

血流限制训练对运动员有氧能力的影响研究进展

冯嘉宝 刘书芳* 谢耀升
广州体育学院, 广东 广州 510500

[摘要] 血流限制训练已成为当下的研究热点,其特点是能以较低的训练负荷取得较好的训练效果。作者通过搜索“血流限制”、“有氧功能”、“有氧训练”、“心肺训练”关键词,共搜集了58篇文章,其中国内9篇,国外49篇,研究认为:1.血流限制结合有氧训练可有效提高有氧能力;2.较高的压力值和较低的压力值相比,提升效果无明显差异;3.较高强度的训练和较低强度的血流限制训练相比,血流限制带来的提升效果无明显差异。因此,对于不能进行较高强度训练的人群使用血流限制技术,可以帮助恢复或提升有氧能力。作者研究了血流限制在有氧训练上的作用机制、安全性,以及引起有氧效用的压力值区间,可为相关运动处方提供参考作用。

[关键词] 血流限制; 有氧能力; 压力

DOI: 10.33142/fme.v3i5.7115

中图分类号: G804.5

文献标识码: A

Research Progress on the Effect of Blood Flow Restriction Training on Aerobic Ability of Athletes

FENG Jiabao, LIU Shufang*, XIE Yaosheng
Guangzhou Sport University, Guangzhou, Guangdong, 510500, China

Abstract: Blood flow restriction training has become a research hotspot at present, and its characteristic is that it can achieve better training effect with lower training load. By searching for the keywords "blood flow restriction", "aerobic function", "aerobic training" and "cardiopulmonary training", the author collected 58 articles, including 9 domestic and 49 foreign ones. The research shows that: 1. Blood flow restriction combined with aerobic training can effectively improve aerobic capacity; 2. There is no obvious difference in lifting effect between higher pressure value and lower pressure value; 3. There is no significant difference between the higher intensity training and the lower intensity blood flow restriction training in improving the effect of blood flow restriction. Therefore, the use of blood flow restriction technology for people who cannot perform high-intensity training can help restore or improve their aerobic capacity. The author studied the mechanism and safety of blood flow restriction in aerobic training, and the pressure value range that causes aerobic effect, which can provide reference for related exercise prescriptions.

Keywords: blood flow restriction; aerobic capacity; pressure

引言

血流限制(blood flow restriction, BFR)的运动训练(exercise training, ET)在康复中越来越受关注,这项技术允许骨骼肌在更低的运动量、更短的持续时间基础上得到加强和肥大^[1]。然而,关于血流限制训练的研究大多与肌力训练相关,与有氧功能相关的血流限制训练的研究只占小部分。现有的研究表明,血流限制训练对骨骼肌和血管系统的作用也有一定的影响。保持高频率(3-5次/周)的有氧运动能提高运动成绩^[2-4]和提高有氧恢复能力^[5],同时对健康也有积极影响^[6]。人们普遍认为,随着有氧能力的提高,需要更高强度的训练才能引起训练反应^[7]。因此,当高强度的训练不合适时(如损伤康复期间),研究出能在此阶段有助于维持和增强有氧能力的训练方法有其必要价值。

实际上,血流限制和有氧运动的结合为临床人群提供了一种可行及实用的训练方法来提高心肺能力,同时也为更多运动人群在需要降低训练强度阶段保持或改善有氧能力提供了一种手段。最近有越来越多的学者开始研究血

流限制训练对有氧能力和运动表现的影响^[8-9],希望让其可以在运动处方中的发挥作用。因此,为了确定更安全有效的运动处方以及更好地了解血流限制训练对有氧功能的影响,特综述如下:

1 血流限制有氧训练的特点

1.1 可帮助提升有氧功能

现有的研究表明,血流限制有氧训练能改善有氧功能。其中的一些研究的受试者是普通健康人群^[10-13],也有使用血流限制有氧训练作为某些专项运动员的实验干预手段,如Steffen Held等人^[14]实验的受试者是精英赛艇运动员,吴明云^[15]等人实验的受试者是空手道运动员,这些实验的结果都显示,通过一段时间的血流限制有氧训练干预后,受试者的有氧功能指标,如最大摄氧量(VO_{2max})、乳酸耐受性与排解速度、峰值跑步速度(PRV)等都都有所提高。说明不管是普通人群还是运动员,都能通过血流限制有氧训练有效提高有氧功能。还有周开祥等人^[16]和罗若莹^[17]等人对最近国内外的相关研究做了分析,他们都得出共同的结论,即血流限制结合有氧运动能有效提高健康成人的

有氧功能。

1.2 可帮助降低运动负荷

有研究表明,同是进行高强度有氧训练,使用或不使用血流限制对于有氧功能的改善作用差别不明显^[18],提示在做高强度有氧训练时,使用血流限制对于有氧功能的提升可能帮助不大。而血流限制有氧训练与一般低强度有氧训练的对比结果则显示,血流限制下的有氧训练对于有氧功能的改善,比一般低强度有氧训练显示出更大的优势^[11, 15, 18-19],提示同是做低强度有氧训练,使用血流限制可提升训练效果。

另外,使用血流限制后的低强度有氧训练对于有氧功能的影响也能得到和高强度训练相似的好处,魏佳^[20]表示,尽管与较高强度有氧训练相比,血流限制低强度下的有氧训练表现出更小的摄氧量、心率、血乳酸和主观疲劳度,但血流限制的应用可以产生与之相似的局部肌肉内的低氧环境;Rogério B. Corvin. 等人^[21]实验结果显示高强度间歇训练和低强度血流限制训练均能有效加速中等强度肺耗氧量的动力学。Silva JCG^[22]等人做了实验比较高强度间歇训练(80% VO_{2peak})、血流限制低强度有氧训练(40% VO_{2peak})和低强度有氧训练(40% VO_{2peak}),对比发现高强度间歇训练诱发的 VO_2 和心率提升最大,而尽管不如高强度间歇训练,血流限制低强度有氧训练提升的 VO_2 比低强度有氧训练更高,说明血流限制低强度有氧训练可提升 VO_2 ,这种训练方法可替代高强度间歇训练。

这些研究都说明血流限制有氧训练在那些不适宜进行高强度有氧训练的人群身上是有应用价值的^[23],比如普通康复人群和伤后运动员,并且提升有氧功能的效果比不使用血流限制的一般有氧训练效果更好。

2 血流限制有氧训练的压力探讨

关于血流限制训练加压压力值的研究发现,低至40mmHg的压力已足以诱导机体出现适应性反应^[24]。而关于血流限制肌力训练的最适压力,也有研究表明,在50%血流完全阻断压力下的血流限制性训练能够使肌肉形态和肌肉力量等指标发生显著改变,且在较高训练强度下(30% 1RM与20% 1RM作比较),肌肉形态功能改善更显著,但当施加压力高于50%血流完全阻断压力时,无论增加压力还是强度,都不会引起额外的肌肉肥大^[25]。然而作者检索了知网和PUBMED等中外文数据库,尚未检索到关于血流限制有氧训练的具体最适压力的研究。

2.1 一般血流限制有氧训练的压力值

本文搜索了相关文献,结果显示能引起有氧效用的压力都在120-220mmHg的区间范围内。其中有研究表明,在健康成年人中,以较低的运动强度进行每周45-60分钟(30%心率储备或40% VO_{2max})的持续运动结合血流限制,能观察到峰值摄氧量(VO_{2peak})^[26]明显提升,使用的加压压力为160-180mmHg;还能引起最大摄氧量(VO_{2max})

与力竭时间(TTE)明显改善^[27],加压压力为160-210mmHg。在持续的跑步机结合血流限制训练的人群上,也能观察到 VO_{2max} 和1.5英里计时赛表现有明显改善^[28-29],而他们使用的加压压力为120mmHg-220mmHg。Park等人做了实验,要求受试者进行15分钟结合血流限制的低强度步行(4-6 $km \cdot h^{-1}$),每周12次以上,持续2周,实验显示受试者 VO_{2max} 显著改善^[9]。还有一个研究调查了4周的低强度血流限制结合低强度有氧间歇训练(30%最大心率)的效果,也发现受试者的 VO_{2max} 明显改善,表明了有氧功能明显提升,而他们使用的加压压力为140mmHg-220mmHg。还有两项研究^[30, 31]是关于健康成人使用相对较高的加压压力(等于或大于160mmHg)结合有氧训练,结果也显示受试者的 VO_{2max} 有显著改善。

2.2 其他血流限制有氧训练的压力值

抗阻训练结合有氧训练:Libardi等人做了一个老年人12周有氧运动结合血流限制抗阻训练的实验,发现使用血流限制的实验组和没有血流限制的对照组的 VO_{2peak} 都有明显改善,但两组没有明显差异,而他们使用的平均加压压力为67mmHg^[32]。

间歇加压结合有氧间歇训练:Taylor等人^[33]研究了4周短跑间歇训练结合间歇血流限制对健康成年人有氧功能的影响。在这项研究中,受试者进行了30秒的冲刺,组间休息4分钟。血流限制组在4分钟的恢复期内,在双侧肢体上戴上血流限制(加压压力为130mmHg),持续2分钟。干预组的 VO_{2max} 在训练干预后有明显改善,而对照组则保持不变;Rogério B等人^[34]做了一个无BFR高强度训练(105% P_{peak})、相对高压BFR(149±16 mmHg)间歇加压训练(30% P_{peak})与相对低压BFR(103±14 mmHg)持续加压(30% P_{peak})训练的对照实验,得到的结果是,间歇BFR的耐力循环训练可以促进肌肉排氧和代谢紧张,这可能转化为增加耐力训练适应性,同时减少功率输出和RPE,即间歇高压BFR的中等强度耐力锻炼既具有良好的耐受力,又能提供与传统的、最大强度、高强度锻炼类似的大肌肉脱氧。

综上所述,血流限制有氧训练结合抗阻训练和间歇加压结合有氧间歇训练都能提高有氧能力,说明血流限制有氧训练可以结合不同的训练方式,使训练更多元化。而在抗阻训练结合有氧训练时,使用平均加压压力为67mmHg的加压组与对照组在有氧功能提升方面没有显著差异,可能提示67mmHg的加压压力过低,导致血流限制不能产生额外效果,但也可能因为受试者是老年人,和成年人在有氧功能的提升方面存在差异,还需对此做更多相关研究;在有氧间歇训练结合间歇加压时,暂时发现能有效提升有氧功能的加压压力值是130mmHg和149±16mmHg,处在上述的120mmHg-220mmHg的范围内,提示间歇训练和持续有氧训练的有效加压压力相似。

2.3 较低压力与较高压力对比

有相关研究显示加压压力在有效范围内时, 低压和高压之间不会表现出差异显著的有氧功能改善效果, 李乌兰^[11]等人选取了 36 名无专项训练基础的男性大学生, 把他们分为 3 组, 分别为常规低强度有氧运动组, 即对照组、血流限制加压 120mmHg (低压力) 结合低强度有氧运动组和血流限制加压 180mmHg (高血压) 结合低强度有氧运动组。三组受试者在田径场上进行耐力跑运动, 运动强度为 30%~45% 心率储备强度, 每次练习时间 30min, 每周 3 次, 持续 12 周。实验前后比较结果, 发现低加压组和高加压组心肺能力提升效果均比对照组更好, 但是低加压组和高加压组之间无明显差异。魏佳^[20]等人做了一个内容为一次最大递增负荷测试和七次持续时间为 5 分钟的恒定负荷测试的实验, 受试者为 21 名有训练经验的健康男性。在七次恒定负荷测试中, 其中一次的恒定负荷测试为无血流限制的高强度自行车运动 (70% 最大心率), 另外六次的恒定负荷测试为低强度自行车运动 (40% 最大心率), 而这六次测试当中的一次无使用血流限制, 其他五次测试则分别使用不同程度的血流限制 (40%, 50%, 60%, 70%, 80% 动脉闭塞压)。实验收集的数据为运动中的摄氧量、心率、主观疲劳度和组织氧饱和度以及运动前、后的血乳酸。结果发现, 在不同的血流限制加压压力下, 低强度有氧训练所引起的急性生理反应相似, 从而推断, 进行血流限制低强度有氧训练时, 更大的血流限制加压压力不会增加急性生理学的反应。

综上所述, 同在加压压力有效范围内, 低压和高压之间不会表现出差异显著的有氧功能改善效果, 但使用较低的加压压力训练时, 相比使用较高加压压力时训练者的身体感受更好。

3 血流限制有氧训练的影响机制

关于血流限制训练改善肌力与肌肥大原因, 已有不少学者做了相关实验研究 (促进激素分泌^[35]、蛋白质合成与抑制合成调节^[36]、肌纤维募集^[37]、细胞肿胀^[38]), 与之相比, 关于血流限制有氧训练影响有氧功能的相关原因的研究结果较少。

3.1 血流限制有氧训练的急性反应

有研究显示, 单次的血流限制有氧训练引起的急性反应会降低机体水平^[17], 如无氧阈速度下降和最大摄氧量强度下降, 造成的原因是乳酸排除受限和肌肉的氧供不足^[39], 并且血流限制有氧训练还有如下的急性反应:

耗氧量 VO_2 (l/min): Silva 等人^[22]也观察到了类似的结果, 表明以 40% 的 VO_{2peak} 强度步行时的耗氧量超过了不使用 BFR 的步行方案的耗氧量。Ozaki^[40]通过自行车的交叉对照试验, 也同样发现使用 BFR 方法的耗氧量比不使用 BFR 方案的耗氧量更高。

能量消耗: 关于 BFR 对能量消耗的影响, 有研究表明,

结合 BFR 的运动比不结合 BFR 的运动有更高的能量需求^[41]。Loenneke 等人^[42]发现, 使用 BFR 进行的训练比使用相同方案而不使用 BFR 的训练出现更高的 VO_2 提升幅度和能量消耗。Karabulut 等人^[43]使用交叉模型进行了一项 34 名肥胖人群 (18 名男性和 16 名女性) 的自行车运动研究, 对比在大腿使用 BFR 和不使用 BFR 的区别, 结果表明, 使用 BFR 的运动显著增加了运动过程中的能量需求。

运动后过度耗氧 (EPOC): 有一项研究调查了血流限制有氧训练对运动后过度耗氧量的影响^[44]。这些作者观察到, 与没有使用 BFR 的训练相比, 使用 BFR 的训练显著增加了 EPOC 的强度。

通过上述急性反应的多次叠加, 可能是血流限制有氧训练提高有氧能力的原因之一。

3.2 血流限制有氧训练的慢性反应

持续一段时间的血流限制有氧训练引起的慢性反应表现为最大摄氧量的提高, 造成的原因可能是来自于肌肉功能的提升, 而不是心血管功能^[45]。因为血流限制训练虽然可以提升机体的心率, 但不能提高机体心输出量的大小^[17]。还有研究表明, 血流限制有氧训练可以使乳酸堆积减慢, 延缓乳酸阈出现的时间, 从而提高有氧功能^[46]。关于血乳酸还有以下研究, 在 Loenneke 等人^[47]的一项研究中, 志愿者在跑步机上随机进行两组间歇步行, 分别为每组步行两分钟和每组步行一分钟, 匀速 75 米/分钟 (m/min), 他们的研究表明用 BFR 走路产生的刺激不足以增加运动后的代谢压力。然而, Corvino 等人^[21]和 Thomas 等人^[19]均观察到, 结合 BFR 的有氧训练比不结合 BFR 的有氧训练提高了血乳酸浓度; 还有研究数据支持血流限制低强度训练增加了肌肉的氧化能力^[21]。

因此, 血流限制有氧训练提升有氧能力的原因可能不在心血管功能, 而是与肌肉有关的外周适应, 即血流限制使肌肉排出乳酸的速度减慢, 从而迫使肌肉加快排出乳酸的速度, 并使肌肉产生相应的适应; 血流限制使肢体远端的血液回流减慢, 从而迫使机体产生适应, 加快血液回流速度。

4 血流限制训练的安全性

作为一种新兴的技术, 关于血流限制训练的研究越来越多, 使得我们已知即使在运动强度低至 20% 的 1RM, 在使用中等强度血流限制 (100mmHg) 的情况下, 也可让机体出现肌肥大^[48], 即可以使用较小的负荷压力就能达到大强度训练的效果, 可以很大程度上降低机体承受的机械应力, 降低损伤几率, 提升训练的安全性。但是关于血流限制的安全性我们还了解不多, BFR 引起的缺血可能通过增加局部和全身血管阻力以及代谢产物的积累和随后的化学反射刺激来增加血压和心肌氧需求^[49, 50], 此外, 肢体长时间使用 BFR 后释放可诱发缺血-再灌注损伤^[51, 52], 一段时间的 BFR 后再灌注可能导致局部损伤继发急性炎症反

应。然后,中性粒细胞和血小板被激活,产生活性氧和粘附分子,损害内皮功能^[53],这些由BFR运动引起的血流动力学改变可能不是有利的,甚至可能是有害的,特别是对于那些有心血管疾病的患者。因此,运动后的血流变化可能会存在潜在的安全隐患。

J. P. Loenneke 等人^[54]做了相关的调查研究,在心血管方面,血流限制训练的外周血管反应与常规锻炼的反应类似;在心血管系统的中枢反应,与没有血流限制的低强度(20% 1RM)训练相比,血流限制低强度(20% 1RM)训练的心率、收缩压和舒张压都更高,但这些数值都低于高强度训练,因此他们认为低强度的血流量限制训练是一个安全的训练方式;低强度血流限制训练后凝血活性不会增加;在肌肉方面,低强度血流限制训练只会引起最小的肌肉损伤;并且低强度血流限制训练(30% 1RM)似乎对健康人体受试者的神经传导速度也没有慢性负面影响。H. J. Thomas 等人^[19]则发现,血流限制低强度训练后的动脉压会增加,表明心肌负荷高,因此在给血管受损的患者开具处方时应谨慎。Christopher P Renzi^[55]等人也做了相关安全性研究,内容是测定17名年轻健康志愿者步行时腿部使用BFR对心血管功能的影响,发现在低强度有氧运动中,腿部使用BFR与血压和心脏工作的过度增加、全身动脉顺应性的降低以及运动后下肢内皮细胞功能的降低有关,这些血流动力学的改变可能造成不必要的循环负担,特别是对心功能受损的人群。

综上所述,血流限制训练对于健康人来说是一种相对安全的训练方法,但是对于有心血管疾病的患者需谨慎对待。

5 总结与展望

现有研究显示血流限制有氧训练可以有效改善有氧能力,并且可能的原因是肌肉的外周适应性改变。还有研究表示血流限制有氧训练只要较低的训练强度和较低的闭塞压力,便可得到与高强度训练或高闭塞压力训练相同的训练效果,且安全性较高;加压压力在120mmHg-220mmHg时,无论是持续有氧训练还是间歇有氧训练后,有氧能力都能得到显著提升。关于血流限制有氧训练,未来还需要在相关方面做更多深入研究,如最适闭塞压力、对于老年人的影响、以及对于有基础疾病等身体问题的患者应如何应用等。

[参考文献]

[1]Hughes L,Paton B,Rosenblatt B,Gissane C,Patterson SD.Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation:a systematic review and meta-analysis[J].*Br J Sports Med*,2017,51(13):1003-1011.

[2]Billat,V.L.,et al.Physical and training characteristics of top-class marathon runners[J].*Med Sci Sports Exerc*,2001,33(12):2089-97.

[3]Gabbett,T.J.,D.G.Jenkins,B.Abernethy.Relationships between physiological, anthropometric, and skill qualities and playing performance in professional rugby league players[J].*J Sports Sci*,2011,29(15):1655-64.

[4]Manari,D.,et al.VO2Max and VO2AT:athletic performance and field role of elite soccer players[J].*Sport Sci Health*,2016,12(2):221-226.

[5]Tomlin,D.L.,H.A.Wenger.The relationship between aerobic fitness and recovery from high intensity intermittent exercise[J].*Sports Med*,2001,31(1):1-11.

[6]Kodama,S.,et al.Cardiorespiratory fitness as a quantitative predictor of all-cause mortality and cardiovascular events in healthy men and women:a meta-analysis[J].*JAMA*,2009,301(19):2024-35.

[7]Buchheit,M.and P.B.Laursen.High-intensity interval training,solutions to the programming puzzle:Part I:cardiopulmonary emphasis[J].*Sports Med*,2013,43(5):313-38.

[8]Keramidas,M.E.,S.N.Kounalakis,N.D.Geladas.The effect of interval training combined with thigh cuffs pressure on maximal and submaximal exercise performance[J].*Clin Physiol Funct Imaging*,2012,32(3):205-13.

[9]Park,S.,et al.Increase in maximal oxygen uptake following 2-week walk training with blood flow occlusion in athletes[J].*Eur J Appl Physiol*,2010,109(4):591-600.

[10]杨建华,杨楠,许浩.血流限制训练对普通大学生心肺功能的影响[C].中国江苏南京:第十一届全国体育科学大会论文摘要汇编,2019.

[11]李乌兰.不同压力的血流限制结合低强度有氧运动对青年男性心肺功能的影响[D].天津:天津体育学院,2020.

[12]Paton,C.D.,S.M.Addis,and L.A.Taylor.The effects of muscle blood flow restriction during running training on measures of aerobic capacity and run time to exhaustion[J].*Eur J Appl Physiol*,2017,117(12):2579-2585.

[13]Karabulut,M.,et al.The impact of low-intensity blood flow restriction endurance training on aerobic capacity,hemodynamics, and arterial stiffness[J].*J Sports Med Phys Fitness*,2021,61(7):877-884.

[14]Held,S.,M.Behringer,and L.Donath.Low intensity rowing with blood flow restriction over 5 weeks increases VO2max in elite rowers:A randomized

- controlled trial[J]. *J Sci Med Sport*, 2020, 23(3): 304-308.
- [15]吴明云. 加压有氧训练对空手道组手运动员有氧能力的影响[D]. 上海:上海体育学院, 2021.
- [16]周开祥,等. 血流限制下有氧运动对健康成人有氧工作能力影响的 Meta 分析[J]. *中国体育科技*, 2021, 57(10): 55-63.
- [17]罗若营. 基于 Meta 分析的加压训练对机体有氧能力影响的研究[D]. 福州:福建师范大学, 2020.
- [18]Formiga, M. F., et al. EFFECT OF AEROBIC EXERCISE TRAINING WITH AND WITHOUT BLOOD FLOW RESTRICTION ON AEROBIC CAPACITY IN HEALTHY YOUNG ADULTS: A SYSTEMATIC REVIEW WITH META-ANALYSIS[J]. *Int J Sports Phys Ther*, 2020, 15(2): 175-187.
- [19]Thomas, H. J., B. R. Scott, and J. J. Peiffer. Acute physiological responses to low-intensity blood flow restriction cycling[J]. *J Sci Med Sport*, 2018, 21(9): 969-974.
- [20]魏佳. 不同血流限制水平下低强度自行车运动的急性生理学反应[D]. 上海:上海体育学院, 2020.
- [21]Corvino, R. B., et al. Speeding of oxygen uptake kinetics is not different following low-intensity blood-flow-restricted and high-intensity interval training[J]. *Exp Physiol*, 2019, 104(12): 1858-1867.
- [22]Silva, J. C. G., et al. Physiological and Perceptual Responses to Aerobic Exercise With and Without Blood Flow Restriction[J]. *J Strength Cond Res*, 2021, 35(9): 2479-2485.
- [23]Bennett, H. and F. Slattery. Effects of Blood Flow Restriction Training on Aerobic Capacity and Performance: A Systematic Review[J]. *J Strength Cond Res*, 2019, 33(2): 572-583.
- [24]Slysz, J., J. Stultz, and J. F. Burr. The efficacy of blood flow restricted exercise: A systematic review & meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*, 2016, 19(8): 669-75.
- [25]Loenneke, J. P., et al. Effects of exercise with and without different degrees of blood flow restriction on torque and muscle activation[J]. *Muscle Nerve*, 2015, 51(5): 713-21.
- [26]Kim, D., et al. Comparative Effects of Vigorous-Intensity and Low-Intensity Blood Flow Restricted Cycle Training and Detraining on Muscle Mass, Strength, and Aerobic Capacity[J]. *J Strength Cond Res*, 2016, 30(5): 1453-61.
- [27]Abe, T., et al. Effects of Low-Intensity Cycle Training with Restricted Leg Blood Flow on Thigh Muscle Volume and VO₂MAX in Young Men[J]. *J Sports Sci Med*, 2010, 9(3): 452-8.
- [28]Esparza, B. N. The effects of a short-term endurance training program with blood flow restriction cuffs versus ACSM recommended endurance training on arterial compliance and muscular adaptations in recreationally active males[D]. Texas: The University of Texas Rio Grande Valley, 2017.
- [29]Ursprung, W. and J. D. Smith. The effects of blood flow restriction training on VO₂max and 1.5 mile run performance[C]. Western Kentucky University: International Journal of Exercise Science: Conference Proceedings, 2017.
- [30]Corvino, R. B., et al. Four weeks of blood flow restricted training increases time to exhaustion at severe intensity cycling exercise[J]. *Revista Brasileira De Cineantropometria E Desempenho Humano*, 2014(16): 570-578.
- [31]de Oliveira, M. F. M. d., et al. Short - term low - intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Exercise in Sports*, 2016, 26(9): 1017-1025.
- [32]Libardi, C., et al. Effect of concurrent training with blood flow restriction in the elderly[J]. *J Sports Med*, 2015, 36(05): 395-399.
- [33]Taylor, C. W., S. A. Ingham, and R. A. J. E. p. Ferguson. Acute and chronic effect of sprint interval training combined with postexercise blood - flow restriction in trained individuals[J]. *Experimental Physiology*, 2016, 101(1): 143-154.
- [34]Corvino, R. B., et al. Physiological responses to interval endurance exercise at different levels of blood flow restriction[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(1): 39-52.
- [35]Kraemer, W. J., et al. Understanding the science of resistance training: An evolutionary perspective[J]. *Sports Med*, 2017, 47(12): 2415-2435.
- [36]Bodine, S. C., et al. Akt/mTOR pathway is a crucial regulator of skeletal muscle hypertrophy and can prevent muscle atrophy in vivo[J]. *Nature Cell Biology*, 2001, 3(11): 1014-1019.
- [37]魏佳. 血流限制训练的应用效果与作用机制[J]. *体育科学*, 2019, 39(4): 71-80.

- [38]Loenneke,J.,et al.The anabolic benefits of venous blood flow restriction training may be induced by muscle cell swelling[J].Medical Hypotheses,2012,78(1):151-154.
- [39]魏文哲,等.不同程度的血流限制对递增速度跑运动中心肺功能的影响[J].中国体育科技,2019,55(05):8-13.
- [40]Ozaki,H.,et al.Metabolic and cardiovascular responses to upright cycle exercise with leg blood flow reduction[J].J Sports Sci Med,2010,9(2):224-30.
- [41]Mendonca,G.V.,et al.Metabolic cost of locomotion during treadmill walking with blood flow restriction[J].Clin Physiol Funct Imaging,2014,34(4):308-16.
- [42]Loenneke,J.P.,et al.The energy requirement of walking with restricted blood flow[J].Sport Science,2011,4(2):7-11.
- [43]Karabulut M, Garcia SD.Hemodynamic responses and energy expenditure during blood flow restriction exercise in obese population[J].Clin Physiol Funct Imaging,2017,37(1):1-7.
- [44]Mendonca,G.,et al.Effects of walking with blood flow restriction on excess post-exercise oxygen consumption[J].Int J Sports Med,2015,36(3):11-18.
- [45]Rodríguez-Marp.eroyo,J.A.,et al.Relationship between the talk test and ventilatory thresholds in well-trained cyclists[J].J Strength Cond Res,2013,27(7):1942-9.
- [46]顾正秋.说话测试作为血流限制运动强度评价指标的可行性[J].中国组织工程研究,2022,26(8):1154-1159.
- [48]Loenneke JP, Thrower AD, Balapur A, Barnes JT, Pujol TJ. Blood flow-restricted walking does not result in an accumulation of metabolites[J].Clin Physiol Funct Imaging,2012,32(1):80-2.
- [48]Yasuda T, Abe , Sato Y, et al. Muscle fiber cross-sectional area is increased after two weeks of twice daily KAATSU-resistance training[J].International Journal of Kaatsu Training Research,2005,1(2):65-70.
- [49]Yudai T , Yutaka N , Seiji A , et al. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion[J].Journal of Applied Physiology,2000,88(1):61-65.
- [50]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):2097-2106.
- [51]Faust K B, Chiantella V, Vinten-Johansen J, et al. Oxygen-derived free radical scavengers and skeletal muscle ischemic/reperfusion injury[J].American Surgeon, 1988,54(12):709.
- [52]Hammond B,Hess M L.The oxygen free radical system: Potential mediator of myocardial injury[J].Journal of the American College of Cardiology,1985,6(1):215-220.
- [53]Jbsm A,Blg B.Vascular Dysfunction in Ischemia-Reperfusion Injury - ScienceDirect[J].Annals of Vascular Surgery,2005,19(4):572-584.
- [54]Loenneke JP, Wilson JM, Wilson GJ, Pujol TJ, Bemben MG. Potential safety issues with blood flow restriction training[J].Scand J Med Sci Sports,2011,21(4):510-518.
- [55]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.
- 作者简介:冯嘉宝(1988-)男,汉族,广东广州人,硕士在读,广州体育学院,研究方向:运动康复;通讯作者:刘书芳(1975-)女,汉族,安徽人,博士,副教授,广州体育学院,研究方向:运动医学;谢耀升(1995-)男,壮族,广东广州人,硕士在读,广州体育学院,研究方向:运动康复。