

关于血流限制练习加压方式与加压值的研究综述

郑占飞

北京体育大学体能训练学院, 北京 100084

[摘要]目的: 运用 Meta 分析方法综合定量评价血流限制练习不同加压方案的有效性, 旨在为临床医学与竞技体育领域进行加压训练提供理论依据。方法: 建立纳入和排除标准并检索中国知网、万方数据库、Web of Science、PubMed、Medline、Sports Discus、EBSCO 等各大数据库, 运用 Revman 5.3 软件对所有纳入文献的结局指标进行统计分析。结果: 从 2672 篇相关文章中通过 5 轮条件排除后共纳入研究文献 138 篇。研究共涉及 1673 名受试者, 大多为男性。Meta 分析结果显示, 血流限制练习研究主要分布于随机对照试验 (89.6%), 每组 BFR 练习平均人数 12.1 ± 5.6 (临床 9.8 ± 5.3 , 非临床 12.6 ± 4.9), 平均年龄为 33.7 ± 7.4 (临床: 48.6 ± 14.3 , 非临床: 31.6 ± 15.1)。通过分析总结最终确定了五种不同的加压方式: 固定压力值 (54.3%)、四肢闭塞百分比值 (26.8%)、肱动脉收缩压值 (12.3%)、主观感觉 (3.6%) 和其他 (2.9%)。结论: 血流限制练习常见加压方式是采用固定值, 但训练效果、安全性与有效性较差。随着研究不断深入, 现阶段 BFRT 更倾向于采用 LOP 百分比进行加压干预。**[关键词]**BFRT; 加压训练; 加压方式

DOI: 10.33142/fme.v3i1.5477

中图分类号: G808.12

文献标识码: A

Review on the Study of Blood Flow Restriction Exercise Compression Mode and Compression Value

ZHENG Zhanfei

School of Physical Training of Beijing Sport University, Beijing, 100084, China

Abstract: Objective: to comprehensively and quantitatively evaluate the effectiveness of different compression schemes of blood flow restriction exercise by meta-analysis, in order to provide a theoretical basis for compression training in the field of clinical medicine and competitive sports. Methods: the inclusion and exclusion criteria were established, and the major databases such as China CNKI, Wanfang database, Web of Science, PubMed, Medline, Sports Discus, EBSCO were searched. The outcome indexes of all the included literatures were statistically analyzed by Revman 5.3 software. Results: from 2672 related articles, 138 articles were included after 5 rounds of conditional exclusion. The study involved 1673 subjects, mostly men. The results of Meta-analysis showed that the studies of blood flow restriction exercises were mainly distributed in randomized controlled trials (89.6%), the average number of BFR exercises in each group was 12.1 ± 5.6 (clinical 9.8 ± 5.3 , non clinical 12.6 ± 4.9), and the average age was 33.7 ± 7.4 (clinical: 48.6 ± 14.3 , non clinical: 31.6 ± 15.1). Through analysis and summary, five different compression methods were finally determined: fixed pressure value (54.3%), limb occlusion percentage value (26.8%), brachial artery systolic pressure value (12.3%), subjective feeling (3.6%) and others (2.9%). Conclusion: the common compression method of blood flow restriction exercise is to use fixed value, but the training effect, safety and effectiveness are poor. With the deepening of research, BFRT is more inclined to use LOP percentage for compression intervention at this stage.

Keywords: BFRT; pressure training; pressurization mode

引言

血流限制训练 (BFRT) 又称加压训练 (KAATSU 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止血带) 对肢体进行外部加压, 使血液聚集在远端肌肉组织的毛细血管中, 从而导致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^[1]。近年来, 在临床医学领域与专业运动员群体, 血流限制低强度抗阻练习在改善肌肉力量, 促进肌纤维肥大以及提高有氧能力方面得到广泛运用。

研究发现, 在促进大学生^[8]、老年人^[9,10]、骨骼肌疾病患者^[11]和运动员^[11,12]肌肉的有氧能力^[4]、力量^[5,6]和横截

面积^[3,7]方面, BFRT 运动强度通常低于 $45\%VO_{2max}$ ^[2]或在 1RM 的 20%–50% 区间^[3]。因此, BFRT 是一种在低强度、低风险下有着明显收益的练习方式。

虽然关于 BFRT 的作用机制尚不清楚, 但 Michael J. Ilett 等人认为, 加压装置导致的部分动脉闭塞会加强肌组织的缺氧环境^[13], 引起局部酸性物质更多堆积, 刺激生长激素的释放^[14–16], 最终改变肌纤维募集的模式^[15]增加 S6K1 磷酸化。研究表明, 这些机制诱导出的训练效应甚至超过传统高强度练习的水平^[16–18], 因此受到训练和科研领域的广泛关注。

现有 BFR 干预措施的训练变量存在着较大差异^[3,4],

采用最佳练习变量（负荷强度、量、捆绑压、充气压等）与 BFR 结合，能够得到理想的研究结果^[19]。研究表明，运动强度低于 VO_{2max} 的 50% 最适合有氧练习，1RM 的 20%–40% 负荷最适合力量抗阻练习^[19]。Patterson 等人还认为，血流限制下进行有氧运动的持续时间应该在 5–20 分钟，抗阻力量练习四组重复次数应在 75 次左右。Loenneke 等人的一项 Meta 分析也表示每周 2–3 天的 BFR 练习对提高肌肉力量，促进肌肥大积极作用。

此外，加压装置的压力（捆绑压、充气压）、宽度和材料也是 BFR 练习影响肢体动脉闭塞程度的因素^[20]。BFR 练习的加压方式分为两大类：（1）所有受试对象采用同一加压值（2）基于个体差异性采用不同加压值：肢体闭塞压（LOP）^[21]、肱动脉收缩压（SBP）^[22]、大腿维度^[23]或主观感觉^[24]。加压带宽度影响闭塞压，其中加压带越窄动脉闭塞所需的压力越小，而较宽的加压带需要的压力越大^[25]。随着 BFR 练习不断推广和应用，众多教练员与运动员在练习中对加压值与安全、有效性之间的关系缺少客观、全面的认识，这不仅会严重制约 BFRT 在竞技体育和医疗康复领域有效发挥，还可能导致该方法被片面、盲目甚至错误地使用。因此，本研究旨在对血流限制练习的加压方式与加压值进行整合分析十分有必要。

1 研究方法

1.1 文献检索

文献的检索由两名人员进行独立双盲式从中国知网、万方数据库、Web of Science、PubMed、Medline、Sports Discus、EBSCO 等数据库进行检索，检索时间为 1950 年 1 月–2020 年 1 月，最后一次检索日期为 2020 年 1 月 28 日。中文检索词以“加压训练”“血流限制训练”“KAATSU”等为主题词进行组合式混合检索；外文检索词以：“KAATSU training”

“vascular occlusion”“blood flow occlusion”“blood flow restrict training”等为主题词进行组合检索，并对文献的参考文献进行手工检索，以确定本文的研究方向。

1.2 纳入和排除标准

1.2.1 纳入标准

（1）文献类型：随机对照组实验（RCT）、配对对照实验（MCT）、自身对照实验；（2）实验对象均为健康成人；（3）实验干预包括有氧或力量抗阻训练；（4）实验对象不受年龄、性别、体质或健康状况限制。

1.2.2 排除标准

（1）不符合纳入标准要求的文献；（2）综述摘要类文献；（3）缺乏研究支撑、结果数据重复文献；（4）非汉

语或英语文献；（5）动物实验；（6）研究对象为老人；（7）实验干预为单次急性干预；（8）加压位置不在肢体近端点实验。

1.3 研究选择和数据提取

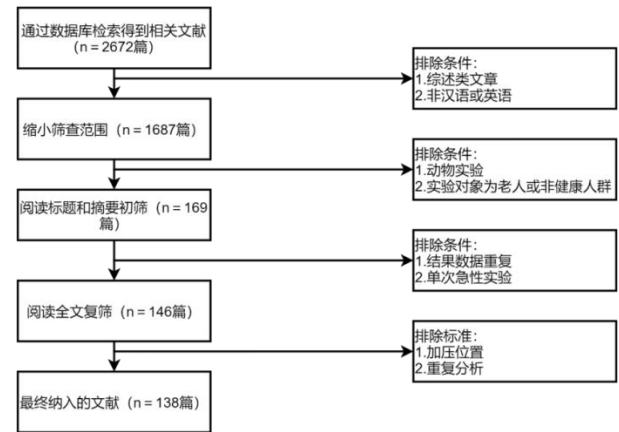


图 1 文献筛选流程图

两名检索员采用独立双盲方式对纳入文件进行相关指标的提取，内容包括文献作者、发表年限、实验对象、样本量、年龄、性别、干预周期、干预方式、结局指标、充气压、加压带宽度等。对符合纳入标准但无法确定相关指标的文献，进行摘要或全文阅读。通过筛选的参考文献纳入 Covidence 系统软件（Veritas Health Innovation，澳大利亚墨尔本）

2 研究结果

2.1 纳入文献的研究特征

表 1 总结了纳入研究的基本特征。研究设计包括随机对照试验（91%）、案例研究（5%）、队列研究（2%）和交叉研究（2%）。大约（80%）的研究针对男性受试者，20%针对包括女性，在纳入的 138 项研究中，共 1673 名受试者参与 BFRT，每组 BFR 练习平均人数 12.1 ± 5.6 （临床 9.8 ± 5.3 ，非临床 12.6 ± 4.9 ），平均年龄为 33.7 ± 7.4 （临床： 48.6 ± 14.3 ，非临床： 31.6 ± 15.1 ）。

2.2 不同加压方式与加压范围之间的关系

血流限制练习选择的加压值最常用方式是采用非个体化的固定压（占研究的 54.3%）；26.8%的研究根据受试者个人 LOP 的百分比确定加压值，12.3%的研究根据个人肱动脉收缩压确定加压值，6.6%根据主观感觉松紧度来判断加压值的大小，2.9%使用其他方法或没有报告他们干预的闭塞压力。对于每种方式的压力范围研究如图 1 所示。160–169mmHg 和 200–209mmHg 的范围是最常用的固定压力值范围（图 2（a））；采用 LOP 进行 BFRT 的最常用值是 80% 的肢体闭塞压（图 2（b））。在使用肱动脉收缩压的研究中，

130-139%区间的压力是常用压力范围（图 2 (c)），而在主观感觉松紧度方式中 7 分是最普遍的压力感受（图 2 (d)）

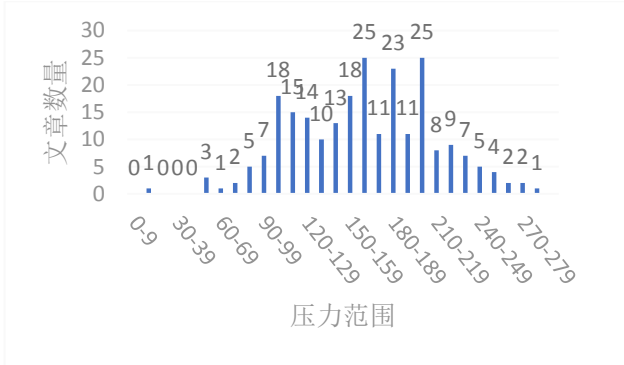


图 2 (a) 固定加压方式的压力范围与发表文章数量关系图

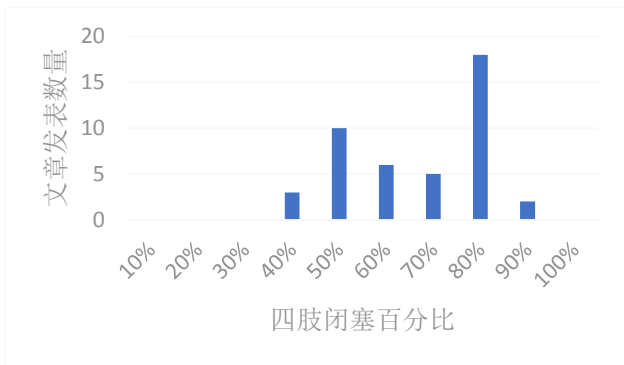


图 2 (b) 闭塞压 (LOP) 与发表文章关系图

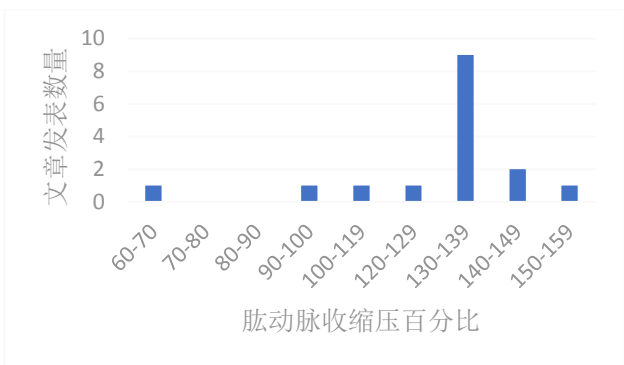


图 2 (c) 肱动脉收缩压 (SBP) 与文章发表数量关系图

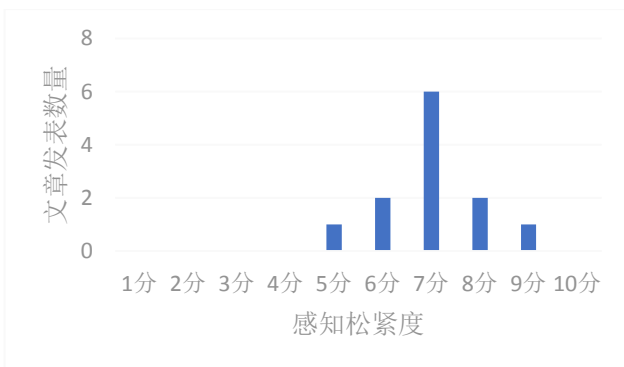


图 2 (d) 主观感觉与文章发表数量关系图

表 1 纳入研究的基本特征

加压方式	受试者人数	性别	年龄	样本量	训练类型		训练强度		其他	其他	其他	其他
					力量训练	有氧	力量与有氧	其他				
固定压	NC (67)	M (55)	40	27	40	62	3	2	0	49	18	54
	C (8)	F (12)	3	5	4	6	2	0	0	3	5	4
LOP	NC (29)	M (23)	17	12	7	22	6	1	0	9	20	18
	C (8)	M (5)	0	8	3	5	4	2	1	3	5	3
SBP	NC (15)	M (10)	8	7	5	10	12	0	2	1	13	2
	C (2)	F (5)	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0
主观感觉	NC (5)	M (5)	3	2	5	0	4	1	0	0	4	1
	C (0)	F (0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
其他	NC (4)	M (4)	2	2	3	1	2	1	0	1	3	1
	C (0)	F (0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
总计	NC (120)	M (97)	70	50	47	73	102	11	5	2	78	42
	C (18)	F (23)	4	14	8	10	11	4	1	1	7	11
	F (5)	M (13)	4	8	10	11	4	1	1	1	7	0
	T (138)	M (100)	74	64	55	80	113	15	6	3	85	53
	F (28)	M (28)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

注：LOP=四肢闭塞百分比；SBP=肱动脉收缩压值；NC=非临床实践；C=临床实践；M=男性；F=女性；RM=最大重复次数；%0=最大重复量

2.3 文章发表年份与加压方式之间的关系

图 3 总结了 1993-2020 年不同加压方式与论文发表年份之间的关系。从 1993 年到 2015 年期间，固定加压是最常用的方式 (65.8%)。在此期间只有 18.4% 的文章采用了 LOP 的百分比进行加压干预。2016-2020 年期间，采用固定压进行干预的论文发表数量减少到 39.8%，采用 LOP 百分比进行干预的数量增加到 42.6%。2019 年采用 LOP 百分比进行 BFRT 是最常用的加压干预方式。

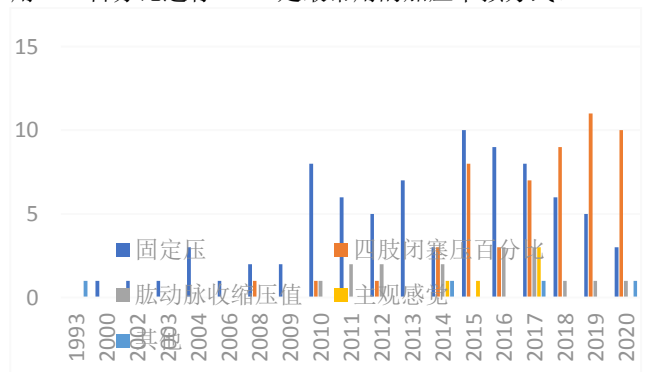


图 3 不同加压方式的论文发表数量与发表年份的关系

3 讨论

本研究首次综合整合了血流限制技术在运动中的运

用, 研究表明, 将 BFR 应用于训练时, 采用非个性化的固定压是最常见的加压方式。本文中关于 BFRT 加压方式 138 篇研究中 54.3% 采用了这种方式, 压力在 10mmHg-270mmHg 区间。BFR 训练的目的在于减少静脉回流^[1, 19]促进局部代谢, 因此研究对象的大腿围度、肱动脉收缩压和 LOP 同样也会影响闭塞压^[20, 26, 27], 采用固定压进行 BFRT 的缺点主要是忽略了受试对象的个体差异, 对于某些受试者而言, 固定压会使血管完全闭塞, 而对于另一些受试者只会闭塞部分血管。研究表明, 在 80% 闭塞压力下进行 20%1RM 单侧肱二头弯举练习后, 手臂动脉闭塞压增加了 62mmHg^[26]。这种动脉闭塞略微升高现象在动态练习中较为常见^[28], 这就对研究对象的心血管系统提出了更高的要求, 因此过大的闭塞压会增大动脉损伤风险, 导致内出血、中风等心血管疾病。此外, 过高压也会增加神经损伤风险与受试者不良反应^[29], 这将会产生不可估量的影响^[26]。同理, 不充分的加压刺激无法产生良性训练适应。因此, 固定加压值会对训练的安全性、有效性造成很大影响。但从本综述结果来看, 它确实也是目前血流限制最常用的加压方式之一。但在训练运用中, 这一问题可能会受到进一步放大。

一篇关于 BFRT 应用文表示, 为实现最佳训练效果、保证受试者安全, 加压值应采用四肢闭塞百分比值进行训练 (LOP)^[19]。由于受试者具有显著的个体差异, 即血管闭塞值的相对性, 因此不同专家从安全及干预控制角度出发, 推荐采用相对闭塞压 (80%LOP) 进行血流限制练习^[6, 30-32], 本研究发现 26.8% 的实验在其 BFR 干预中采用了 LOP 的百分比, 发表的平均年份为 2016 年 (范围 2008-2020), 而使用固定加压值的平均研究年份为 2014 年 (范围为 2000-2020)。但从 2016-2020 年, 使用固定加压值的研究数量逐年减少, 而使用 LOP 的研究数量增加, 其中采用 LOP 是 2019 年发表论文中最为常用的方法, 这表明采用固定压进行加压训练的观念正在得到转变, 这可能与固定加压方式出现的越来越多安全与有效性问题有关。然而一些作者在 2018 年发表的研究中为了强调传统加压方法在实践中应用, 仍然使用固定压进行干预。

此外, 另一种常见加压方式是根据肱动脉收缩压计算得到。在干预和间歇时, 当加压带充气超过 100% 肱动脉收缩压时, 血管会受到影响而完全闭塞, 但在使用肱动脉收缩压的 16 项研究中, 只有 14.3% 的患者使用低于 100% 肱动脉收缩压的压力。因为训练期间动脉血压会随运动强度增加而增加, 完全闭塞肢体血管的压力也会随之增加^[26]。由于干预前测得的闭塞压并不能代表训练期间的闭塞压, 因此他们采用低于 100% 肱动脉收缩压的压力进行干预。此外, 14 篇文章中的 12 篇是采用下肢动脉压进行

干预, 这不仅忽视实验设计的严谨性, 也会导致实验结果存在较大的误差。因此这也是最近研究训练中为什么推荐采用 LOP 百分比的原因。

影响 BFRT 加压值另一个变量是加压带的材料与类型。由于充气式加压带可以通过自动或手动精准充气, 并通过压力表定期监测, 因此充气式加压带对练习的安全性和压力的准确性是最理想的选择^[27]。其他材料 (绷带、弹力带) 也有在实践中使用实例, 但压力松紧度大多是根据受试者主观感觉进行调节。采用主观感觉判断松紧度 (本综述中的 3.6% 研究) 不仅不利于数据采集, 也不利于对受试者的闭塞压进行精准调节。因此, 这些方式与固定加压值面临着类似问题^[33]。虽相比于充气式加压带, 弹力带、绷带是一种更经济的选择, 但考虑到加压方式的安全性问题, 我们应尽量避免使用。

此外, 加压带宽度也会影响充气压。加压带越窄, 动脉闭塞所需的压力就越小, 加压带越宽, 需要的压力就越大^[19, 25, 31]。也有研究发现: 采用一定比例的 LOP 练习, 加压带宽度对干预效果影响不大, 因为闭塞压相对压力值是影响血流的重要因素^[19, 34]。鉴于过高充气压会增加受试者不适与神经肌肉系统的损伤^[26], 而宽度加压带可以通过较低的绝对压力达到与窄度加压带相同的加压刺激, 因此实践运用中推荐使用宽度较宽的加压带进行练习。

最近文献表明, 最佳训练变量 (训练强度、量、间歇时间等) 与 BFRT 结合可获得最理想的实验结果^[19]。研究发现, 低于 50%VO_{2max} 的强度是进行有氧练习的理想强度, 而力量抗阻练习中 1RM 的 20%-40% 是理想练习范围^[19], 也有人提出每周进行 2-3 天的 BFR 练习是提高力量和促进肌肥大的最佳时间^[6], 在本文纳入的 138 篇相关研究中的 83% 文献符合这一训练周期, 82% 的研究将 BFR 与力量练习结合, 15% 研究与有氧训练组合。考虑到 BFR 与有氧训练结合最早出现在 2010 年^[35], 而 BFR 力量抗阻练习研究最早发表于 1993 年^[36], 因此这符合训练干预发展的逻辑顺序。在力量抗阻训练方案中, 75% 的研究使用 1RM 的 20%-40% 强度, 而在有氧训练方案中, 只有 15% 的研究使用小于 50%VO_{2max} 强度。研究结果表明, 本综述中的大多数力量训练研究符合训练周期、强度的最佳范围, 但大多数有氧训练与其相关性不高, 这可能与有氧练习的研究没有把训练强度建立在 VO_{2max} 的百分比的原因有关。此外, 本综述中的研究干预持续时间存在着明显差异性 (从 2 周到 26 周), 因此尽管大多数研究中的训练周期在每周 2 到 3 次, 但总训练量还是存在较大差异。

4 研究的局限性与展望

关于目前国内外加压训练研究中, 研究对象大多以男

性为主,很少针对女性或对男女性别研究,因此我们并不清楚BFRT 加压值是否会存在性别差异。建议今后研究在避免月经周期、内分泌失调等因素下将健康女性纳入研究对象,从而探究血流限制练习加压方式与加压值的性别差异。

此外,BFRT 虽受到临床与竞技体育领域的广泛关注,但仍处于起步阶段,对于教练员与科研人员来讲,确定加压方式、充气数值、设备等是应用环节的重要一步。因此,今后研究BFRT 的方案中应着力于减少这类因素的差异性,为教练员制定训练方案与后人研究提供稳定的参考指标。

5 结论

血流限制练习加压方式分为两大类:个体差异法(LOP、肱动脉收缩压、主观感觉度)与非个体差异法(固定压),每种方式中加压值范围都呈现现不平衡状态。常见BFRT 加压值是采用固定压,但随着研究不断深入,现阶段研究更倾向于采用LOP 的百分比进行加压,笔者从训练效果、安全性与有效性角度出发,更推广后者。

[参考文献]

[1]Slysz J,Stultz J,Burr J F. The efficacy of blood flow restricted exercise:A systematic review & meta-analysis[J]. *J Sci Med Sport*,2016,19(8):669-675.

[2]Kim D,Singh H,Loenneke J P,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):1453-1461.

[3]Cook SB,LaRoche DP,Villa MR,Barile H,Manini TM. Blood flow restricted resistance training in older adults at risk of mobility limitations[J]. *Exp Gerontol*,2017,99(2):138-145.

[4]Clarkson M J,Conway L,Warmington S A. Blood flow restriction walking and physical function in older adults: A randomized control trial[J]. *J Sci Med Sport*,2017,20(12):1041-1046.

[5]Bjornsen T,Wernbom M,Kirketeig A, et al. Type 1 Muscle Fiber Hypertrophy after Blood Flow-restricted Training in Powerlifters[J]. *Med Sci Sports Exerc*,2019,51(2):288-298.

[6]Gaviglio C M, Brown W, Coleman-Stark J. Blood flow restriction training as a novel approach to improve jumping performance[J]. *Journal of Australian Strength & Conditioning*,2015,23(6):54-57.

[7]Bennett H, Slattery F. Effects of Blood Flow Restriction Training on Aerobic Capacity and

Performance: A Systematic Review[J]. *J Strength Cond Res*,2019,33(2):572-583.

[8]Abe T,Kearns C F,Sato Y. Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle,Kaatsu-walk training[J]. *J Appl Physiol*(1985),2006,100(5):1460-1466.

[9]Loenneke J P,Wilson J M, Marin P J, et al. Low intensity blood flow restriction training: a meta-analysis[J]. *Eur J Appl Physiol*,2012,112(5):1849-1859.

[10]Lixandrao M E, Ugrinowitsch C, Berton R, et al. Magnitude of Muscle Strength and Mass Adaptations Between High-Load Resistance Training Versus Low-Load Resistance Training Associated with Blood-Flow Restriction: A Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *Sports Med*,2018,48(2):361-378.

[11]Bjornsen T, Wernbom M, Kirketeig A, et al. Type 1 Muscle Fiber Hypertrophy after Blood Flow-restricted Training in Powerlifters[J]. *Med Sci Sports Exerc*,2019,51(2):288-298.

[12]Conceicao M S,Junior E,Telles G D,et al. Augmented Anabolic Responses after 8-wk Cycling with Blood Flow Restriction[J]. *Med Sci Sports Exerc*,2019,51(1):84-93.

[13]Ilett MJ, Rantalainen T, Keske MA, May AK,Warmington SA. The Effects of Restriction Pressures on the Acute Responses to Blood Flow Restriction Exercise[J]. *Front Physiol*,2019,13(2):1018.

[14]Kraemer W J, Marchitelli L, Gordon S E,et al. Hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise protocols[J]. *J Appl Physiol*(1985),1990,69(4):1442-1450.

[15]Loenneke J P,Wilson G J, Wilson J M. A mechanistic approach to blood flow occlusion[J]. *Int J Sports Med*,2010,31(1):1-4.

[16]Takarada Y, Takazawa H, Sato Y, et al. Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans[J]. *J Appl Physiol*(1985),2000,88(6):2097-2106.

[17]Dreyer H C, Fujita S, Cadenas J G,et al. Resistance exercise increases AMPK activity and reduces 4E-BP1 phosphorylation and protein synthesis in human skeletal muscle[J]. *J Physiol*,2006,15(2):613-624.

- [18] Idström JP, Subramanian VH, Chance B, Scherstén T, Bylund-Fellenius AC. Energy metabolism in relation to oxygen supply in contracting rat skeletal muscle[J]. *Fed Proc*, 1986, 45(13):2937-41.
- [19] Patterson S D, Hughes L, Warmington S, et al. Blood Flow Restriction Exercise: Considerations of Methodology, Application, and Safety[J]. *Front Physiol*, 2019, 15(1):533.
- [20] Loenneke J P, Fahs C A, Rossow L M, et al. Effects of cuff width on arterial occlusion: implications for blood flow restricted exercise[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2012, 112(8):2903-2912.
- [21] Pereira E A, Bittar S T, Silva J C G D, et al. Walking with blood flow restriction improves the dynamic strength of women with osteoporosis[J]. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 2018, 24(4):135-139.
- [22] Cook S B, Brown K A, Deruisseau K, et al. Skeletal muscle adaptations following blood flow-restricted training during 30 days of muscular unloading[J]. *J Appl Physiol (1985)*, 2010, 109(2):341-349.
- [23] Colomer-Poveda D, Romero-Arenas S, Vera-Ibanez A, et al. Effects of 4 weeks of low-load unilateral resistance training, with and without blood flow restriction, on strength, thickness, V wave, and H reflex of the soleus muscle in men[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2017, 117(7):1339-1347.
- [24] Paton C D, Addis S M, Taylor L A. The effects of muscle blood flow restriction during running training on measures of aerobic capacity and run time to exhaustion[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2017, 117(12):2579-2585.
- [25] Weatherholt A M, Vanwey W R, Lohmann J, et al. The Effect of Cuff Width for Determining Limb Occlusion Pressure: A Comparison of Blood Flow Restriction Devices[J]. *Int J Exerc Sci*, 2019, 12(3):136-143.
- [26] Jessee M B, Dankel S J, Buckner S L, et al. The Cardiovascular and Perceptual Response to Very Low Load Blood Flow Restricted Exercise[J]. *Int J Sports Med*, 2017, 38(8):597-603.
- [27] McEwen J A, Owens J G, Jeyasurya J. Why is it Crucial to Use Personalized Occlusion Pressures in Blood Flow Restriction (BFR) Rehabilitation?[J]. *Journal of Medical and Biological Engineering*, 2019, 39(2):173-177.
- [28] Brandner C R, Kidgeell D J, Warmington S A. Unilateral bicep curl hemodynamics: Low-pressure continuous vs high-pressure intermittent blood flow restriction[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2015, 25(6):770-777.
- [29] Noordin S, McEwen J A, Kragh J J, et al. Surgical tourniquets in orthopaedics[J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91(12):2958-2967.
- [30] Fatela P, Reis J F, Mendonca G V, et al. Acute effects of exercise under different levels of blood-flow restriction on muscle activation and fatigue[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2016, 116(5):985-995.
- [31] Jessee M B, Buckner S L, Dankel S J, et al. The Influence of Cuff Width, Sex, and Race on Arterial Occlusion: Implications for Blood Flow Restriction Research[J]. *Sports Med*, 2016, 46(6):913-921.
- [32] Patterson S D, Hughes L, Head P, et al. Blood flow restriction training: a novel approach to augment clinical rehabilitation: how to do it[J]. *Br J Sports Med*, 2017, 51(23):1648-1649.
- [33] McEwen J A, Casey V. Measurement of hazardous pressure levels and gradients produced on human limbs by non-pneumatic tourniquets[J]. *CMBES Proceedings*, 2009, 32(7):324.
- [34] Mouser J G, Dankel S J, Jessee M B, et al. A tale of three cuffs: the hemodynamics of blood flow restriction[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2017, 117(7):1493-1499.
- [35] Abe T, Fujita S, Nakajima 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):452-458.
- [36] Sundberg C J, Eiken O, Nygren A, et al. Effects of ischaemic training on local aerobic muscle performance in man[J]. *Acta Physiol Scand*, 1993, 148(1):13-19.

作者简介: 郑占飞 (1993-) 男, 北京体育大学体能训练学院, 研究方向: 体能训练理论与实践。