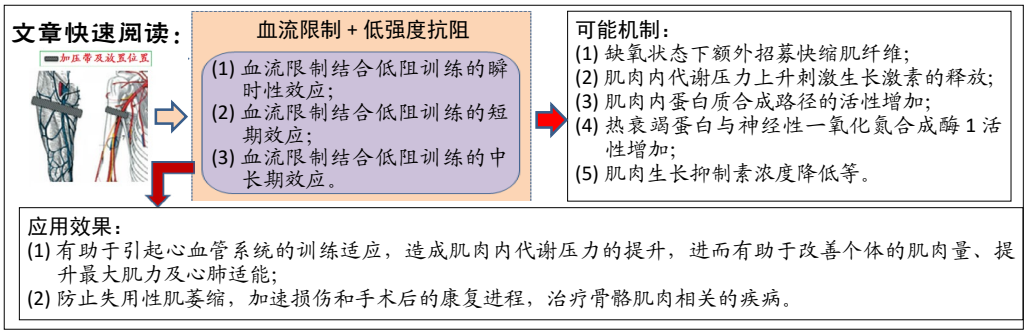
血流限制介入低强度阻力训练对肌肉适能的效益及生理机制

https://doi.org/10.12307/2022.549
投稿日期：2021-04-19
采用日期：2021-05-21
修回日期：2021-06-25
在线日期：2021-11-30
中图分类号：
R455；R319；R493
文章编号：
2095-4344(2022)17-02768-07
文献标识码：A

余 尾[1]，宋 刚[2]，刘译文[3]



文题释义：
血流限制训练：又称加压训练(KAATSU training)，指在运动期间通过特殊加压装置(例如加压带)对肢体进行外部加压，通过限制血液流向工作肌肉，刺激肌肉产生一系列反应，进而达到增加肌肉体积、提升肌肉力量的目的。
肌肉适能：是指机体依靠肌肉收缩克服和对抗阻力维持身体运动的能力。

摘要
背景：血流限制(又称之加压训练)结合低强度抗阻训练最近被证明能促进不同人群的肌肉适应，但由于在方法上并不全然相同，到目前为止，有关这种训练方法如何影响受试者肌肉适能及相关机制依旧并不十分清楚。
目的：文章针对血流限制结合低强度抗阻训练促进肌肉肥大及肌力增长的应用及可能机制等相关研究文献进行了综述，以期能提供给运动科学相关研究人员、教练及运动员在未来研究或训练实践方面提供一些有益参考。
方法：检索Web of Science、美国《医学索引》、荷兰《医学文摘》和中国知网数据库，中文检索词：“血流限制训练、加压训练、阻力训练、训练量、训练频率、间歇时间、肌肉适能、肌肉肥大、低强度训练、肌肉代谢”，英文检索词：“Blood flow restriction training，pressure training，resistance training，training volume，training frequency，interval time，muscle fitness，muscle hypertrophy，low intensity training，muscle metabolism”。检索截止日期为2021-03-01，根据纳入和排除标准共获得典型相关文献63篇。
结果与结论：①血流限制训练能引起运动过程中组织低氧、pH值下降，可促进生长激素分泌与mTOR路径活化，进而增加肌肉的合成，并经其横向迁移效果，不仅可改善加压部位的肌肉适能，更能提升未加压肌群的肌力与肌横断面积，同时避免高强度阻力训练所引起的受伤风险。②血流限制训练效果优劣存在运动处方剂量搭配效应，即血流限制程度(50-250 mmHg)与低强度抗阻(20%-50%1RM)之间的搭配，并综合考虑加压带宽度、加压部位、训练量、频率和间歇时间等因素，据此才能获得最佳训练效果。③对老年人或包括运动员在内的损伤康复人群来说，低强度抗阻训练运动处方可能是一种较佳的替代训练方法，但至今有关这方面的研究欠缺。④结果证实，低强度阻力训练(20%-50%1RM)结合血流限制可以促进肌肉肥大及增加肌力，效果与高强度阻力训练类似，但低强度抗阻训练针对不同年龄段及不同体能水平的受试者，特别是针对那些身体存在缺陷的人，其训练效果及可能存在的风险，需要未来更多的研究数据来提供支撑。
关键词：血流限制；低强度抗阻；肌肉适能；生理效益；加压训练；训练量；训练频率；间歇时间；肌肉肥大；肌肉代谢

Benefit and physiological mechanism of low-intensity resistance training with blood flow restriction intervention on muscle fitness

Yu Wei[1], Song Gang[2], Liu Yiwen[3]
[1]School of Physical Education, Leshan Normal University, Leshan 614000, Sichuan Province, China; [2]School of Physical Education, Southwest University, Chongqing 400715, China; [3]Department of Physical Education, North Sichuan Medical College, Nanchong 637100, Sichuan Province, China
Yu Wei, Master, School of Physical Education, Leshan Normal University, Leshan 614000, Sichuan Province, China
Corresponding author: Liu Yiwen, MD candidate, Department of Physical Education, North Sichuan Medical College, Nanchong 637100, Sichuan Province, China

Abstract
BACKGROUND: Blood flow restriction (also known as pressure training) combined with low-intensity resistance training has been proved to promote muscle adaptation in different populations. However, it is unclear about how this training method affects the muscle fitness and related mechanism of subjects, because of the different methods.
OBJECTIVE: To review the application and possible mechanism of blood flow restriction combined with low-intensity resistance training in promoting muscle hypertrophy and muscle strength growth, so as to provide some useful references for sports science researchers, coaches and athletes in future research or training practice.

[1] 乐山师范学院体育学院，四川省乐山市 614000；[2] 西南大学体育学院，重庆市 400715；[3] 川北医学院体育部，四川省南充市 637100
第一作者：余尾，男，1981 年生，四川省人，汉族，2015 年西华师范大学毕业，硕士。
通讯作者：刘译文，韩国湖西大学在读博士，川北医学院体育部，四川省南充市 637100
https://orcid.org/0000-0002-3398-3694 (余尾)
基金资助：国家自然科学基金项目 (31360254)，项目负责人：宋刚
引用本文：余尾，宋刚，刘译文 . 血流限制介入低强度阻力训练对肌肉适能的效益及生理机制 [J]. 中国组织工程研究，2022，26(17):2768-2774.

METHODS: Relevant literatures were searched in Web of Science, Index Medicus, EMBASE, CNKI and other databases, with "blood flow restriction training, pressure training, resistance training, training volume, training frequency, interval time, muscle fitness, muscle hypertrophy, low intensity training, muscle metabolism" as keywords in English and Chinese, respectively. The search deadline was March 1, 2021. According to the inclusion and exclusion criteria, 63 typical literatures were finally obtained.

RESULTS AND CONCLUSION: Blood flow restriction training can cause tissue hypoxia and pH decrease in the process of exercise, promote the secretion of growth hormone and mTOR pathway activation, increase the muscle synthesis, and improve the effect of lateral migration. It can not only improve the muscle fitness of the compression part, but also enhance the muscle strength and cross-sectional area of the non-compression muscle group, and avoid the risk of injury caused by high-intensity resistance training. There is a dose matching effect of exercise prescription in the effect of blood flow restriction training, that is, the matching between the degree of blood flow restriction (50–250 mmhg) and low-intensity resistance (20%–50%1RM). The best training effect can be obtained by considering the width of pressure band, pressure position, training amount, frequency and interval time. Low-intensity resistance training prescription may be a better alternative training method for the elderly or the injured rehabilitation population including athletes. However, there is a lack of research on this aspect as yet. To conclude, low-intensity resistance training (20%–50%1RM) combined with blood flow restriction can promote muscle hypertrophy and increase muscle strength, and the effect is similar to that of high-intensity resistance training. However, for subjects of different ages and different physical fitness levels, especially for those with physical defects, more data from further studies are needed to clarify the training effect and possible risks of low-intensity resistance training.

Key words: blood flow restriction; low-intensity resistance; muscle fitness; physiological benefits; pressure training; training volume; training frequency; interval time; muscle hypertrophy; muscle metabolism

Funding: *the National Natural Science Foundation of China, No. 31360254 (to SG)*

How to cite this article: *YU W, SONG G, LIU YW. Benefit and physiological mechanism of low-intensity resistance training with blood flow restriction intervention on muscle fitness. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2022;26(17):2768-2774.*

0 引言 Introduction

加压训练 (KAATSU training) 又称血流限制训练 (blood flow restriction training，BFRT)，指在运动期间通过特殊加压装置 (如加压带) 对肢体进行外部加压，它与传统阻力训练最大不同之处在于采用较低的阻力负荷 (20%–50%1RM) 搭配充气式脉压带绑住运动肢段的近端后，借充气增加压力，以限制流动至运动肌群血流量的方式进行运动训练 [1-3]。血流限制训练依旧遵循传统阻力运动的基本模式 (如训练组数、阻力负荷、反复次数、组间休息时间及收缩形式等)，但其采用的阻力负荷只需达到 20%–30%1RM 的强度就能获得较好的肌肉适能效益 [4]，且该阻力负荷强度下训练时所支付能耗仅与日常生活中的身体活动量相当 [5]。ABE 等 [6] 将血流限制结合日常走路来进行训练，结果发现受试者下肢肌肉量与肌力得到全面发展。随后，更多研究指出通过血流限制搭配低强度耐力运动训练，不仅能提升肌肉适能，亦能同时促进心肺适能 [7-8]。故血流限制训练 (替换传统训练) 方式更适合处于康复治疗阶段群体或中高龄者群体进行下肢肌力训练，因为处于康复阶段的患者其日常生活中的身体活动量明显不足，肌肉量及肌力明显不如同年龄段的正常群体，且大部分患者存在肌少症，它往往会增加骨质疏松症、胰岛素抵抗及肥胖等风险 [9]。同时，较低的最大摄氧量水平，可能与中高龄者的心血管疾病及全因死亡率有关 [10]，因此，急需借运动来维持其正常的身体适能水平，而血流限制搭配低强度耐力训练似乎能同时促进肌肉及心肺适能的发展 [9-10]，这或许能为这类群体带来更大的运动效益。在组织工程方面，利用加压带固定于四肢所引起的缺血适应，早期的研究主要应用于医疗及复健上，例如使用血流限制后所产生的血流再灌注，可以刺激血管内皮细胞分泌腺苷与缓激肽，引起血管的舒张与适应，进而减少心肌阻塞的风险。在复健方面，例如，前十字韧带重建手术后，重复地使用血流限制于大腿，可以预防患者股四头肌萎缩的风险。

为此，血流限制训练对提升受试者肌肉质量和肌力、增强有氧能力、预防肌肉萎缩、加速损伤和手术后的康复进程等方面皆有显著的正向效益，它现已广泛应用于大众健身、竞技体育和医疗康复领域，但目前就血流限制训练的应用效果和作用机制尚不十分清楚。文章将着重于整理过去有关血流限制训练的瞬时性、短期及中长期生理效益，同时探讨其可能促进肌力的相关生理机制。希望能给康复医学及运动科学等领域的学者、医生、教练及运动员在未来针对血流限制训练实证研究及如何合理运用血流限制训练提升专项力量提供重要参考。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 由第一作者于 2020 年 8 月至 2020 年 10 月通过数据库检索。

1.1.2 检索文献时限 2000–03–01/2021–03–01。

1.1.3 检索数据库 借助 Web of Science、美国《医学索引》、荷兰《医学文摘》、EBSCO 及中国知网数据库进行检索。

1.1.4 检索词 中文检索词："血流限制训练、加压训练、阻力训练、训练量、训练频率、间歇时间、肌肉适能、肌肉肥大、低强度训练、肌肉代谢"；英文检索词："Blood flow restriction training，pressure training，resistance training，training volume，training frequency，interval time，muscle fitness，muscle hypertrophy，low intensity training，muscle metabolism"。

1.1.5 检索文献类型 临床研究的原著、综述和期刊论文 (有严格试验分组)。

1.1.6 手工检索情况 无。

1.1.7 检索策略 ①确定检索系统：根据该综述的内容选择合适的检索系统；②确定检索途径：各检索系统一般都具有许多索引体系 (即检索途径)，根据该课题需要选择自己熟悉的检索途径；③选定检索词：各种检索途径均须有相应检索词 (亦称入口词) 方可进行检索。如分类途径以分类号作为检索词，主题途径以标题词、关键词等作为检索词等；④调整检索方案：根据检索过程中出现的各种问题及时调整方案，扩大或缩小检索范围。

1.1.8 检索结果 该综述初始文献 887 篇，经 6 轮筛选最终获得典型文献 63 篇，皆为英文文献。文献检索流程图，见**图 1**。

图 1 ｜期刊论文筛选流程图

1.2 入组标准

1.2.1 纳入标准 ①该综述所选择文献的类型应为随机对照实验设计，研究对象与方法中必须有明确的实验组与控制组，且各组样本在年龄、性别等方面呈均匀分配；②实验对象包含 3 类人群，即运动员、健康成年人和健康中老年人；③实验设计必须采用阻血带对血流进行限制，并对加压方式、部位及强度有具体详细的说明；④论文结果分析中有详细的数据表，表中例出实验组与控制组的各项生理、生化指标的前、后变化及统计检验。

1.2.2 排除标准 ①文献中没有详细的数据及实验结果者；②会议论文、无数据文献及重复文献；③非随机试验；④研究对象为动物实验者；⑤属加压训练调查类的研究；⑥实验设计中无抗阻介入训练的研究。

1.3 文献质量评估 文献质量的评断方式是采用皮卓量表 (简称 PEDro) 予以评分，检验各篇文献于每项评分标准是否给予充足资讯予以评判其研究品质。PEDro 评判总分为 10 分，每篇文献由 2 位研究者独立评分，若有未达共识的项目，再由第 3 位研究者做决定。PEDro 分数愈高，表示此文献研究品质愈好，一般地，得分≥ 5 分者为高质量论文，得分≤ 4 分者为低质量论文。论文等级的判断依据新版牛津实证医学中心证据等级，此分类标准包含建议等级和证据等级。实证医学证据等级的评判方式与 PEDro 评分方式相同，若有任何未达共识项目，由第 3 位评分者决定最后等级，最终筛选出 63 篇高质量论文进行分析。

2 结果 Results

2.1 血流限制对促进肌肉肥大或肌力提升的可能机制

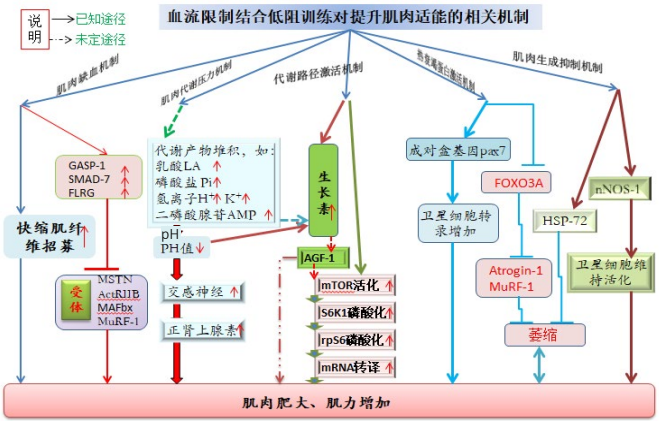
○肌肉缺血机制	○肌肉代谢压力机制
○代谢路径激活机制	○热衰竭蛋白激活机制
○肌肉生成抑制机制	

2.1.1 肌肉缺血机制 一般而言，运动开始先是招募慢缩肌 (Ⅰ型肌纤维) 参与工作，随着张力的增加再逐步招募快缩肌 (Ⅱ型肌纤维)。然而，肌肉在局部缺血的情况下，则不会依照此顺序执行[11-12]。另一方面，Ⅱ型肌纤维的招募阈值会随着肌肉疲劳而下降，而血流限制训练因运动肢段血流量受限，从而增加了该活动肢段的代谢压力，并伴随更高的肌电活动，如此诱发肌肉疲劳进而达到招募更多快缩肌参与工作[13-15]。肌肉生成抑制素结合激活素Ⅱ b 受体会降低成肌细胞分化进入肌管，从而抑制肌细胞分化与卫星细胞增殖[16-18](如此达不到肌肉肥大的目标)；若肌肉生成抑制素表达过度时，MuRF-1 激活水平提升，则会降低肌肉分化[19]，此时，卵泡抑制素相关基因 (FLRG) 及分化因子血清结合蛋白 1(GASP-1) 通过结合肌肉生成抑制素抢占了肌肉生成抑制素与激活素Ⅱ b 受体结合机会，故能抑制蛋白质水解[20-21]，达到肌肉肥大之目的。还有就是 Sma 和 Mad 相关蛋白 7(SMAD-7) 也可对肌肉生成抑制素信号起抑制作用，提升 MyoD 活化水平，从而进一步降低肌肉生成抑制素对肌肉生长的抑制，增加肌肉生成及分化[22-23]。

2.1.2 肌肉代谢压力机制 血流限制训练能显著提升全血、血浆及肌肉内的血乳酸浓度[24-27]，而血液酸性环境刺激有利于生长素的分泌。因为阻血带限制血流后，滞留在肌肉内的乳酸向外扩散的速度显著下降，而肌肉内酸性环境的提升会增强对第Ⅳ群痛觉神经的刺激，增强了下视丘－脑垂体的信号传递能力；也可能是血液中 K^+、H^+、AMP(二磷酸腺苷) 累积及组织缺氧提升了对第Ⅲ，Ⅳ群痛觉神经的刺激，这有利于生长素的合成与分泌[28]。类胰岛素生长因子 1 主要功能是刺激蛋白质合成与促进组织生长，而生长素浓度增加会刺激肝脏分泌类胰岛素生长因子 1[29]。但血流限制后，类胰岛素生长因子 1 是否会增加？目前相关研究并未达成一致意见。有些研究表明血流限制训练 (低强度结合加压训练) 能显著提升类胰岛素生长因子 1 水平[30-31]；也有研究认为血流限制训练 (走路结合加压) 并未发现类胰岛素生长因子 1 显著变化[6，32]。

2.1.3 代谢路径激活机制 哺乳动物雷帕霉素靶蛋白 (mammalian target rapamycin，mTOR) 被认为是调节骨骼肌生长的主要通路，它能整合细胞内外的合成性激素、细胞机械性刺激与营养物质刺激，通过改变其活性而间接调整核糖体与 mRNA 的结合率，进一步调节细胞内部蛋白质转译速率，在细胞蛋白合成上扮演非常重要的角色。血流限制训练有利于 mTOR 信号通路被上游分子磷酸化而激活，此时，蛋白激酶 (Akt) 被类胰岛素生长因子 1 激活进而诱导 mTOR 以刺激蛋白质翻译，并在促进肌肉生长中发挥重要作用。例如：血流限制训练中被其下游效应物核糖体 S6 激酶 1 磷酸化刺激，能提高核糖体蛋白与转译因子 mRNA 的蛋白质转译工作，促使蛋白质合成效率显著提高[33-34]。急性低强度阻力训练结合局部加压 (200 mmHg) 可显著提升核糖体 S6 激酶 1 的活性及肌肉蛋白合成表现[25]；同样地，FRY 等[35] 以类似的方法同样发现：血流限制训练能显著提升 mTOR、核糖体 S6 激酶 1 与 rpS6 的磷酸化过程，表明加压抗阻血训练的确有利于提升 mTOR 路径的磷酸作用。

2.1.4 热衰竭蛋白激活机制 叉头蛋白 O3A(FOXO3A) 为叉头转录因子 (FOXO) 的家族成员，FOXO3A 一方面接受 Akt 的调节，同时又在胰岛素 (或类胰岛素生长因子 1) 调节的下游信号通路中起关键作用，它受两种泛蛋白连接酶 Atrogin-1 及 MuRF-1 转录因子的共同控制[36-38]。Atrogin-1 和 MuRF-1 皆参与肌细胞泛素蛋白水解路径，其表达水平提升则意味着骨骼肌蛋白质分解加强，即骨骼肌蛋白质的降解提速，故抑制 FOXO3A 蛋白的激活就可降低 Atrogin-1 与 MuRF-1 的表现，从而缓解肌肉萎缩[36，39-41]。研究表明，急性血流限制训练能显著降低泛素蛋白水解路径的 mRNA 表现[37]，使 FOXO3A 下降原有水平的 1.92 倍、Atrogin-1 下降 2.1 倍和 MuRF-1 下降 2.44 倍；促使卫星细胞转录，显著加快肌肉肥大信号[42-44]。还有研究发现，低强度抗阻结合局部加压 (100 mmHg) 训练 2 周后，加压组每条Ⅰ型与Ⅱ型肌纤维内的 pax7 含量及表现、最大收缩力及肌肉横断面积皆显著增加[44]，说明该训练模式对提升转录速率及肌纤维蛋白质有益，见**图 2**。



图注：GASP-1 为生长分化因子相关血清蛋白 1；SMAD-7 为 Sma 和 Mad 相关蛋白 7；FLRG 为卵泡抑素相关基因；MSTN 为肌肉抑制素；ActRIIB 为激活素第Ⅱ型 b 接受器；MuRF-1 为肌肉无名指蛋白 1；MAFbx 为肌肉萎缩 F 盒；IGF-1 为第Ⅰ型类胰岛素生长因子；mTOR 雷帕霉素靶蛋白；S6K1 为核糖体蛋白 S6 激酶 70 kDa；rpS6 为核糖体 S6 蛋白；pax7 为成对盒基因 7；FOXO3A 为叉头蛋白 O3A；HSP-72 为热休克蛋白 72；nNOS-1 为神经性一氧化氮合成酶 1

图 2 ｜血流限制 (加压) 介入低抗阻训练促进肌肉适能的可能机制图

2.1.5 肌肉生成抑制机制 正常状况下，热休克蛋白的作用在于帮助蛋白质组装与转运及维持细胞稳态，它受缺氧、缺血再灌注及酸性环境所诱导，而血流限制训练恰好招致缺血、缺氧及代谢产物累积，因而能激发热休克蛋白活性。泛素蛋白水解能调节热休克蛋白 72，从而阻止蛋白质降解。此外，神经性一氧化氮合成酶 1 是一种抗肌肉萎缩的复合蛋白，其主要作用是维持卫星细胞活化，从而对促进肌肉生长有益 [45]。相关文献报道，经过 2 周加压阻血训练的大鼠，其肌肉肥大的效果显著，并伴随热休克蛋白 72 与神经性一氧化氮合成酶 1 活性显著增加 (注类胰岛素生长因子 1 及一氧化氮浓度没改变)，故推断肌肉肥大的现象很可能是由于热休克蛋白 72 与神经性一氧化氮合成酶 1 活性增加引起的 [46-47]。

2.2 血流限制训练的生理效应

- 血流限制训练的瞬时性效应
- 血流限制结合低阻训练的短期效应
- 血流限制结合低阻训练的中长期效应

2.2.1 血流限制训练的瞬时性效应 **表 1** 结果显示：①急性 (血流限制训练) 中，低阻力设置一般采用 20%1RM，训练后合成性激素反应与代谢压力显著增强，其中血流限制训练在提升合成性激素的效果方面显著优于单纯低强度阻力训练 (LRT)，几乎与单纯高强度阻力运动 (HRT) 具有同等效果类似 [24-25，48]。多数血流限制训练后表明生长素皆显著增加 [25，48]，但对类胰岛素生长因子 1 的影响报道并不一致，其原因有待于进一步阐明。②急性血流限制训练能显著造成代谢压力，但压力及阻力强度的提升所造成的代谢压力具有剂量反应特征，其中“低强度阻力 + 加压”方案设计中，阻力强度一般在 20%−40%1RM，压力范围在 144−230 mmHg、进行三四组 (每组 15−30 次，组间休息 30−60 s) 或连续 2 min，每分钟 30 次的频率 [49-52]。③多数研究设计的组间休息，都是维持加压状态，也有部分学者并非如此 [51]，其组间休息时解除加压，结果发现组间休息持续加压所造成的代谢压力比解除加压来得高，造成更高的代谢产物堆积。④随着加压压力的增加，血流限制训练瞬时效果出现显著的级别特征，加压处于约 60% 的下肢脉压下，血流限制训练出现有效最小“阈值”，即最有效的训练条件 [52-53]。尽管上述急性研究所获得的数据能为血流限制训练提供一些增加骨骼肌大小和力量的可能机制提供有益见解，但当训练计划转向中长期时，使用不同水平的血流限制效果仍有待后续深入研究。

2.2.2 血流限制结合低阻训练的短期效应 **表 2** 显示：①从肌肉肥大效益看，血流限制训练进行到 1−6 周 (两三次 / 周、加压 160−240 mmHg、抗阻 20%−50%1RM) 时，健康成人及老人腿部肌肉横断面积及肌肉量皆有显著增加 [6，32，54]。②当血流限制训练持续 3−6 周后，2 次 /d，抗阻强度介于 20%−50%1RM，结果发现肱二头肌、腿伸肌、肱三头肌和胸大肌肌力百分比明显提升 [55-57]；而老年人经 4 周血流限制训练后，阻力设置 25%−50%1RM，共 4 组，30 次 / 组，结果表明血管密度无影响，表明老年人或许需要更长的训练时间或更高的训练量才能唤起类似的血管适应 [55]。③血流限制训练持续一两周后，2 次 / 周，低抗阻 20%1RM，训练后白细胞介素 6 与肌红蛋白浓度无改变 [32，54]，说明未引起肌肉损伤及发炎反应。结果可见，要提升血流限制训练的短期效应，特别需要提升肌力或获得肌肉肥大，抗阻强度不能太低，一般要达到 65%1RM，同时训练时间不能太短 [3，53]。

表 1 ｜血流限制结合低阻力训练的瞬时效果文献荟萃

研究者	对象	训练方式	研究结果
TAKANO 等 [48] (2005)	11 位普通男性	BFRT，LRT 两组；强度 160−180 mmHg，20%1RM；采用双腿伸展，1 组 30 次，再 3 组 RTF，IR：20 s	GH，NE，IGF-1，VEGF ↑
FUJITA 等 [25] (2007)	6 位普通男性	分 BFRT，OT 两组；强度 200 mmHg，20%1RM；采用双腿伸展，1 组 30 次，再 3 组 15 次，IR：30 s	pH↓LA、GH、可的松↑IGF-1、睾固酮 ↔
SUGA 等 [49] (2009)	44 位普通女性	LRT，BFRT，LRMOT、LRHOT，HRT；20%1RM，20%1RM+100 mmHg，20%1RM+150 mmHg，20%1RM+200 mmHg，65%1RM；单侧跖屈，进行 2 min，30 次 /min，IR：无	PCr，pH：HRT > LRMOT= LRHOT > BFRT > LRT
FIGUEROA 等 [24] (2011)	6 位男运动员	BFRT、LRT 两组；强度 214 mmHg，20%1RM；采用双腿伸展，5 组 RTF，IR，30 s	GH，NE，LA↑CK，LP↔
SUGA 等 [51] (2012)	12 位普通男性	CBFRT，IBFRT，LRT，HRT 共 4 组；强度 144 mmHg，20%1RM，65%1RM；采用右脚跖屈，3 组 30 次，IR：1 min	Pi，pH，PCr，CBFRT= HRT>ILR，OT，LRT
LIXANDRAO 等 [50] (2019)	普通男、女各 12 位	LRT，BFRT，MROT，HROT、LRHOT、HRT；20%1RM；20%1RM+147 mmHg；30%1RM+147mmHg；40%1RM+147 mmHg；20%1RM+200 mmHg；65%1RM；单侧跖屈，进行 2 min，每 min 30 次，IR：无	PCr，pH，Pi，$H_2PO_4^-$ 随着阻力负荷提升而增加 HROT 的代谢压力反应最高，甚至大于 HRT
ILETT 等 [52] (2019)	10 位运动员	平衡随机顺序完成有节奏等长伸膝运动，3 个 BFRT(加压分别为下肢脉压的 40%、60% 及 80%)、LRT(抗阻力 20% MVC)，HRT(80%MVC)	相较于 LRT，BFRT(40)，BFRT(60) 及 BFRT(80) MVC 扭矩 ↓ 说明疲劳 ↓；HRT，BFRT(60) 及 BFRT(80) 血乳酸 ↑ 基线

表注：BFRT 为血流限制 + 低阻力训练组；MROT 为血流限制 + 中强度阻力训练组；LRT 为单纯低强度阻力训练组；HRT 为单纯高强度阻力训练组；OT 为单纯血流限制组；CBFRT 为 BFRT 休息时持续加压；IBFRT 为 BFRT 休息时解除压力；LRHOT 为低阻力高加压组；HROT 为高阻力加压组；LRMOT 为低阻力中加压组；GH 表示生长激素；LA 表示血乳酸；NE 表示正肾上腺素；CK 表示肌酸激酶；$H_2PO_4^-$ 表示去质子磷酸盐；LP 表示脂质过氧化物；VEGF 表示内皮生长因子；IR 表示组间休息；RTF 表示反复至衰竭。符号“↑”“↔”“↓”分别表示上升、不变及下降；1 mmHg=0.133 kPa

2.2.3 血流限制结合低阻训练的中长期效应 **表 3** 显示：①血流限制训练在竞技体育方面，运动选手经过 8 周及以上的血流限制训练后，受试者最大收缩力、等速肌力及肌肉横断面积显著增加，且不会因为自身训练量高而降低效果，甚至在一些专项力量训练方面效果明显 [58-60]。②血流限制训练针对普通健身者，经过 8−16 周的血流限制训练后 (两三次 / 周)，皆能显著增加中、老年人的 1RM、最大收缩力、等速肌力、肌肉横断面积及肌耐力 [6-7]。③在阻力强度设置方面，长期的“高强度或中等强度阻力 + 有 (无) 加压”训练，结果发现在“中强度与高强度阻力训练 + 加压训练”并没有获得额外增加肌力和肌肉肥大的效果 [61]；但在短期效果表现上 [62-63]，“25%1RM+ 有 (无) 加压”训练和“50%1RM+ 有 (无) 加压训练”，训练时间 4 周、3 次 / 周、每次 3 组，结果发现，有加压训练的脚跖屈动作，1RM 及最大收缩力值显著高于无加压训练的脚，且“50%1RM+ 加压”训练脚的提升幅度显著高于“25%1RM+ 加压”训练的脚。④长期血流限制训练对增加老年 (女性) 人肌力与单纯高强度抗阻训练效果相似，但“加压 + 高强度抗阻”训练比纯粹高强度抗阻训练更有效，且停练 6 周后发现，肌肉力量保持效果更好。

表 2 | 血流限制结合低阻力训练的短期效果文献荟萃

研究者	对象	训练方式	研究结果
ABE 等[6] (2006)	16 位健康男性	BFRT，LRT；160−240 mmHg，20%1RM；每天 2 次，2 周：深蹲和腿部卷曲，3 组 15 下，IR：30 s	腿中央 CSA、股二头、股四头、臀大肌肌肉量，BFRT↑，LRT↔；深蹲 1RM：两组皆 ↑；腿部卷曲 1RM：BFRT↑，LRT↔；IGF-1：BFRT 随着时间增加，2 周后显著 ↑；LRT↔
MAMMUCARI 等[36] (2007)	11 位健康男性	BFRT 前、后侧；160−220 mmHg，20%1RM；每天 2 次，训练 1 周：双膝伸展，1 组 30 下，再 3 组 15 下，IR：30 s	股四头 CSA↑3.5%；肌肉量 ↑4.8%；大腿中间 CSA ↑3.1%；MVC↑17%；1RM↑18%；CK、肌红蛋白、白细胞介素 6↔
PATTERSON 等[62] (2010)	16 位健康女性	BFRT，LRT，MROT，MRT；25%1RM，50%1RM；屈动作，3 组 RTF，IR：1 min，第一次训练平均反复次数：34，13，9；最后 1 次训练平均反复次数：92，33，21， 110 mmHg，每周 3 次，为期 4 周：跖屈	1RM：不论有无加压，50%1RM > 25%1RM；MVC、等速力矩：MROT > BFRT > MRT > LRT
KARABULUT 等[45] (2010)	37 男性健康老年人	BFRT，HRT；BFRT(205 mmHg+20%1RM)、HRT(80%1RM)；每周 3 次，6 周 (上肢动作：滑轮下拉、肩上推举、二头肌弯举；下肢动作：腿部推蹬、腿部伸展)；BFRT(每种上肢动作 3 组 8 下；每种下肢动作 1 组 30 下，再 2 组 15 下)；IR：1 min；HRT(每种动作 3 组 8 下，IR：1 min)	滑轮下拉、二头肌弯举、肩上推举、1RM：BFRT>HRT；肌力改变百分比：组间 ↔；腿部推蹬、伸展 1RM：BFRT> HRT；腿部伸展肌力改变百分比：HRT>BFRT 腿部推蹬；肌力改变百分比：组间 ↔
YASUDA 等[42] (2011)	40 男性健康老年人	HRT，BFRT，CB-PT，CON；BFRT：30%1RM、100−160 mmHg；HRT：75%1RM；每周 3 次，为期 6 周：卧推：HRT：3 组 10 下，IR：2.0−3.0 min。BFRT：1 组 30 下，再 3 组 15 下，IR：30 s。CB-PT：每周三次的前两次执行，BFRT，后一次执行 HRT	1RM：除 CON，其他组 ↑；1RM 改变百分比：HRT，CB-PT > BFRT，CON；MVC：HRT，CB-PT↑，BFRT、CON↔；MVC 改变百分比：HRT、CB-PT> BFRT、CON；肱三头肌、胸大肌 CSA：除 CON，其他组 ↑；胸大肌、肱三头肌 CSA 改变百分比：HRT>BFRT，CB-PT，CON
PARK 等[54] (2015)	16 位健康男性	BFRT，LRT；160−220 mmHg，20%1RM；每日 2 次，1 周：双膝伸展，1 组 30 下，3 组 15 下，IR：30 s	CSA，1RM：BFRT > LRT；MVC，CK、白细胞介素 6、肌红蛋白 ↔
KIM 等[55] (2017)	9 位老人、8 位年轻人	老年 BFRT，年轻 BFRT，老年 HRT；前臂阻力训练，25%1RM 及 50%1RM，4 组，30 次 / 组；4 周后检测	3 组 MVC 皆 ↑，3 组前臂围 CSA 皆 ↑，其中老年 BFRT> 老年 HRT；老年组的血管密度 ↔，而年轻组 ↑。说明老年人可能需要更长的训练时间或更高的训练量才能唤起类似的血管适应
HILL 等[56] (2020)	30 位健康女青年	BFRT，LRT，CON；等速训练，75 个 [前臂屈伸速度 120 (°)/ s]；2 周及 4 周进行检测	BFRT 与 LRT 向心扭矩及等长扭矩皆显著于 CON，但 BFRT 在向心扭矩的增幅显著高于 LRT 组，但引起的等长肌力和肌肉大小增加相似。同的条件下，肌电图无差异
RODRIGUES 等[57] (2019)	25 位健康男青年	CBFRT 组 (20%1RM，180 mmHg，连续加压)、BFRT 组 (20%1RM，180 mmHg)、LRT(20%1RM，无加压)；4 次重复训练，每周 2 次，共 6 周	CBFRT，BFRT 及 LRT 在肱二头肌肌肉肥大 (MH)、动态肌力 (DMS)、等长肌力 (IMS)3 组间 ↔；CBFRT，BFRT 在局部肌肉耐力 (LME) 显著高于 LRT

表注：BFRT 为血流限制 + 低强度阻力训练组；MROT 为血流限制 + 中强度阻力训练组；LRT 为单纯低强度阻力组；OT 为单纯加压训练组；HRT 为单纯高强度阻力组；MRT 为单纯中强度阻力组；CB-PT 为血流限制 + 单纯高强度 + 低强度阻力训练；CON 为控制组；CK(肌酸激酶)；白细胞介素 6(白细胞介素 6)；CSA(肌肉横断面积)；MVC(最大自主收缩)；IR(组间休息)；RTF(反复至衰竭)；“↑”“↔”“↓”分别表示上升、不变及下降； 1 mmHg=0.133 kPa

表 3 | 血流限制结合低阻力训练的长期效果文献荟萃

研究者	对象	训练方式	研究结果
TAKARADA 等[53] (2002)	17 名男橄榄球员	BFRT，LRT；196 mmHg，50%1RM；2 次 / 周，8 周：双膝伸展，4 组 RTF(16 次)，IR：30 s	等长、等速肌力及肌耐力 (总工作量、最大力矩)：BFRT>LRT，CON；CSA：BFRT↑
TAKARADA 等[47] (2004)	18 名男运动员	OT，LRT，BFRT；218 mmHg，20%1RM；2 次 / 周，8 周；双膝伸展，5 组 RTF(17 次)，IR：1 min	CSA：BFRT↑10.3%，LRT、OT ↔；MVC、等速肌力 (30，60，180 度)：BFRT↑，LRT，OT↔；角速度：BFRT↑9.2%，LRT↑ 3.1%、OT ↑2.8%；GH：BFRT>LRT，OT
SUMIDE 等[61] (2009)	21 位普通健康男性	无压、50 mmHg、150 mmHg、250 mmHg；20%1RM；3 次 / 周，8 周；抬腿、髋关节内收、外展，各 1 组 (动作维持 5 s、休息 5 s)	CSA、等速肌力 (60 度) 皆未达显著；180 度：除无压组，其他组 ↑；肌肉总作工量：50，150 mmHg 组 ↑，250 mmHg 组 ↔
ABE 等[7] (2010)	19 位普通健康男性	加压、无压；160−210 mmHg 强度：VO_{2max}40%；3 次 / 周，8 周；脚踏车训练：加压组每次 15 min，无压组每次 40 min	加压组：大腿中央周长 ↑、CSA 大腿 ↑3.4%、股四头 ↑4.6%、肌肉量 (腿部 ↑3.8%、股四头 ↑5.1%；无压组：↔；膝伸展 MVC：加压组 ↑7.7%、无压组 ↑1.4%；膝屈曲 MVC↔
YASUDA 等[58] (2014)	19 位老年人	BFRT，CON；BFRT 实施 20%−30%1RM，120−270 mmHg；伸膝和压腿运动，2 d/ 周，12 周；IR：30 s	BFRT 组下肢肌 CSA 股四头肌 (↑8.0%)、内收肌 (↑6.5%) 和臀大肌 (↑4.4%)、腿伸和腿压 1-RM 力量 (↑26.1% 和 ↑33.4%)CON↔
YASUDA 等[59] (2015)	17 位老年人	BFRT，CON；两组皆用弹力带进行低负荷手臂卷曲和三头肌向下运动，4 组，每次重复 75 次，2 d/ 周，12 周，BFRT 附加加压 (120−270 mmhg)	BFRT 组 CSA 肘屈肌 (↑17.6%) 和伸肌 (↑17.4%)，屈肘和伸肘 MVC 分别增 7.8% 和 16.1%；而 CON↔
YASUDA 等[60] (2016)	30 位女性老年人	BFRT，HRT，CON；160−240 mmHg，20%1RM；下蹲和伸膝运动，2 d/ 周，共 12 周；IR：30 s	BFRT 组股四头肌 CSA(↑6.9%) 和膝关节伸直 MVC(↑13.7%)，但 HRI 组和 CON↔
LETIERI 等[63] (2018)	56 位女性老年人	HROT，BFRT，HRI，LRI，CON；16 周阻力训练，180 mmHg 及 100 mmHg，HROT 及 BFRT 运动处方为 3，4 组，15 次重复 (20%−30% 的 1RM)，TR：30 s，动作有下蹲、压腿、伸膝和屈腿；HRI：70%−80% 的 1RM，3，4 组 6−8 次重复，TR：60 s；CON 只参加评估	HROT，BFRT，HRI 左右膝伸等速肌力矩 (右 ↑27.2%、↑15.75% 和 ↑13.81%)、(左 25.2%↑、↑18.95% 和 ↑30.39%)；左右膝屈曲，(右 36.7%↑、22.79%↑ 和 34.97%↑)、(左 35.8%↑、24.93%↑ 和 26.14%↑)

表注：BFRT 为血流限制 + 低强度阻力训练组；MROT 为血流限制 + 中强度阻力训练组；HROT 为血流限制 + 高强度阻力训练组；OT 为单纯血流限制组；LRT 为单纯低强度阻力训练组；MRT 为单纯中强度阻力组；HRT= 单纯高强度阻力训练组；MVC 为最大自主收缩；CSA 为肌肉横断面积；RM 为最大反复次数；IR 为组间休息；RTF 为反复至衰竭；“↑”“–”“↓”分别表示上升、不变及下降；1 mmHg=0.133 kPa

3 讨论 Discussion

3.1 以往研究的问题与不足 老化引起肌肉量减少和心肺功能下降已是不可避免的趋势，高强度抗阻训练及有氧训练皆被推荐使用作为抑制 (或延缓) 肌肉流失的方法。然而，高强度训练对某些特定人群 (例如慢性病患、年长者、受伤需康复者等易造成运动伤害)，而血流限制训练或有氧训练被证明是另一种较佳的替代选择。然而先前在该领域的荟萃结果并不全面，有些地方自相矛盾。在训练特性方面应考虑到其与传统训练的差异，如低强度训练即能达到肌肉肥大效果、肌纤维损伤较小训练后复原较快、短时间即可达到运动效能，但其较无法产生神经适应，于相对力量增加的效果有限，因此训练时可与传统训练相互搭配使用才能相得益彰；在训练安全方面，训练前建议采用风险评估的筛检工具将可能的风险排除在外；训练时使用加压带加压于上肢和下肢近端，若加压压力不当或时间过久可能对血管、血液、神经系统及肌肉组织等造成伤害，其中影响加压部位动脉血液流入和静脉血液流出的因素如训练时的姿势、加压带宽度和肢体围度都应考虑；在进行血流限制加压训练时，应充分考虑运动安全的重要性，才能达到有效的运动效能。

3.2 文章献综述的主要特色及价值 该综述对近 10 年有关血流限制训练的经典实验结果进行了全面评述，特别地概括了瞬时、短期还是中长期血流限制训练所带来的正向效益与不足，总结出血流限制训练阻力训练采用的负荷强度为 20%–30%1RM，这与美国运动医学会的建议值 (70%1RM 以上) 明显低，肌纤维受伤概率自然低，且复原更快。因为肌纤维受伤与否可通过血液中肌酸肌酶进行评定。无论瞬时、短时还是中长期，血流限制训练模式对肌肉的损害很小甚至没有，因为肌肉功能没有长期下降和长时间的肌肉肿胀 [24，28]，肌肉酸痛程度类似于低负荷运动酸痛等级，而且血液中的肌肉损伤生物标志物没有升高 [35]。加压阻血训练会造成局部出现明显的肌肉肿胀现象，即使移除了加压带后，肿胀的肌肉厚度的变化也得以保持一段时间，这可能是训练后肌肉细胞内蓄积着大量液体而使肌肉厚度明显变大的原因，肌肉厚度变大是肌肉细胞肿胀的指标。细胞肿胀也被认为是肌肉肥大信号的来源之一 [37，44]。

从血流限制训练对提升肌肉训练效益看，血流限制训练结合低强度的阻力训练能征招第Ⅱ型快缩肌纤维，这可通过肌电图的积分肌电值来判断。通常情况下，低强度阻力训练结合加压及传统高强度阻力训练所呈现积分肌电值基本趋于一致 [33，36]，可以推测血流限制训练能征招Ⅱ型肌纤维，而Ⅱ型快缩肌纤维可能是血流限制训练诱发肌肉肥大关键性的原因之一 [44-45]。从运动训练相关理论看，有氧运动会增进有氧适能不会导致肌肉肥大现象，但血流限制训练属于低强度有氧训练范畴，却能促进肌肉肥大，这种现象让运动训练界的学者倍感困惑，其深层原因需要进一步厘清。从短时间血流限制训练效果看，同样强度的阻力训练，血流限制训练较传统训练时更易达到疲劳与力竭 [37，39]。此外，血流限制训练对健康成人的肌力增长效果并不一致，这可能是由于训练强度、训练量及训练对象体能水平的差异引起的。就血流限制训练对神经适应的效果而言，研究发现高强度抗阻训练后有肌肉肥大现象，除了最大肌力增加外，相对肌力也会增加；而血流限制训练后有肌肉肥大现象，最大肌力增加，但相对肌力却没有增加 [47-48]。可见，血流限制训练很难产生神经适应，其肌力增加仅是肌肉肥大造成的，要获得神经适应的效果，血流限制训练中所采用的抗阻强度不能太低。

3.3 该综述的局限性 血流限制训练能产生多项正面效益，但血流限制情况下进行训练不免让人心生担忧进而怀疑其安全性。例如，针对不同性别、不同年龄、不同运动形式和不同强度的血流限制训练训练，可能产生如下一些不良反应：皮下出血、麻木、脑性贫血、冷感、静脉血栓、肺栓塞、横纹肌溶解、缺血性心脏病恶化 [26，30，41-43]。这些结果的讨论无法在文章献中呈现，未来问题的评估应考虑血流限制训练时，由于加压压力过大，可能对血栓形成、肌肉损伤、运动压力反射和神经传导方面等所造成的潜在风险。

进行血流限制训练训练时，加压带带宽、加压部位、静脉血流等对训练效益及安全性亦非常关键。加压带宽窄显然影响血流量，使用不同宽度的加压带 (例如：11.5 cm 和 5.0 cm)，受试者采用站姿将加压带系于下肢近端后充气加压，压力从 50 mmHg 开始加压，使用超音波仪器量测左膝腘动脉，会发现宽带约 239.4 mmHg 可完全阻断血流，而窄带充气加压超过 500 mmHg 仍无法阻断动脉血流 [54]。因此训练时系上宽的加压带所使用压力应比窄的加压带压力要小。训练时的姿势也会影响加压部位动脉血流，使用宽的加压带和窄的加压带加压于大腿近端位置，结果发现坐姿比仰姿血流限制训练加压力道需加大 17%–20% 才能完全阻断加压部位动脉血流 [51]。因此，未来对血流限制训练效果评估还应考虑加压带宽度以及肢体围度问题，同时应结合个人生活方式、个人病史和家族病史，只有这样才能对血流限制训练这一新兴的运动训练方式有更全面的评述。

3.4 结论 ①无论是短期还是中长期训练，血流限制训练能显著刺激体内合成性激素与代谢压力，加快肌肉蛋白合成，有助于提高最大收缩力、1RM 及肌肉横断面积，且能达到与单纯高强度阻力训练相似的效果。②血流限制所采用的加压压力一般控制在 50–250 mmHg，其所搭配的抗阻强度在 20%–50%1RM，针对不同人群，加压压力及抗阻强度只需适当调整即可采用，并能获得稳定收益，且可通过专项训练或脚踏车等方式达成目标。③血流限制训练所诱发的生理效应的可能机制是代谢压力反应，包括缺血状况下的Ⅱ型肌纤维招募、生长素分泌增加、mTOR 路径活化、泛素蛋白水解路径抑制、蛋白质合成与抑制调节、细胞肿胀等复杂过程。

3.5 未来的建议 ①血流限制训练应注意加压压力不当或时间过久可能对血管、血液、神经系统及肌肉组织等造成伤害；训练时血流动力学会产生急剧变化，对于运动过程中需要控制血压的人，应谨慎使用血流限制训练；由于血流限制训练受众多因素影响，未来研究应考虑影响阻止动脉血流的因素，如训练姿势、加压带宽度和肢体围度，从而确保训练风险最小化及训练效益最大化。②针对于伤后康复者或老年群体群，“血流限制 + 低强度抗阻”训练或许是促进肌力增加与提高肌肉量的较佳选择方式。然而，至今针对高龄者与伤后复健者加压训练的研究仍不多见，且大多处于个案研究阶段，因此，在使用该方法时，压力及阻力强度的选择仍需要未来更多研究数据来提供支撑。③血流限制训练能达到肌肉肥大效果，肌纤维损伤较小训练后复原较快，短时间即可达到运动效能，但其无法产生神经适应，于相对力量增加的效果不明显，故未来研究应更多考虑将加压阻血与传统训练搭配使用，从而产生最佳运动效能。

致谢：感谢乐山师范学院图书馆为该综述提供良好的资料收集平台，感谢教研室部分成员帮助整理了相关文献，并为论文写作提供一些有益的思路。
作者贡献：文章设计者为刘译文。由余尾负责收集与查阅相关文献并文章撰写。宋刚对论文进行审校。
经费支持：该文章接受了“国家自然科学基金 (31360254)”的资助。但是所有作者声明，经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。
利益冲突：所有作者共同认可文章内容无相关利益冲突。
写作指南：该研究遵循《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA 声明)。
文章查重：文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。
文章外审：文章经小同行外审专家双盲外审，同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。
文章版权：文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。
开放获取声明：这是一篇开放获取文章，根据《知识共享许可协议》“署名 – 非商业性使用 – 相同方式共享 4.0”条款，在合理引用的情况下，允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展，同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献，并为之建立索引，用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

[1] ROTA DS, THIAGO M, LIBARDI CA, et al. Concurrent training with blood flow restriction does not decrease inflammatory markers. Int J Sports Med. 2018;39(1):29-36.
[2] PATON CD, ADDIS SM, TAYLOR LA. The effects of muscle blood flow restriction during running training on measures of aerobic capacity and run time to exhaustion. Eur J Appl Physiol. 2017;117(12):2579-2585.
[3] KRAEMER WJ, RATAMESS NA. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. Med Sci Sports Exerc. 2004;36(4):674-688.
[4] MANIMMANAKOM A, HAMLIN MJ, ROBB JJ, et al. Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes. J Sci Med Sport. 2013;16(4):337-342.
[5] FROST DM, CRONIN J, NEWTON RU. A biomechanical evaluation of resistance fundamental concepts for training and sports performance. Sports Med. 2010;40(4):303-326.
[6] ABE T, KEARNS CF, SATO Y. Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training. J Appl Physiol. 2006;100(5):1460-1466.
[7] ABE T, SAKAMAKI M, FUJITA S, et al. Effects of low-intensity walk training with restricted leg blood flow on muscle strength and aerobic capacity in older adults. J Geriatr Phys Ther. 2010;33(1):34-40.

[8] CLARKSON MJ, CONWAY L, WARMINGTON SA. Blood flow restriction walking and physical function in older adults: a randomized control trial.Journal of Science and Medicine in Sport, 2017;20(12):1041-1046.
[9] TOTH MJ, CALLAHAN DM, MILLER MS, et al. Skeletal muscle fiber size and fiber type distribution in human cancer: effects of weight loss and relationship to physical function. Clin Nutr. 201635(6):1359-1365.
[10] LU ZH, WOO J, KWOK T. The Effect of Physical Activity and Cardiorespiratory Fitness on All-Cause Mortality in Hong Kong Chinese Older Adults. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2018;73(8):1132-1137.
[11] AFSHARIPOUR B, MANZUR N, DUCHCHERER J, et al. Estimation of self-sustained activity produced by persistent inward currents using firing rate profiles of multiple motor units in humans. J Neurophysiol. 2020;124(1):63-85.
[12] GOULD JR, CLELAND BT, MANI D, et al. Motor unit activity in biceps brachii of left-handed humans during sustained contractions with two load types. J Neurophysiol. 2016;116(3):1358-1365.
[13] BERETTA-PICCOLI M, CESCON C, BARBERO M, et al. Reliability of surface electromyography in estimating muscle fiber conduction velocity: a systematic review. J Electromyogr Kinesiol. 2019;48:53-68.
[14] DOWNS ME, HACKNEY KJ, MARTIN D, et al. Acute Vascular and Cardiovascular Responses to Blood Flow-Restricted Exercise. Med Sci Sports Exerc. 2014;46(8): 1489-1497.
[15] ROSCHEL H, UGRINOWISTCH C, SANTOS AR, et al. Effect of eccentric action velocity on expression of genes related to myostatin signaling pathway in human skeletal muscle. Biol Sport. 2018;35(2):111-119.
[16] LAURENTINO G, UGRINOWITSCH C, ROSCHEL H, et al. Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin gene expression. Med Sci Sports Exerc, 2012,44(3):406-412.
[17] GUO Y, WANG M, GE J, et al. Bioactive biodegradable polycitrate nanoclusters enhances the myoblast differentiation and in vivo skeletal muscle regeneration via p38 MAPK signaling pathway. Bioact Mater. 2020;5(3):486-495.
[18] LOENNEKE JP, WILSON GJ, WILSON JM. A mechanistic approach to blood flow occlusion. Int J Sports Med. 2010;31(1):1-4.
[19] MCFARLANE C, PLUMMER E, THOMAS M, et al. Myostatin induces cachexia by activating the ubiquitin proteolytic system through an NF-kappaB-independent, FoxO1-dependent mechanism. J Cell Physiol. 2006;209(2):501-514.
[20] KAYA M, KAYA D, IDIMAN E, et al. A Novel Biomarker in diabetic macular edema with serous retinal detachment: serum chitinase-3-like protein 1. Ophthalmologic. 2019;241(2):90-97.
[21] CARVALHO G, CARLA V, MANTOVANI CS, et al. CREB, NF-Y and MEIS1 conserved binding sites are essential to balance Myostatin promoter/enhancer activity during early myogenesis. Molecular Biology Reports. 2017;44(5):419-427.
[22] JUANG J, YIN H, ZHANG C, et al. Effects of E. Coli Infection on the Expressions of TGF-β/Smads Signaling Pathway in Broiler Intestine. Poult Sci. 2020;22(1): eRBCA-2019-1101.
[23] ZHANG ZP, JIANG HX, LI X, et al. MiR-92a regulates brown adipocytes differentiation, mitochondrial oxidative respiration, and heat generation by targeting SMAD7. J Cell Biochem. 2020;121(8-9):3825-3836.
[24] FIGUEROA A, VICIL F. Post-exercise aortic hemodynamic responses to low-intensity resistance exercise with and without vascular occlusion. Scand J Med Sci Sports. 2011;21(3):431-436.
[25] FUJITA S, ABE T, DRUMMOND MJ, et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. J Appl Physiol. 2007;103(3):903-910.
[26] REEVES GV, KRAEMER R, HOLLANDER DB, et al. Comparison of hormone responses following light resistance exercise with partial vascular occlusion and moderately difficult resistance exercise with occlusion. J Appl Physiol. 2006; 101(6):1616-1622.
[27] WILK M, KRZYSZTOFIK M, GEPFERT M, et al. Technical and Training Related Aspects of Resistance Training Using Blood Flow Restriction in Competitive Sport-A Review. J Hum Kinet. 2018;65(1):249-260.
[28] CHRISTIANSEN D, EIBYE KH, HOSTRUP M, et al. Blood flow-restricted training enhances thigh glucose uptake during exercise and muscle antioxidant function in humans. Metabolism. 2019;98:1-15.
[29] YANAGISAWA O, SANOMURA M. Effects of low-load resistance exercise with blood flow restriction on high-energy phosphate metabolism and oxygenation level in skeletal muscle. Int Med Appl Sci. 2017;9(2):67-75.
[30] HACKNEY KJ, DOWNS ME, PLOUTZ SL. Blood flow restricted exercise compared to high load resistance exercise during unloading. Aerosp Med Hum Perform. 2016;87(8):688-696.
[31] LINERO C, CHOI SJ. Effect of blood flow restriction during low-intensity resistance training on bone markers and physical functions in postmenopausal women. J Exerc Sci Fit. 2021;19(1):57-65.
[32] AAGAARD P, JACOBSEN M, JENSEN KY, et al. Effects of Chronic Blood-Flow Restriction Exercise on Skeletal Muscle Size and Myogenic Satellite Cell Expression. Med Sci Sports Exerc. 2016;48(5):1032-1033.
[33] SOUZA EO, TRICOLI V, BUENO JC, et al. The acute effects of strength, endurance and concurrent exercises on the Akt/mTOR/p70S6K1 and AMPK signaling pathway responses in rat skeletal muscle. Braz J Med Biol Res. 2013;46(4):343-347.
[34] JASTRZEBSKI K, HANNAN KM, TCHOUBRIEVA EB, et al. Coordinate regulation of ribosome biogenesis and function by the ribosomal protein S6 kinase, a key mediator of mTOR function. Growth Factors. 2007;25(4):209-226.
[35] FRY CS, GLYNN EL, DRUMMOND MJ, et al. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men. J Appl Physiol. 2010;108(5):1199-1209.
[36] MAMMUCARI C, MILAN G, ROMANCELLO V, et al. FoxO3 controls autophagy in skeletal muscle in vivo. Cell Metab. 2007;6(6):458-471.
[37] MANINI TM, VINCENT KR, LEEUWENBURGH CL, et al. Myogenic and proteolytic mRNA expression following blood flow restricted exercise. Acta Physiologica. 2011;201(2):255-263.
[38] O'NEILLI BT, BHARDWAJ G, PENNIMAN CM, et al. FoxO Transcription Factors Are Critical Regulators of Diabetes-Related Muscle Atrophy. Diabetes. 2019;68(3):556-570.
[39] LOUIS E, RAUE U, YANG Y, et al. Time course of proteolytic, cytokine, and myostatin gene expression after acute exercise in human skeletal muscle. J Appl Physiol, 2007;103(5):1744-1751.
[40] ISABEL MA, BELEN GSA, PRIEGO T, et al. Formoterol treatment prevents the effects of endotoxin on muscle TNF/NF-kappa B, Akt/mTOR, and proteolytic pathways in a rat model. Role of IGF-I and miRNA 29b. Am J Physiol Endocrinol Metab. 2018;315(4):E705-E714.
[41] LIU, XY, YU RH, SUN LJ, et al. The nuclear phosphatase SCP4 regulates FoxO transcription factors during muscle wasting in chronic kidney disease. Kidney Int. 2017;92(2):336-348.
[42] YASUDA T, OGASAWARA, R, SAKAMAKI, M, et al. Combined effects of low-intensity blood flow restriction training and high-intensity resistance training on muscle strength and size. Eur J Appl Physiol. 2011;111(10):2525-2533.
[43] YANG QM, LI Y, ZHANG XL, et al. Zac1/GPR39 phosphorylating CaMK-II contributes to the distinct roles of Pax3 and Pax7 in myogenic progression. Biochim Biophys Acta Mol Basis Dis. 2018;1864(2):407-419.
[44] NIELSEN JL, AAGAARD P, BECH RD, et al. Proliferation of myogenic stem cells in human skeletal muscle in response to low-load resistance training with blood flow restriction. J Physiol. 2012;590(17):4351-4361.
[45] KARABULUT M, ABE T, SATO Y, et al. The effects of low-intensity resistance training with vascular restriction on leg muscle strength in older men. Eur J Appl Physiol. 2010;108(1):147-155.
[46] GRGIC J, HOMOLAK J, MIKULIC P, et al. Inducing hypertrophic effects of type I skeletal muscle fibers: a hypothetical role of time under load in resistance training aimed at muscular hypertrophy. Med Hypotheses. 2018;112:40-42.
[47] TAKARADA Y, TSURUTA T, ISHII N. Cooperative effects of exercise and occlusive stimuli on muscular function in low-intensity resistance exercise with moderate vascular occlusion. Japan J Physiol. 2004;4(6): 585-592.
[48] 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. Eur J Appl Physiol. 2005;95(1):65-73.
[49] SUGA T, OKITA K, MORITA N, et al. Intramuscular metabolism during low intensity resistance exercise with blood flow restriction .J Appl Physiol. 2009;106(4): 1119-1124.
[50] LIXANDRAO ME, ROSCHEL H, UGRINOWITSCH C, et al. Blood-flow restriction resistance exercise promotes lower pain and ratings of perceived exertion compared with either high- or low-intensity resistance exercise performed to muscular failure. J Sport Rhabil. 2019;28(7):706-710.
[51] SUGA T, OKITA K, TAKADA S, et al. Effect of multiple set on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. Eur J Appl Physiol. 2012;112(11):3915-3920.
[52] ILETT MJ, RANTALAINEN L, KESKE MA, et al. The effects of restriction pressures on the acute responses to blood flow restriction exercise. Front Physiol. 2019; 10:1018-1024.
[53] TAKARADA Y, SATO Y, ISHII N. Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes. Eur J Appl Physiol. 2002;86(4):308-314.
[54] PARK SY, KWAK YS, HARVESON A, et al. Low intensity resistance exercise training with blood flow restriction: insight into cardiovascular function, and skeletal muscle hypertrophy in humans. Korean J Physiol Pharmacol. 2015;19(3):191-196.
[55] KIM J, LANG JA, PILANIA N, et al. Effects of blood flow restricted exercise training on muscular strength and blood flow in older adults. Exp Erontol. 2017;99:127-132.
[56] HILL EC, HOUSH TJ, KELLER JL, et al. Low-load blood flow restriction elicits greater concentric strength than non-blood flow restriction resistance training but similar isometric strength and muscle size. Eur J Appl Physiol. 2020;120(2):425-441.
[57] RODRIGUES NG, GOMES DS, FREITAS L, et al. Effects of strength training with continuous or intermittent blood flow restriction on the hypertrophy, muscular strength and endurance of men. Acta Scientiarum-Health Sci. 2019;41:e42273.
[58] YASUDA T, FUKUMURA K, FUKUDA T, et al. Muscle size and arterial stiffness after blood flow-restricted low-intensity resistance training in older adults. Scand J Med Sci Sports. 2014;24(5):799-806.
[59] YASUDA T, FUKUMURA K, UCHIDA Y, et al. Effects of low-load, elastic band resistance training combined with blood flow restriction on muscle size and arterial stiffness in older adults. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2015;70(8):950-958.
[60] YASUDA T, FUKUMURA K, TOMARU T, et al. Thigh muscle size and vascular function after blood flow-restricted elastic band training in older women. Oncotarget. 2016;7(23):33595-33607.
[61] SUMIDE T, SAKURABA K, SAWAKI K, et al. Effect of resistance exercise training combined with relatively low vascular occlusion. J Sci Med Sport. 2009;12(1):107-112.
[62] PATTERSON SD, FERGUSON RA. Increase in calf post-occlusive blood flow and strength following short-term resistance exercise training with blood flow restriction in young women. Eur J Appl Physiol. 2010;108(5):1025-1033.
[63] LETIERI RV, TEIXEIRA AM, FURTADO GE, et al. Effect of 16 weeks of resistance exercise and detraining comparing two methods of blood flow restriction in muscle strength of healthy older women: a randomized controlled trial. Exp Gerontol. 2018;114:78-86.

（责任编辑：WJ，ZN，SX）