

血流限制训练对血管内皮功能影响的研究进展

区子藤¹ 李文静¹ 孟静怡¹ 刘书芳^{2*}

1 广州体育学院 研究生院, 广东 广州 510500

2 广州体育学院 运动与健康学院, 广东 广州 510500

[摘要]目的: 为了明确血流限制训练对血管内皮功能的影响机制, 及其使用安全性相关问题进行文献的查询和综述, 为未来临床或普通群体的血流限制训练提供相关建议及研究方向。方法: 通过文献资料法, 系统搜索并综述来源 PubMed、Web of science 和中国知网收录的血流限制训练应用于血管功能安全的相关文献。结论: ①个性化的血流限制训练方案下, 低负荷的(20%~40%1RM) BFR 训练可能是改善血管内皮功能的最佳形式, 暂未发现对健康人群血管内皮造成明显的损害。大多研究 BFR 训练后对血管内皮因子生成的影响是急性的, 尚需要长期的实验以获得 BFR 训练对血管内皮功能产生适应性的数据。②目前有限的证据表明血流限制训练可能会改善轻度基础疾病患者的血压和内皮功能, 但还需要大样本量的研究证明其安全性。未来, 血流限制训练有望成为这类人群改善血管内皮功能的运动方式。

[关键词]血流限制训练; 加压训练; 血管内皮功能; 血管内皮因子; 心血管功能

DOI: 10.33142/jscs.v4i1.11447

中图分类号: R285.5

文献标识码: A

Research Progress on the Effect of Blood Flow Restriction Training on Vascular Endothelial Function

QU Ziteng¹, LI Wenjing¹, MENG Jingyi¹, LIU Shufang^{2*}

1 Graduate School of Guangzhou Sport University, Guangzhou, Guangdong, 510500, China

2 School of Sports and Health, Guangzhou Sport University, Guangzhou, Guangdong, 510500, China

Abstract: Objective: in order to clarify the mechanism of the impact of blood flow restriction training on vascular endothelial function, and to conduct a literature search and review on safety related issues, and to provide relevant suggestions and research directions for future clinical or general population blood flow restriction training. Methods: through the literature review method, the relevant literature on the application of blood flow restriction training to vascular function safety was systematically searched and summarized from sources such as PubMed, Web of Science, and CNKI. Conclusion: ① Under a personalized blood flow restriction training program, low load (20%~40% 1RM) BFR training may be the best form to improve endothelial function, and no significant damage to the endothelial function of healthy individuals has been found yet. Most studies on the impact of BFR training on vascular endothelial factor generation are acute, and long-term experiments are needed to obtain data on the adaptability of BFR training to vascular endothelial function. ② Currently, limited evidence suggests that blood flow restriction training may improve blood pressure and endothelial function in patients with mild underlying diseases, but large-scale studies are needed to demonstrate its safety. In the future, blood flow restriction training is expected to become a way for this group of people to improve endothelial function through exercise.

Keywords: blood flow restriction training; pressure training; vascular endothelial function; vascular endothelial factor; cardiovascular function

引言

血流限制训练(Blood Flow Restriction Training, BFRT), 也称为加压训练(KAATSU Training), 是指在训练中使用具有一定宽度的充气袖带对肢体进行外部加压, 袖带加压闭塞静脉血流同时允许部分动脉血流入肢体以提高训练效果^[1]。近年来, 血流限制训练在医学和体育领域应用越来越广泛, 逐渐成为传统大负荷力量训练的可行性替代方法^[2]。研究表明, 血流限制训练引起骨骼肌缺氧应激刺激肌肉围度生成^[3]。BFR 训练对肌肉力量和肌围度的益处已得到证实^[4-6], 但随着研究的深入, 血流限制训练的安全性问题引发了诸多思考。目前, 血流限制压力值

的设定尚未统一标准, 原使用的绝对压力缺乏一定的安全性, 现逐步过渡到个性化的压力值^[7]。有研究显示血流限制训练的压力有可能会损伤血管内皮功能, 加剧动脉粥样硬化进程^[8]。关于 BFRT 如何影响血管功能, 及如何安用于临床, 目前尚未达成共识。本研究为明确血流限制训练对血管内皮功能的影响机制, 及对其使用安全性进行探讨, 使血流限制训练方案应用更为安全有效。

1 血管内皮的作用

血管内皮是由内皮细胞(Endothelial Cells, EC)组成的血管内壁最内层的单层扁平上皮, 其面积广泛覆盖人体全身, 是人体活跃的具有内分泌功能的组织, 主要维持

血管正常舒缩, 机体内液体、溶质以及细胞通过内皮屏障进行交换, 是血管壁的动态稳定结构^[9-10]。

EC 能够感知血流动力学变化和血液信号, 通过控制血管张力来调节局部血流量^[11]。EC 通过分泌一氧化氮 (NO)、血管紧张素等血管舒缩因子来调节血管张力^[12]。EC 构成动脉、静脉和毛细血管, 不同类型的血管 EC 形态、生理功能存在差异, 这导致 EC 的异质性, 动脉和静脉中的 EC 异质性更活跃, 易受血管结构、血流速率、血流模式和血压的影响^[13]。血流动力学发生改变时, EC 会表现出通过粘附、增殖、凋亡的形式来提示脉管系统出现疾病^[14]。

EC 的完整性对于维持血管的动态平衡, 如在调控血小板黏附和聚集、抗血栓、白细胞活化黏附和转运方面起到了重要作用^[15]。当血管受损时, 血小板会凝集并诱导平滑肌细胞生成从而愈合损伤部位^[16]。EC 还可以调节免疫系统, 与炎症和血管生成相关联, 它们将炎症细胞引导到需要修复或防御感染的病灶区域, 以促进损伤组织恢复^[17]。内皮细胞通过抗原呈递或者内皮间质转化成间充质细胞来干预炎症, EC 的正常运作可向组织输送氧气和营养物质, 在生理情况, EC 生成可以促进组织修复; 在病理情况下, 炎症会释放某些细胞因子和趋化因子, 比如肿瘤坏死因子 (Tumor Necrosis Factor TNF)、白细胞介素来增强血管生成来作为癌症和慢性炎症性疾病的靶向治疗。血管内皮在受到血流限制压力刺激时会释放一些生物标志物来提示内皮细胞生成或受损状况, 内皮增殖和迁移是血管生成和扩张的核心。因此通过监测血管内皮细胞可以更全面地评估血管功能状态。

2 血流限制对血管内皮方面可能影响的机制

关于 BFRT 应用的一个最重要的因素就是部分血管闭塞对血管内皮的影响, 通过血管内皮功能从而影响人体循环系统, 目前对于血流限制刺激血管内皮生成机制包括血管剪切应力和高代谢应激的说法。

2.1 剪切应力影响机制

剪切应力指血液在血管壁上的摩擦力, 是运动中诱导内皮细胞适应的一个重要影响因素^[18]。血管中的剪切应力可促进内皮细胞积极结构变化, 血流限制增加血管血流量时血液通过内皮的剪切力导致内皮细胞变形后血管适应性地扩张, BFR 训练对血管内皮的作用可能是由于运动期间缺血缺氧下更大的剪切应力诱导的^[19]。BFRT 诱导的剪切应力增加引起的反应性充血的作用导致血管扩张和刺激内皮因子产生^[20]。血流限制训练增加了血管剪切应力, 给内皮提供生理应激促进血管生成。在缺血-再灌注过程中, 肌肉中的血管扩张血液灌注会比没有 BFR 的运动在训练间歇恢复期间的血流灌注水平更高, 这些血液波动会增大血管的剪切应力^[21]。

2.2 低氧下高代谢应激影响机制

血流限制训练闭塞肢体静脉的同时限制少量动脉血

液流入, 给肢体造就了缺氧环境增加细胞代谢压力。血流限制训练期间影响被限制肢体局部血流动力学信号、氧气和营养物质的输送, 代谢物质的积累和清除率; 刺激肌纤维的募集、激素的升高、血乳酸浓度积累刺激生长素释放; 细胞肿胀以及活性氧的增加, 低氧诱导代谢应激的增加是肌肉和血管发生变化的主要因素^[22]。较低的氧气交换引起缺氧代谢物质 (HIF) HIF-1 α 的积累, 主要调节细胞缺氧反应的基因表达, 激活血管内皮生长因子缺氧适应基因的转录, 从而调节血管内皮生长因子生成^[23]。研究认为低负荷的 BFRT 足以增大肌肉和血管反应^[24]。在缺氧缺血条件下肌肉质量和毛细血管生长与代谢活动成正比^[25]。与传统的阻力训练相比, 低负荷的血流限制训练在血管生成相关的基因表达增加更大, 可引发积极的血管适应^[23]。但受试者特征的差异和血流限制参差不齐的训练方案可能对血管反应产生不同影响^[26], 所以导致多数 BFRT 研究结果不一致。因此, 研究确保受试者之间身体素质水平一致和同等负荷的 BFR 训练对研究结果来说至关重要。但值得注意的是, 目前关于血流剪切应力在不同程度缺氧下对内皮功能影响的证据很薄弱。

2.3 血管内皮监测参数

2.3.1 血管内皮生长因子

血管内皮生长因子 (VEGF) 在缺氧状态下被激活, 主要诱导血管生成, 是一种重要的信号分子^[3]。VEGF 是血管内皮细胞 (EC) 的特异性丝裂原, 是血管生成过程中激活的主要介质之一, 是一种高度特异性的促进血管内皮细胞生长因子, 当人体损伤时 VEGF 可将内皮细胞募集到缺氧缺血部位并刺激其增殖, 具有诱导内皮细胞在血管生成中增殖、迁移、维持血管通透性的重要生理作用^[27]。VEGF 还可影响斑块新生血管形成, 从而影响动脉粥样硬化过程。

运动均可增加 VEGF 循环水平, 但传统的运动与 BFR 训练相比, BFR 训练后 VEGF 浓度更高^[28]。动物实验发现低负荷的血流限制有氧耐力运动对衰老大鼠的血管内皮生成明显高于单独的有氧运动, 可能存在的机制是 BFR 训练引起的低氧状态下运动过程中激活的氧敏感因子、血管内皮中的低氧反应组织相互关联并导致血管生成^[29]。因此, 这说明了 BFRT 更能增强血管生成的标志物水平, 所以本研究会重点关注 VEGF 对血流限制潜在信号的反应对血管健康产生的积极影响。

2.3.2 一氧化氮

一氧化氮 (nitric oxide, NO) 是内皮细胞分泌的血管保护、负责血管舒张调节的主要生化标志物^[30]。NO 具有调节血小板凝集和抑制嗜中性粒细胞的黏附或激活作用。血管内皮障碍和 NO 含量有直接联系, NO 的异常会增加动脉硬化、血栓形成、高血压等心血管疾病的发生^[31]。运动可以通过剪切应力和渗透压对脉管系统影响 NO 产生, 可增强抗氧化防御能力, 从而减少一氧化氮的降解, 而低负

荷的血流限制训练下增加血管的剪切应力以及缺氧可能会引起循环 VEGF 增加, 刺激一氧化氮释放引起血管舒张^[32]。

2.3.3 血流介导的扩张指数

临床上可以使用血流介导的扩张 (Flow Mediated Dilatation, FMD) 评估血管内皮功能^[33]。血流介导的扩张是一种根据肱动脉测量血管内皮细胞产生的 NO 导致的血管扩张水平来评估内皮功能的方法, 可发现早期血管疾病。FMD 升高代表动脉壁血管舒张功能的改善, 从而更好地调节血压^[34]。运动都会引起 FMD 增加, 但相比常规的运动血流限制训练更显著^[35]。低负荷血流限制阻力训练可以改善血流介导的扩张 (肱动脉结构改变), 表现为静息和最大内径的增加, 提示可能对血管产生积极影响^[36]。但在 BFR 运动停止后测量这些变化迅速恢复至基线水平, BFR 握力训练对血管内皮功能变化可能是瞬时效应^[37]。同样, PAIVA FM 等人研究探讨了 BFR 联合握力训练对健康青年男性血管内皮功能的急性影响主要发现: 无 BFR 握力训练后 15min FMD 升高, 60min 时恢复到接近基线水平, BFR 握力训练停止后没有发现 FMD 的增加^[38]。推测可能导致这些差异的原因是运动强度不足, 血流限制结合握力训练的强度可能并不足以引起血管的变化, 并且受试者是健康成年人所以可能也是没有变化的差异所在。血管功能评估包括内皮功能和血管生成, 二者是主要创建大血管和扩展外周血管的整个过程, 特别是关于 FMD 增加和血管僵硬, 这取决于训练的强度和类型, 血管内皮生成的表达因素尤其是 FMD 受环境、运动强度和类型影响^[39]。

3 血流限制训练对血管内皮功能的影响

3.1 在健康人群中的应用

血流限制训练研究多用于增长肌肉围度, 尤其是针对关节术后肌肉萎缩, 如 ACL 术后早期用于增加股四头肌肌力^[40]。但后来随着技术的成熟临床上也用于健康人群的血管方向的研究。ZHAO Y 等人发现血流限制训练可以改善健康年轻男性的血管内皮功能, 8 周的低强度血流限制训练 (65% 的压力值下 30% 的 1RM) 比 4 周的训练更能增加血管内皮生长因子和可溶性 VEGFR 的表达, 且血管内皮生长因子生成不是立即的^[41]。同样, MAGA M 的研究对 35 名健康年轻人在运动前和运动 20 分钟后通过监测血管生成标志物 VEGFR 来评估血管内皮功能, 结果发现运动均可刺激 VEGFR 的表达, 但与没有血流限制的训练相比, 低阻力 BFR 训练 (20%1RM) 可以更显著地刺激血管生成和改善内皮功能^[42]。Barjaste A 等人研究发现低强度的 BFR 结合步行训练在运动 3 小时后可以监测到 HIF1、VEGF 含量的增加, 在非 BFRT 组并没观察到显著变化^[43]。VOGEL J 的研究表明低负荷血流限制训练和高强度训练均可增加健康男性运动员的乳酸和 miRNA-143-3p (被认为在运动中有助于诱导的动脉生成), BFR 阻塞血管导致侧支血流量增加可作为动脉生成的外部刺激^[44]。但也有与此相反的结果,

这篇 meta 分析发现, 不超过 4 周的 BFR 训练在改善血管功能方面优于传统训练, 而大于 4 周的 BFRT 对血管内皮功能没有发现有显著改善^[45]。推测血管内皮生长因子时间差异和血流限制训练结果的差异的原因可能是因为目前血流限制训练形式并没有统一的标准, 袖带质量、袖带宽度、如何设定压力值、血管闭塞的时间、样本量大小、受试者年龄和肢体长度、运动形式、运动频率、运动强度、研究者对血流限制训练的熟悉程度等都是导致结果差异的因素^[46]。

初步发现 BFRT 在短期内 (4~8 周) 比高强度抗阻训练对血管生成更有效。因此, 可以确定的是, 在制定个性化的压力值下低负荷的血流限制训练不会对血管内皮功能造成明显损害, 至少对健康的群体来说是安全的^[47]。

3.2 血流限制在特殊人群中的应用

3.2.1 在老年人群中的应用

老年人随着年龄的增长血管功能下降, 为了降低老年人患心血管疾病的风险和提高生存质量, 对这类无法进行传统大负荷训练的人群来说, 在不造成继发性血管内皮损伤的情况下, 低负荷的血流限制训练是提高生存质量较为合适的训练形式^[48], 而且在老年人在选择血流限制训练时更应该关注对血管内皮的影响^[49]。BFR 训练诱导的低氧应激可调节血管内皮因子的分泌, BFR 训练引起的血管适应归因于代谢物的更多积累, SHIMIZU R^[50]等人的低强度的血流限制阻力训练可以改善 71 岁左右的老年人的血管内皮功能, 在监测心率和心电图下 40 名无运动习惯的健康老年人进行了 4 周的低强度 BFR 耐力训练, 评估了运动前后的 VEGF 水平和 von Willebrand 因子 (VWF) 和血栓调节蛋白 (TM) 的血清浓度, VWF、TM 分别作为鉴别血管内皮细胞功能和内皮细胞损伤的参数, 主要影响血小板黏附。结果显示, 受试者在训练过程中心率和心电图均未发现异常, BFR 组 4 周耐力训练后 VEGF 比训练前显著升高, VWF 较训练前显著降低, TM 则无显著变化。AMORIM S 等人发现^[51], 步行缓慢的老年人在进行了急性的低负荷的血流限制训练后 60 内测试动脉僵硬程度, 发现 BFR 和传统训练对动脉僵硬的结果一样, 低负荷血流限制训练并不会进一步损害这些人群的血管功能健康, 但长期训练结果是否只有好处需要进一步研究^[52]。

研究表明, 老年女性使用弹性血流限制带进行 12 周低强度深蹲和膝关节伸展训练增加了肌肉力量但并没有降低血管功能^[53]。14 名健康老年女性进行了 12 周低负荷血流限制训练发现血流动力学参数、动脉僵硬、血管内皮功能、凝血因子、肌肉损伤和氧化应激在实验期间没有变化。因此, BFR 训练在训练期间不会对心血管系统产生负面影响。

3.2.2 在心血管疾病人群中的应用

心血管的健康与我们的寿命有直接的联系, 日益增加

的心血管疾病在威胁人类。心血管疾病和全因死亡率联系紧密，内皮功能障碍是动脉粥样硬化的初期表现，低负荷的训练达到与高负荷训练相似的效果可能会增加训练者的依从性，血流限制训练不会引起全身反应，对外周动脉疾病患者改善血管内皮功能有效。低负荷的血流限制训练后 VEGF、一氧化氮和外周血管血流量明显增加，可以改善原发性高血压老年患者的血管内皮功能和血压，且在训练过程中没有发生不良反应^[54]。血流限制增加的剪切应力对血管内皮的改善只在局部有观察到，BFRT 期间较低的心肌细胞氧分压（氧气融入血液产生的张力）可诱导血管生成，并有助于毛细血管重建，从而使内皮功能障碍的患者受益^[55]。日本一项大型研究统计了超过 12 万受试者并没有发现血流限制训练会带来额外的脑出血、脑梗、血栓形成的风险，其中包括肥胖和心脑血管疾病患者^[56]。

2 型糖尿病患者规律的运动可以减缓疾病进展并降低心血管并发症的风险。血流限制可以改善血管顺应性，BFRT 可能引发微血管变化，促进合成代谢生长因子增加的代谢积累速度^[57]。血流限制结合有氧运动有效降低了 2 型糖尿病患者血糖。围绕运动期间，2 型糖尿病患者除了要监测血糖外还要注意血管病变的风险。高质量的 meta 分析表明在正确施加合理的压力值下，保证动脉不完全闭塞，低负荷的血流限制训练并不会增加糖尿病患者的总体风险^[58]。从最新的证据来看，低负荷的血流限制训练可以改善高血压、糖尿病患者的血压和血糖从而减轻血管负担，但目前特殊人群的血流限制训练多集中在增长肌肉质量方向，如果血流限制被证明可以刺激血管生成并改善内皮功能，那么 BFR 训练有望成为非重症心血管疾病患者通过体育锻炼进行康复的有用手段。但这类人群血流限制心血管研究指标证据并不充分。

4 结论与展望

在血流限制训练方案当中，在制定个性化的压力值下，低负荷的（20%~40%1RM）BFR 训练可能是改善健康人群血管内皮功能的最佳形式，大多研究 BFR 训练后对血管内皮因子生成的影响是急性的，尚需要长期的实验以获得 BFR 训练对血管内皮功能产生适应性的数据。

有限的证据表明在熟悉血流限制的潜在禁忌症，制定严格个性化、科学的血流限制运动处方，低负荷的血流限制训练可能会改善轻度基础疾病患者的血压和内皮功能，但还需要血流限制在血管内皮功能方面的大样本量的研究证明其安全性。未来，血流限制训练有望成为这类人群改善血管内皮功能的运动方式。

基金项目：广东省体育局科研课题，血流限制训练（BFR）结合超等长训练对运动员髌腱病康复疗效的影响（课题编号：GDSS2022N069）。

[参考文献]

[1] HUGHES L, PATON B, ROSENBLATT B, et al. Blood flow

restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: a systematic review and meta-analysis[J]. *Br J Sports Med*, 2017, 51(13): 1003-11.

[2] LIXANDRÃO 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): 361-78.

[3] CARMELIET P. Mechanisms of angiogenesis and arteriogenesis[J]. *Nat Med*, 2000, 6(4): 389-95.

[4] BOBES ÁLVAREZ C, ISSA-KHOZOUZ SANTAMARÍA P, FERNÁNDEZ-MATÍAS R, et al. Comparison of Blood Flow Restriction Training versus Non-Occlusive Training in Patients with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction or Knee Osteoarthritis: A Systematic Review[J]. *J Clin Med*, 2020, 10(1).

[5] WENGLE L, MIGLIORINI F, LEROUX T, et al. The Effects of Blood Flow Restriction in Patients Undergoing Knee Surgery: A Systematic Review and Meta-analysis[J]. *Am J Sports Med*, 2022, 50(10): 2824-33.

[6] BEAK H J, PARK W, YANG J H, KIM J. Effect of Low-Intensity Aerobic Training Combined with Blood Flow Restriction on Body Composition, Physical Fitness, and Vascular Responses in Recreational Runners[J]. *Healthcare (Basel)*, 2022, 10(9).

[7] 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): 173-7.

[8] AMORIM S, ROLNICK N, SCHOENFELD B J, AAGAARD P. Low-intensity resistance exercise with blood flow restriction and arterial stiffness in humans: A systematic review[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2021, 31(3): 498-509.

[9] 屈宝泽, 王化洲. 血管内皮功能与冠心病发生与发展[J]. *中国临床康复*, 2005(35): 132-4.

[10] WETTSCHURECK N, STRILIC B, OFFERMANN S. Passing the Vascular Barrier: Endothelial Signaling Processes Controlling Extravasation[J]. *Physiol Rev*, 2019, 99(3): 1467-525.

[11] LEUNG S W S, SHI Y. The glycolytic process in endothelial cells and its implications[J]. *Acta*

- Pharmacol Sin, 2022, 43 (2): 251-9.
- [12] LEE H W, SHIN J H, SIMONS M. Flow goes forward and cells step backward: endothelial migration[J]. *Exp Mol Med*, 2022, 54 (6): 711-9.
- [13] TRIMM E, RED-HORSE K. Vascular endothelial cell development and diversity[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2023, 20 (3): 197-210.
- [14] LI X, KUMAR A, CARMELIET P. Metabolic Pathways Fueling the Endothelial Cell Drive[J]. *Annu Rev Physiol*, 2019 (81): 483-503.
- [15] KINLAY S, LIBBY P, GANZ P. Endothelial function and coronary artery disease[J]. *Current opinion in lipidology*, 2001, 12 (4): 383-9.
- [16] BOCHENEK M L, SCHÄFER K. Role of Endothelial Cells in Acute and Chronic Thrombosis[J]. *Hamostaseologie*, 2019, 39 (2): 128-39.
- [17] DEANFIELD J E, HALCOX J P, RABELINK T J. Endothelial function and dysfunction: testing and clinical relevance[J]. *Circulation*, 2007, 115 (10): 1285-95.
- [18] 徐雁飞. 血流限制训练对人体血管功能影响的研究进展[Z]//中国班迪协会, 澳门体能协会, 广东省体能协会. 第七届中国体能训练科学大会论文集. 首都体育学院, 2022: 8.
- [19] 潘颖, 赵彦, 马晓媛, 等. 血流限制伴小强度抗阻运动对低体重女性骨骼肌微循环、神经肌肉激活及主观疲劳的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2019, 38 (8): 677-84.
- [20] HODGES G J, STEWART D G, DAVISON P J, CHEUNG S S. Episodic bouts of hyperaemia and shear stress improve arterial blood flow and endothelial function[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2018, 118 (4): 795-803.
- [21] DE OLIVEIRA M F, CAPUTO F, CORVINO R B, DENADAI B S. Short-term low-intensity blood flow restricted interval training improves both aerobic fitness and muscle strength[J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2016, 26 (9): 1017-25.
- [22] PEARSON S J, HUSSAIN S R. A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy[J]. *Sports Med*, 2015, 45 (2): 187-200.
- [23] VOLGA FERNANDES R, TRICOLI V, GARCIA SOARES A, et al. Low-Load Resistance Exercise with Blood Flow Restriction Increases Hypoxia-Induced Angiogenic Genes Expression[J]. *J Hum Kinet*, 2022 (84): 82-91.
- [24] 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.
- [25] JOSHI S, MAHONEY S, JAHAN J, et al. Blood flow restriction exercise stimulates mobilization of hematopoietic stem/progenitor cells and increases the circulating ACE2 levels in healthy adults[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2020, 128 (5): 1423-31.
- [26] SCOTT B R, LOENNEKE J P, SLATTERY K M, DASCOMBE B J. Exercise with blood flow restriction: an updated evidence-based approach for enhanced muscular development[J]. *Sports Med*, 2015, 45 (3): 313-25.
- [27] KRÜGER-GENGE A, BLOCKI A, FRANKE R P, JUNG F. Vascular Endothelial Cell Biology: An Update[J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 20 (18).
- [28] MAGA M, WACHSMANN-MAGA A, BATKO K, et al. Impact of Blood-Flow-Restricted Training on Arterial Functions and Angiogenesis-A Systematic Review with Meta-Analysis[J]. *Biomedicines*, 2023, 11 (6).
- [29] NADERI-BOLDAJI V, JOUKAR S, NOORAFSHAN A, et al. The effect of blood flow restriction along with low-intensity exercise on cardiac structure and function in aging rat: Role of angiogenesis[J]. *Life Sci*, 2018 (209): 202-9.
- [30] 张会会, 雷涛. 糖尿病早期血管内皮功能测定的研究进展[J]. *中国糖尿病杂志*, 2023, 31 (10): 791-4.
- [31] CYR A R, HUCKABY L V, SHIVA S S, ZUCKERBRAUN B S. Nitric Oxide and Endothelial Dysfunction[J]. *Crit Care Clin*, 2020, 36 (2): 307-21.
- [32] 刘申, 王硕, 姬卫秀. 加压训练的应用及限制研究进展[J]. *中国康复医学杂志*, 2022, 37 (3): 421-6.
- [33] HEADLAND M L, CLIFTON P M, KEOGH J B. Effect of Intermittent Energy Restriction on Flow Mediated Dilatation, a Measure of Endothelial Function: A Short Report[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15 (6).
- [34] 方砚, 王效浣, 郭朝霞. 血流介导性血管扩张评价心血管病患者肱动脉内皮功能的研究进展[J]. *心血管病学进展*, 2019, 40 (5): 793-6.
- [35] CREDEUR D P, HOLLIS B C, WELSCH M A. Effects of handgrip training with venous restriction on brachial artery vasodilation[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2010, 42 (7): 1296-302.
- [36] MAGA M, SCHÖNBORN M, WACHSMANN-MAGA A, et al. Stimulation of the Vascular Endothelium and Angiogenesis by Blood-Flow-Restricted Exercise [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19 (23).
- [37] HUNT J E, WALTON L A, FERGUSON R A. Brachial

- artery modifications to blood flow-restricted handgrip training and detraining[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2012, 112(6):956-61.
- [38] PAIVA F M, VIANNA L C, FERNANDES I A, et al. Effects of disturbed blood flow during exercise on endothelial function: a time course analysis[J]. *Braz J Med Biol Res*, 2016, 49(4):5100.
- [39] PEREIRA-NETO E A, LEWTHWAITE H, BOYLE T, et al. Effects of exercise training with blood flow restriction on vascular function in adults: a systematic review and meta-analysis[J]. *PeerJ*, 2021(9):11554.
- [40] LAPRADE R F, MONSON J K, SCHOENECKER J. Editorial Commentary: Blood Flow Restriction Therapy Continues to Prove Effective[J]. *Arthroscopy*, 2021, 37(9):2870-2.
- [41] ZHAO Y, LIN A, JIAO L. Eight weeks of resistance training with blood flow restriction improve cardiac function and vascular endothelial function in healthy young Asian males[J]. *International Health*, 2021, 13(5):471-9.
- [42] MAGA M, SCHÖNBORN M, WACHSMANN-MAGA A, et al. Stimulation of the Vascular Endothelium and Angiogenesis by Blood-Flow-Restricted Exercise[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(23).
- [43] BARJASTE A, MIRZAEI B, RAHMANI-NIA F, et al. Concomitant aerobic-and hypertrophy-related skeletal muscle cell signaling following blood flow-restricted walking[J]. *Science & Sports*, 2021, 36(2):51-8.
- [44] VOGEL J, NIEDERER D, ENGEROFF T, et al. Effects on the profile of circulating miRNAs after single bouts of resistance training with and without blood flow restriction—a three-arm, randomized crossover trial[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(13):3249.
- [45] LIU Y, JIANG N, PANG F, CHEN T. Resistance Training with Blood Flow Restriction on Vascular Function: A Meta-analysis[J]. *Int J Sports Med*, 2021, 42(7):577-87.
- [46] HUNT J E, STODART C, FERGUSON R A. The influence of participant characteristics on the relationship between cuff pressure and level of blood flow restriction[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2016, 116(7):1421-32.
- [47] MILLER B C, TIRKO A W, SHIPE J M, et al. The Systemic Effects of Blood Flow Restriction Training: A Systematic Review[J]. *Int J Sports Phys Ther*, 2021, 16(4):978-90.
- [48] EARLY K S, ROCKHILL M, BRYAN A, et al. EFFECT OF BLOOD FLOW RESTRICTION TRAINING ON MUSCULAR PERFORMANCE, PAIN AND VASCULAR FUNCTION[J]. *Int J Sports Phys Ther*, 2020, 15(6):892-900.
- [49] AMORIM S, DEGENS H, PASSOS GASPAR A, DE MATOS L. The Effects of Resistance Exercise With Blood Flow Restriction on Flow-Mediated Dilation and Arterial Stiffness in Elderly People With Low Gait Speed: Protocol for a Randomized Controlled Trial[J]. *JMIR Res Protoc*, 2019, 8(11):14691.
- [50] SHIMIZU R, HOTTA K, YAMAMOTO S, et al. 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*, 2016, 116(4):749-57.
- [51] AMORIM S, GASPAR A P, DEGENS H, et al. The Effect of a Single Bout of Resistance Exercise with Blood Flow Restriction on Arterial Stiffness in Older People with Slow Gait Speed: A Pilot Randomized Study[J]. *J Cardiovasc Dev Dis*, 2022, 9(3).
- [52] HEITKAMP H C. Training with blood flow restriction. Mechanisms, gain in strength and safety[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2015, 55(5):446-56.
- [53] SCOTT B R, PEIFFER J J, THOMAS H J, et al. Hemodynamic Responses to Low-Load Blood Flow Restriction and Unrestricted High-Load Resistance Exercise in Older Women[J]. *Front Physiol*, 2018(9):1324.
- [54] 马晓缓, 赵彦, 郑玉婵. 加压训练对高血压患者血管内皮功能的影响[J]. *湖北体育科技*, 2021, 40(4):341-4.
- [55] BARILI A, CORRALO V D S, CARDOSO A M, 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):1099-109.
- [56] CRISTINA-OLIVEIRA M, MEIRELES K, SPRANGER M D, et al. Clinical safety of blood flow-restricted training? A comprehensive review of altered muscle metaboreflex in cardiovascular disease during ischemic exercise[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2020, 318(1):90-109.
- [57] LI S, LI S, WANG L, et al. The Effect of Blood

Flow Restriction Exercise on Angiogenesis-Related Factors in Skeletal Muscle Among Healthy Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis[J].*Front Physiol*,2022 (13):814965.

[58]SAATMANN N, ZAHARIA O P, LOENNEKE J P, et al. Effects of Blood Flow Restriction Exercise and Possible Applications in Type 2 Diabetes[J].*Trends Endocrinol Metab*,2021, 32(2):106-17.

作者简介：区子藤（1996—），女，汉族，广西梧州人，硕士在读，广州体育学院，研究方向：运动损伤的预防与康复；李文静（1999—），女，汉族，重庆人，硕士在读，广州体育学院，研究方向：运动损伤的预防与康复；孟静怡（1998—），女，汉族，河南驻马店，硕士在读，广州体育学院，研究方向：运动损伤的预防与康复；*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：运动损伤的预防与康复。