

血流限制训练联合有氧运动的作用机制及其在康复领域的应用进展*

逯莉莉^{1,2} 桂沛君¹ 谢 璞^{1,2,3} 任 念^{1,2} 乔 丹^{1,2}

近年来,血流限制训练(blood flow restriction training, BFRT)作为一种新兴的训练方式被广泛应用,其特点是配合低强度运动,能够达到和高强度运动相似的效果。血流限制训练不仅能够促进肌肉肥大、增加肌肉力量和激素分泌,而且联合低强度有氧运动能有效提升心肺耐力。与高强度有氧运动相比,血流限制联合有氧运动(blood flow restriction training with aerobic exercise, AE-BFR)产生的机械应力和心血管系统的压力较小,与传统的高强度有氧运动相比较为安全,更适合患有肌肉骨骼疾病和慢性病(例如冠心病或糖尿病)的人群^[1]。因此,本文就AE-BFR的机制及其在康复领域中的应用进行分析和探讨,归纳AE-BFR在康复领域的应用策略,为相关理论研究和临床应用提供参考与借鉴。

1 血流限制训练联合有氧运动的作用机制

AE-BFR是指在运动期间运用止血带、弹性包裹物或充气袖带等特殊加压装置对肢体近端进行外部加压,闭塞静脉血流的同时减少动脉血流^[2],并结合使用有氧运动的形式来促进肌肉肥大、增加肌肉力量、改善心肺功能的方法^[3]。

现有研究关于AE-BFR的作用机制说法不一。目前认为,代谢应激和机械张力是AE-BFR中导致肌肉适应性和心血管反应的主要机制,两者可能是叠加或协同作用,然而由于AE-BFR中有氧运动的运动强度较低,所以更多的可能是由代谢应激引起的^[4]。

1.1 代谢应激的增加

代谢应激的增加是AE-BFR导致肌肉肥大的主要机制之一,代谢应激与肌肉肥大存在直接联系^[4]。AE-BFR代谢应激的增加主要表现为代谢中间产物或代谢产物(例如乳酸、无机磷酸盐或氢离子)的累积以及由于乳糖代谢活性增加而导致的能量消耗。

Conceição MS等^[5]研究发现,自行车训练中运动强度为40%最大摄氧量(maximal oxygen consumption, VO_{2max})时,与无血流限制的低强度有氧运动组相比,血流限制联合低强度有氧运动组运动15min和运动后峰值血乳酸浓度均明显升高,血乳酸浓度随着时间的推移而增加,2种方案的血乳酸

浓度均在运动后15min恢复到运动前水平。Corvino RB等^[6]研究表明,运动强度为30%峰值功率(P_{max})时,血流限制组比无血流限制组血乳酸增加。Thomas HJ等^[7]对血流限制联合低强度自行车运动的急性生理反应的研究中也有相似发现,运动强度为40% P_{max} 时,加压压力为80%动脉闭塞压(arterial occlusion pressure, AOP)的BFR组,血乳酸浓度比无BFR组高110%。de Oliveira MFM等^[8]研究发现,每周3次、持续4周的BFR低强度自行车训练组起始血乳酸累积提高了16%,最大功率提高了15%,膝关节伸肌最大自主等长收缩增加了11%。然而,Loenneke JP等^[9]研究发现,运动速度为75m/min的BFR步行训练没有引起血乳酸明显升高,其产生的刺激不足以增加运动后的代谢应激。

另外,Barjaste A等^[10]研究发现,单次加压压力为200mmHg、运动强度为63%—65%最大心率(maximum heart rate, HR_{max}),相当于运动强度为40% VO_{2max} 的BFR步行训练,可以导致蛋白激酶B(protein kinase B, PKB)磷酸化增加,从而证实了AE-BFR过程中PKB途径被激活,促进肌肉合成代谢。Ozaki H等^[11]研究发现,单次加压压力为240mmHg、运动强度为50% VO_{2max} 的BFR步行运动后,双下肢Erk 1/2磷酸化水平显著升高,但是只有使用BFR进行运动的腿才导致p38磷酸化增加,行走前后未观察到PKB、雷帕霉素靶蛋白(mammalian target of rapamycin, mTOR)或S6K1(ribosome protein subunit 6 kinase 1, S6K1)磷酸化水平的变化。这种差异可能是由于BFR应用的差异(即本研究仅一条腿加压,另一条腿作为对照)引起的。且研究发现与无BFR步行相比,BFR步行训练能够引起更多的能量消耗^[12-13]。

因此,AE-BFR所引起的代谢应激变化能够引起代谢中间产物或代谢产物累积,导致更多的能量消耗。但由于BFR应用和有氧运动运动方案的不同,机体可能会产生不同的代谢应激反应。

1.2 机械张力的升高

机械张力是AE-BFR促进肌肉肥大的另一重要机制^[4]。机械张力通过机械传导,机械感受器将机械能转化为介导细

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.10.023

*基金项目:北京市医院管理局“青苗”计划专项经费资助项目(QML20200109)

1 首都医科大学附属北京友谊医院康复医学科,北京市,100050; 2 天津体育学院社会体育与健康科学学院; 3 通讯作者

第一作者简介:逯莉莉,女,硕士研究生; 收稿日期:2021-12-02

胞合成和分解代谢途径的化学信号,最终导致肌肉内蛋白质平衡发生改变,有利于蛋白质的合成^[14]。研究表明,在脂质双层受损或修复过程中,可形成囊泡塞,从而使细胞内成分与脂质双层融合并释放胰岛素样生长因子-1(insulin-like growth factors-1, IGF-1),最终通过激活磷脂酰肌醇-3-羟激酶(phosphatidylinositol 3-kinase, PI3K)/PKB增加蛋白质合成^[15]。根据Loenneke JP等^[9]研究表明,BFR步行后观察到的分子变化可能与代谢应激以外的其他机制有关,一个可能的解释是步行可引起更高的机械张力,这可能是代谢应激的叠加和协同效应。然而还没有证据表明其对AE-BFR诱导效应的潜在贡献,鉴于AE-BFR中的低机械应力,这种机械传导过程是否会导致AE-BFR诱导肌肉肥大仍有待进一步研究。

目前认为,AE-BFR的作用机制尚不明确,代谢应激和机械张力可能是其主要机制。AE-BFR中加压大小、有氧运动的运动方式和运动强度不同所引起的代谢应激和机械张力也不同。所以,有必要对AE-BFR期间不同的运动模式做进一步深入研究,以确定机械张力和代谢应激的最佳组合及其对有氧能力和肌肉肥大的影响。

1.3 其他机制

1.3.1 肌肉损伤:由于小活检样本评估肌肉损伤的固有误差,以及这些技术的侵入性,目前常用主观估计疼痛、肌肉力量和血液蛋白质水平(肌酸激酶和乳酸脱氢酶)等间接标志物的变化来判断某项运动是否能够造成肌肉损伤^[16]。Penailillo L等^[17]的研究中,受试者在卧式离心训练器上以60%同心 P_{max} 抵抗踏板向后移动,在60r/min的速度下保持30min的恒定功率输出,评估训练前后随时间变化膝关节伸肌的最大自主收缩(maximum voluntary contraction, MVC)、肌肉酸痛、压痛阈和肌肉柔韧性和血浆肌酸激酶的活性。结果表明,离心循环BFR与单纯离心循环训练相比,可产生类似的心血管应激、生成更多的乳酸及需要更长的恢复时间。然而,Abe T等^[18]研究发现,50m/min、每天2次、6天/周、持续3周的BFR步行训练,不能引起肌肉损伤指标(肌酸激酶和肌红蛋白)含量的变化。Loenneke JP等^[9]的一篇荟萃分析也表明,低强度AE-BFR不会造成骨骼肌损伤,因为肌肉没有长时间肿胀且肌肉功能没有长时间下降,疼痛等级与次最大低负荷对照组相似,而且没有研究表明肌肉损伤的血液生物标志物升高。AE-BFR似乎只能造成很小的肌肉损伤,但目前文献量较少,有必要进一步研究不同有氧运动方式、强度和时间下BFR对骨骼肌损伤的影响。

1.3.2 激素分泌:以往研究发现,AE-BFR会导致合成代谢激素生长激素(growth hormone, GH)和IGF-1浓度的增加,有利于促进肌肉肥大。另外,IGF-1具有抗内皮细胞衰老的作用。Barjaste A等^[10]研究发现,单次BFR步行训练可导致GH和IGF-1增加。然而,Ozaki H等^[11]的研究发现,单次加

压压力为240mmHg、运动强度为50% VO_{2max} 的BFR步行运动没有引起IGF-1变化。这种差异可能是由于BFR应用方法的差异(即本研究仅一条腿加压,另一条腿作为对照),这可能会影响活动肌肉的局部缺氧,从而影响了其合成代谢途径。Ozaki H等^[20]的另一项研究也表明,合成代谢激素(GH、胰岛素和去甲肾上腺素)的变化与BFR步行诱导的肌肉肥大没有显著相关性。

1.3.3 血管相关因子:血管内皮细胞生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)能在体内诱导血管新生、促进血管通透性增加、细胞外基质变性、血管内皮细胞迁移、增殖和血管形成等^[21]。过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活因子1 α (peroxisome proliferator-activated receptor- γ coactivator-1 α , PGC-1 α)既是线粒体生物发生和能量代谢的主要调控因子,包括对氧化磷酸化、脂质代谢和活性氧(reactive oxygen species, ROS)等水平的调节,也能调节血管生长因子的表达。Barjaste A等^[10]发现BFR步行训练可显著增加缺氧诱导因子1 α (hypoxic inducible factor-1 α , HIF-1 α)、PGC-1 α 和VEGF的含量。Conceição MS等^[22]学者也发现,AE-BFR(运动强度为40% VO_{2max})与单纯有氧运动(运动强度为70% VO_{2max})均能导致VEGF mRNA和PGC1- α mRNA增加。有学者认为,单纯有氧运动与AE-BFR改善内皮功能的过程和结果相似,但其生理机制可能不同。加压条件下主要是通过限制机体的局部血流,使机体处于缺氧及局部肌肉氧压力下降的情况,两过程中都使得HIF-1 α 与VEGF上的低氧诱导因子结合速率加快,增加了VEGF蛋白的生物活性,使得在缺氧条件下VEGF的表达显著增加,结果导致血管生成速率及一氧化氮生物利用率的增加,其抗酸化作用也能抑制一氧化氮的分解,最终使得内皮依存性的迟缓反应增加,改善血管紧张度从而提高内皮的功能水平^[23]。

除上述机制外,还有学者认为^[24],血流限制训练下限制静脉血流使肢体远端出现静脉池效应,从而诱发肌细胞肿胀膨大。细胞肿胀既可抑制蛋白质分解,又可促进脂肪分解,对蛋白质的合成起积极促进作用。所以细胞肿胀可能是血流限制训练促进肌肉肥大、增强肌肉力量的基础生理机制。

如前所述,代谢应激和机械张力是AE-BFR的主要机制,两者可能会引起肌肉损伤,增加GH、IGF-1等合成生长激素和VEGF、PGC-1 α 等血管生长相关因子分泌,从而促进肌肉肥大,降低血管僵硬,提升内皮功能,最终促进肌肉肥大和改善有氧能力。但目前文献量较少,对于AE-BFR过程中不同运动方案下所产生的代谢应激和机械张力的不同以及肌肉损伤程度、激素水平和血管生长相关因子的变化还有待进一步研究。且AE-BFR的运动强度通常较低,其产生的机械应力是否是引起细胞肿胀的主要因素还有待证实。

2 血流限制训练联合有氧运动在康复领域的应用效果

以往血流限制训练联合有氧运动的研究中,有氧运动方式主要是步行、跑步或自行车运动,运动强度通常根据心率或摄氧量来确定,有氧运动的运动强度大多为40%—80% VO_{2max} 、50%—70% HR_{max} 、30%—45%心率储备(heart rate reserve, HRR),运动时间主要在10min—20min,持续时间为3—12周^[10-11, 20, 22, 25-34]。加压压力的大小,有研究^[8, 10-11, 20, 26-27, 29, 31, 33, 35]根据前人所确定的压力,采用固定的加压压力;还有研究采用40%—80% AOP^[25, 28, 30, 32, 36-37]进行加压,运动过程中加压带可连续或间歇使用。

2.1 促进肌肉肥大,提升肌肉功能

骨关节病、运动损伤、外科手术术后和肌肉减少症等肌肉骨骼疾病通常与肌肉骨骼系统所承受负荷能力降低、肌肉质量减少和肌肉力量减退有关。因此,提高或维持肌肉功能是肌肉骨骼疾病康复的重要组成部分。

Pereira NEA等^[32]对20例股骨区域骨质疏松症、T评分低于-2.5的50岁以上女性患者的研究中发现,每周2次,为期12周的BFR低强度有氧运动(加压压力80% AOP,运动强度65% HR_{max} ,运动时间15min)能够显著提高膝关节伸展1RM(一次关节全幅运动所能对抗的最大阻力值)。

另外,研究表明,大约1/5的社区老年人面临着肌肉减少症的威胁,其受多种危险因素的影响,包括老龄化、男性、低身体质量指数、低血清白蛋白水平、营养缺乏和高体脂质量^[38]。老年肌肉减少症的主要表现为肌肉萎缩或肌力下降,康复训练和功能锻炼是防治老年肌肉减少症的主要方法,临床研究表明,BFRT可能实现预防、治疗甚至扭转这种随年龄增加的肌肉生理性变化^[39]。Abe T等^[40]将19例60—78岁老年人随机分成BFR步行组和无任何训练的对照组,BFR步行组完成每次20min、加压压力为160mmHg—200mmHg、运动强度为50% HR_{max} 的跑步机步行训练,每周5天,6周后BFR步行组等长(11%)和等速(7%—16%)膝关节伸展和屈曲力矩、肌肉-骨横截面积(大腿和小腿分别为5.8%和5.1%)以及超声估计的骨骼肌质量(全身和大腿分别为6.0%和10.7%)均显著增加,且运动功能(计时起立行走测试和坐站测试)也显著改善。Ozaki H等^[41]将23例57—76岁老年人随机分为BFR步行训练组和步行训练对照组,2组均完成每周4次、运动强度为45% HRR的步行训练,BFR步行训练组加压压力为160mmHg—200mmHg,持续训练10周后,结果表明BFR步行训练组大腿肌肉横截面积增加3.2%,膝关节屈伸肌最大等速肌力分别增加15%和8.7%,然而对照组变化不明显。Ozaki H等^[42]的另一项研究也有类似发现。Clarkson MJ等^[43]对19例长期久坐的60—80岁老年人的研究中也表明,步行速度为4km/h,每次10min,每周4天,持续6周后,与单纯步行训练组相比,加压压力为60% AOP的BFR步行组

30s坐站测试、计时起跳测试、6min步行测试均明显改善。

2.2 改善心血管循环,提升心肺耐力

随着年龄的增加,心脏的收缩能力减退,血管弹性变小,动脉管壁硬化,管壁变窄,极易引发心血管疾病。动脉顺应性是指血管壁的缓冲能力,能够反映血管的舒张功能,其功能水平受收缩压、舒张压和脉压水平的影响,动脉顺应性功能减退已成为确立心血管危险的重要标志之一^[23]。Ozaki H等^[41]对57—76岁的老年人的研究中发现,加压压力为140mmHg—200mmHg,运动强度为45% HRR,运动时间为20min/次,每周4天,持续10周的BFR步行训练后颈动脉顺应性增加50%。

全身性动脉高血压与大多数心血管疾病死亡相关,尤其对于老年人群,抗氧化剂和促氧化剂之间的不平衡与高血压相关。Barili A等^[44]对16例老年女性高血压患者的研究表明,BFR低强度有氧运动能够产生类似更高强度有氧运动的氧化状态和血流动力学刺激。Ferreira MLV等^[34]对21例老年人的研究发现单次加压压力为50% AOP,运动强度为40% VO_{2max} 条件下进行20min的加压步行训练,与运动强度为70% VO_{2max} 步行训练相比,40% VO_{2max} 加压步行训练对老年人的心血管压力更低。Junior AF^[35]研究发现,每次进行5组(每组步行3min,间歇1min)运动速度为6km/h的步行训练,BFR步行训练组加压压力为80mmHg—100mmHg,每周3次,持续6周后发现,与单纯步行训练相比,BFR步行训练促进了训练后心脏自主神经反应的积极变化。且研究表明40%峰值速度步行20min,加压压力为40% AOP时和无加压压力一样均不会影响高血压前期男性运动后心脏迷走神经调节^[25]。因此,AE-BFR可改善心血管健康,减缓与衰老相关的负性改变,对于无法进行高强度运动的人来说,可能是一种替代方法,但在患有心血管疾病的老年群体中使用BFR时对于加压压力的选择必须谨慎。

心肺耐力反映人体摄取、运输和利用氧的能力,包括心脏泵血功能、肌肉利用氧的能力、肺部摄取及气体交换能力等。研究发现,心肺耐力也与2型糖尿病相关,低水平心肺耐力者比高水平心肺耐力者空腹血糖受损发生率1.9倍,糖尿病风险高3.7倍^[23]。Ozaki H等^[42]研究发现,运动强度为45% HRR,加压压力为160mmHg—200mmHg,每周4次,持续10周的BFR步行训练有利于增加老年人的 VO_{2peak} 。de Oliveira MFM等^[39]对37例青年男性的研究中发现,BFR联合低强度间歇训练组、高强度间歇训练组和BFR+高强度间歇训练组合训练组 VO_{2max} 分别增加6%、9%和6%,然而无BFR的低强度间歇步行训练组 VO_{2max} 无明显变化。Silva JCG等^[45]研究也表明,BFR步行训练(40% VO_{2peak})和高强度间歇训练(80% VO_{2peak})在运动后会引类似程度的不适,且BFR步行训练可以导致 VO_{2peak} 明显提高。

Matsuo等^[33]对20例(64—85岁)慢性心力衰竭患者的研究中,所有患者在接受研究前均参加了为期12周以上的标准心脏康复训练,包括有氧和阻力训练。对照组的受试者继续进行30min中等强度自行车训练(70% HR_{max}),另一组受试者进行BFR自行车训练(加压压力为250mmHg)。血流受限时间约为12min,中等强度自行车训练为10min。2组每周进行2次训练,持续12周。结果显示,心肺功能测试或超声心动图测量的生理改善在2组之间无显著差异。但BFR自行车训练组的生活质量显著改善。因此,12周的BFR自行车训练可在安全且高效的前提下,提高运动能力,改善生活质量。AE-BFR对于慢性心力衰竭患者可能是一种安全、有效的训练方法。

综上所述,现有研究证明,AE-BFR能促进肌肉肥大,增加肌肉力量,防治肌肉萎缩,提升步行能力,改善老年人动脉血管的顺应性,减轻老年人运动后的心血管压力。另外,AE-BFR的运动强度较低,对于不能进行高强度运动的老年人和患者不失为一个安全且高效的运动选择。但目前有关AE-BFR在肌肉骨骼疾病和心血管疾病康复中应用的研究还较少,特别是加压压力、运动持续时间、运动方式和运动强度的选择 and 安全性还有待进一步研究。

3 小结

血流限制训练作为一种新型治疗方式,可以通过个性化的康复方案设计,在减小训练强度的同时达到类似于高强度训练的效果。血流限制训练联合有氧运动的机制尚不明确,目前认为其主要机制可能是代谢应激和机械张力。血流限制训练联合有氧运动在康复领域逐渐推广应用,不仅应用于肌肉骨骼康复也逐渐应用于改善心血管功能。但何种运动方式、加压大小、运动强度,以及运动时间下能保证受试者安全且达到最佳康复效果,还需进一步研究。

参考文献

- [1] Saatmann N, Zaharia OP, Loenneke JP, et al. Effects of blood flow restriction exercise and possible applications in type 2 diabetes[J]. Trends Endocrinol Metab, 2021, 32(2): 106—117.
- [2] 魏佳,李博,杨威,等.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.
- [3] Silva JCG, Pereira Neto EA, Pfeiffer PAS, et al. Acute and chronic responses of aerobic exercise with blood flow restriction: a systematic review[J]. Front Physiol, 2019(10):1239.
- [4] Pearson SJ, Hussain SR. A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy[J]. Sports Med, 2015, 45(2): 187—200.
- [5] Conceição MS, Gáspari AF, Ramkrapes APB, et al. Anaerobic metabolism induces greater total energy expenditure during exercise with blood flow restriction[J]. PLoS One, 2018, 13(3): e0194776.
- [6] Corvino RB, Rossiter HB, Loch T, et al. Physiological responses to interval endurance exercise at different levels of blood flow restriction[J]. Eur J Appl Physiol, 2017, 117(1): 39—52.
- [7] Thomas HJ, Scott BR, Peiffer JJ. Acute physiological responses to low-intensity blood flow restriction cycling[J]. J Sci Med Sport, 2018, 21(9): 969—974.
- [8] de Oliveira MFM, Caputo F, Corvino RB, et al. Short-term low-intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength[J]. Scand J Med Sci Spor, 2016, 26(9): 1017—1025.
- [9] Loenneke JP, Thrower AD, Balapur A, et al. Blood flow-restricted walking does not result in an accumulation of metabolites[J]. Clin Physiol Funct I, 2012, 32(1): 80—82.
- [10] Barjaste A, Mirzaei B, Rahmani-nia F, et al. Concomitant aerobic- and hypertrophy-related skeletal muscle cell signaling following blood flow-restricted walking[J]. Sci Sport, 2021, 36(2): e51—e58.
- [11] Ozaki H, Kakigi R, Kobayashi H, et al. Effects of walking combined with restricted leg blood flow on mTOR and MAPK signalling in young men[J]. Acta Physiol (Oxf), 2014, 211(1): 97—106.
- [12] 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.
- [13] Pfeiffer PS, Cirilo-Sousa MS, Santos HHD. Effects of different percentages of blood flow restriction on energy expenditure[J]. Int J Sports Med, 2019, 40(3): 186—190.
- [14] Zou K, Meador BM, Johnson B, et al. The $\alpha 7\beta 1$ -integrin increases muscle hypertrophy following multiple bouts of eccentric exercise[J]. J Appl Physiol, 2011, 111(4): 1134—1141.
- [15] Kimball SR, Farrell PA, Jefferson, LS, et al. Exercise effects on muscle insulin signaling and action invited review: role of insulin in translational control of protein synthesis in skeletal muscle by amino acids or exercise[J]. J Appl Physiol, 2002, 93(3): 1168—1180.
- [16] Warren GL, Lowe DA, Armstrong RB. Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury[J]. Sports Med, 1999, 27(1): 43—59.
- [17] Penailillo L, Santander M, Zbinden-Foncea H, et al. Metabolic demand and indirect markers of muscle damage after eccentric cycling with blood flow restriction[J]. Res Q Exercise Sport, 2020, 91(4): 705—712.
- [18] 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]. J Appl Physiol, 2006, 100(5): 1460—1466.
- [19] Loenneke JP, Thiebaud RS, Abe T. Does blood flow re-

- striction result in skeletal muscle damage? a critical review of available evidence[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2014, 24(6):e415—e422.
- [20] Ozaki H, Loenneke JP, Abe T. Blood flow-restricted walking in older women: does the acute hormonal response associate with muscle hypertrophy[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2017, 37(4):379—383.
- [21] 刘忠浩. 血流限制抗阻训练对血压影响的研究进展[J]. *休闲*, 2020(27):238—239.
- [22] Conceição MS, Junior EMM, Telles GD, et al. Augmented anabolic responses after 8-wk cycling with blood flow restriction[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2019, 51(1):84—93.
- [23] 梁国栋, 刘礼宾, 印笑. 加压训练: 改善肌肉功能的生理机制及提升心血管功能的可行性分析[J]. *体育世界(学术版)*, 2018(1):179—180.
- [24] 李卓倩. 加压训练对人体机能的影响[J]. *运动*, 2018(4):11—12.
- [25] Schamne JC, Motin C, Sochodolak RC, et al. Cardiac autonomic response to aerobic exercise with different levels of blood flow restriction in pre-hypertensive men[J]. *Sport Sciences for Health*, 2020, 17(2):375—382.
- [26] Christiansen D, Eibye K, Hostrup M, et al. Training with blood flow restriction increases femoral artery diameter and thigh oxygen delivery during knee-extensor exercise in recreationally trained men[J]. *J Physiol*, 2020, 598(12):2337—2353.
- [27] Kim D, Singh H, Loenneke JP, 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.
- [28] da Silva JCG, Silva KF, Domingos-Gomes JR, et al. Aerobic exercise with blood flow restriction affects mood state in a similar fashion to high intensity interval exercise[J]. *Physiol Behav*, 2019(211):112677.
- [29] Christiansen D, Eibye KH, Rasmussen V, et al. Cycling with blood flow restriction improves performance and muscle K^+ regulation and alters the effect of anti-oxidant infusion in humans[J]. *J Physiol*, 2019, 597(9):2421—2444.
- [30] Taylor CW, Ingham SA, Ferguson RA. Acute and chronic effect of sprint interval training combined with postexercise blood-flow restriction in trained individuals[J]. *Exp Physiol*, 2016, 101(1):143—154.
- [31] Masumeh D, Mojdeh R, Baharak MK, et al. Effect of aerobic training with blood flow restricting on static balance lower extremity strength and thigh hypertrophy in females with multiple sclerosis[J]. *Report of Health Care*, 2017, 3(2):33—41.
- [32] Pereira NEA, Bittar ST, Silva JCGD, et al. Walking with blood flow restricting improves the dynamic strength of women with osteoporosis[J]. *Rev Bras Med Esporte*, 2018, 24(2):135—139.
- [33] Matsuo Y, Nakjima TN, Fukumura KF, et al. Restricted blood flow training-affordable method for cardiac rehabilitation[J]. *Eur J Prev Cardiol*, 2014, 21(1):S148.
- [34] Ferreira MLV, Sardeli AV, Souza GV, et al. Cardiac autonomic and haemodynamic recovery after a single session of aerobic exercise with and without blood flow restriction in older adults[J]. *J Sport Sci*, 2017, 35(24):2412—2420.
- [35] Junior AF, Schamne JC, Perandini LAB, et al. Effects of walking training with restricted blood flow on HR and HRV kinetics and HRV recovery[J]. *Int J Sports Med*, 2019, 40(9):585—591.
- [36] Kim D, Loenneke JP, Thiebaud RS, et al. The acute muscular effects of cycling with and without different degrees of blood flow restriction[J]. *Acta Physiol Hung*, 2015, 102(4):428—441.
- [37] Clarkson MJ, Fraser SF, Bennett PN, et al. Efficacy of blood flow restriction exercise during dialysis for end stage kidney disease patients: protocol of a randomised controlled trial[J]. *BMC Nephrol*, 2017, 18(1):294.
- [38] Nasimi N, Dabbaghmanesh MH, Sohrabi Z. Nutritional status and body fat mass: determinants of sarcopenia in community-dwelling older adults[J]. *Exp Gerontol*, 2019(122):67—73.
- [39] 陈蓉, 曾庆, 巩泽, 等. 不同模式下血流限制治疗老年性肌肉减少症的效果与安全因素[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(32):5215—5221.
- [40] 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]. *J Geriatr Phys Ther*, 2010, 33(1):34—40.
- [41] Ozaki H, Miyachi M, Nakajima T, et al. Effects of 10 weeks walk training with leg blood flow reduction on carotid arterial compliance and muscle size in the elderly adults[J]. *Angiology*, 2011, 62(1):81—86.
- [42] Ozaki H, Sakamaki M, Yasuda T, et al. Increases in thigh muscle volume and strength by walk training with leg blood flow reduction in older participants[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2011, 66(3):257—263.
- [43] Clarkson MJ, Conway L, Warmington SA. Blood flow restriction walking and physical function in older adults: a randomized control trial[J]. *J Sci Med Sport*, 2017, 20(12):1041—1046.
- [44] Barili A, Corralo VDS, Cardoso AM, et al. Acute responses of hemodynamic and oxidative stress parameters to aerobic exercise with blood flow restriction in hypertensive elderly women[J]. *Mol Biol Rep*, 2018, 45(5):1099—1109.
- [45] Silva JCG, Domingos-Gomes JR, Freitas EDS, 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.