAS J P, et al.,1995. Regulation of endothelial cell nitric oxide synthase mRNA expression by shear stress[J]. *Am J Physiol Cell Physiol*, 269(6): C1371-C1378.
- URSPRUNG W, SMITH J D,2017. The Effects of Blood Flow Restriction Training on  $\dot{V}O_{2max}$  and 1.5 Mile Run Performance[C]// *International Journal of Exercise Science: Conference Proceedings*. San Antonio: Texas A&M University. San Antonio: 29-41.
- VISSER M, GOODPASTER B H, KRITCHEVSKY S B, et al.,2005. Muscle mass, muscle strength, and muscle fat infiltration as predictors of incident mobility limitations in well-functioning older

- persons[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 60(3): 324-333.
- WANG X, PROUD C G, 2006. The mTOR pathway in the control of protein synthesis[J]. *Physiology*, 21(5): 362-369.
- YAMANAKA T, FARLEY R S, CAPUTO J L, 2012. Occlusion training increases muscular strength in division IA football players[J]. *J Strength Cond Res*, 26(9): 2523-2529.
- YASUDA N, GLOVER E I, PHILLIPS S M, et al., 2005. Sex-based differences in skeletal muscle function and morphology with short-term limb immobilization[J]. *J Appl Physiol*, 99(3): 1085-1092.
- YASUDA T, ABE T, BRECHUE W F, et al., 2010a. Venous blood gas and metabolite response to low-intensity muscle contractions with external limb compression[J]. *Metabolism*, 59(10): 1510-1519.
- YASUDA T, FUJITA S, OGASAWARA R, et al., 2010b. Effects of low-intensity bench press training with restricted arm muscle blood flow on chest muscle hypertrophy: A pilot study[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 30(5): 338-343.
- YASUDA T, FUKUMURA K, FUKUDA T, et al., 2014a. Effects of low-intensity, elastic band resistance exercise combined with blood flow restriction on muscle activation[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 24(1): 55-61.
- YASUDA T, FUKUMURA K, HIDA H, et al., 2015. Effect of low-load resistance exercise with and without blood flow restriction to volitional fatigue on muscle swelling[J]. *Eur J Appl Physiol*, 115(5): 919-926.
- YASUDA T, FUKUMURA K, TOMARU T, et al., 2016. Thigh muscle size and vascular function after blood flow-restricted elastic band training in older women[J]. *Oncotarget*, 7(23): 33595-33607.
- YASUDA T, FUKUMURA K, UCHIDA Y, et al., 2014b. Effects of low-load, elastic band resistance training combined with blood flow restriction on muscle size and arterial stiffness in older adults[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 70(8): 950-958.
- YASUDA T, LOENNEKE J P, THIEBAUD R S, et al., 2012. Effects of blood flow restricted low-intensity concentric or eccentric training on muscle size and strength[J]. *PLoS One*, 7(12): e52843.
- YASUDA T, MEGURO M, SATO Y, et al., 2017. Use and safety of KAATSU training: Results of a national survey in 2016[J]. *Int J KAATSU Training Res*, 13(1): 1-9.
- YASUDA T, OGASAWARA R, SAKAMAKI M, et al., 2010c. Functional muscle adaptations following high-intensity training, low-intensity blood-flow restriction training, or a combined approach: 2761[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 42(5): 741.
- YASUDA T, OGASAWARA R, SAKAMAKI M, et al., 2011. Combined effects of low-intensity blood flow restriction training and high-intensity resistance training on muscle strength and size[J]. *Eur J Appl Physiol*, 111(10): 2525-2533.
- YOW B G, TENNENT D J, DOWD T C, et al., 2018. Blood flow restriction training after achilles tendon rupture[J]. *J Foot Ankle Surg*, 57(3): 635-638.

## The Effects and Mechanisms of Blood Flow Restriction Training

WEI Jia<sup>1</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, YANG Wei<sup>1</sup>, WANG Xinxin<sup>1</sup>, FENG Lianshi<sup>2\*</sup>, LI Yongming<sup>1,2\*</sup>

1. Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2. China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China

**Abstract:** Blood flow restriction training (BFRT) is a strategy to improve the training effect involving the use of a special compression device to pressurize a limb externally during exercise, which partially blocking the arterial blood flow while occluding the venous blood flow. In recent years, BFRT has been widely used in the fields of public fitness, competitive sports and medical rehabilitation; however, the effects and mechanisms of BFRT are still unclear. The current literatures show that BFRT is effectively in improving muscle mass and strength, aerobic capacity, as well as preventing muscle disuse atrophy, and accelerating injury and post-operative rehabilitation; in addition, BFRT may also have a positive effect on the treatment of skeletal muscle-related diseases. The main mechanisms of BFRT may be related to the increase of metabolic stress, which involves the process of hormone secretion, protein synthesis, muscle fiber raising and inhibition regulation, cell swelling, etc. BFRT provides an alternative to developing muscle strength for athletes and people who cannot withstand high-strength training. Along with the popularity of BFRT, the dose effect, safety and long-term training effect of BFRT are needed to be further explored in practice and scientific research. BFRT can be used as a new method for athletes to improve their sport performance.

**Keywords:** blood flow restriction training; KAATSU training; strength training; muscle hypertrophy; disuse atrophy