

## 低负荷血流限制和高强度抗阻运动对男性运动青年大腿微循环功能的影响

彭永<sup>1</sup>, 胡江平<sup>2</sup>, 朱欢<sup>1</sup><https://doi.org/10.12307/2025.233>

投稿日期: 2023-12-15

采用日期: 2024-01-31

修回日期: 2024-03-04

在线日期: 2024-03-25

中图分类号:

R459.9; R318; R319

文章编号:

2095-4344(2025)02-00393-09

文献标识码: A

## 文章快速阅读: 不同运动方式对运动型男性青年大腿微循环功能的影响

## 研究对象:

60名体育专业大学生, 采用随机数表法分为3组, 每组20人。

## 分组与干预:

- 对照组: 不进行任何形式的运动训练;
- 高强度抗阻组: 进行6周, 每周3次, 每次90 min, 抗阻强度为70%1RM的杠铃深蹲和负重弓步蹲训练;
- 低负荷血流限制组: 受试者(采用袖带加压, 压力相当于动脉闭塞的60%)进行6周, 每周3次, 每次90 min, 抗阻强度为30%1RM的杠铃深蹲和负重弓步蹲训练。

## 结论:

低负荷血流限制运动和高强度抗阻运动均能提高大腿微循环功能, 其机制可能与血管内皮功能的增强有关, 且低负荷血流限制运动对微血管血流灌注量、血细胞移动速度的干预效果更佳。

测试时间: 在干预开始的前1 d以及6周干预结束后的次日晨起空腹状态下。

测试指标: 微血管血流灌注量、血细胞移动速度、血细胞浓度、经皮氧分压、肌氧饱和度、内皮素1、内皮细胞生长因子、一氧化氮、内皮型一氧化氮合酶、大腿围和大腿肌肉力量。

## 文题释义:

微循环: 是指微动脉和微静脉之间的血液循环, 是血液与组织细胞进行物质交换的场所。

血流限制训练: 又称加压训练, 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绷带)对肢体(上肢或下肢)近端进行外部加压, 使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训练方法。

## 摘要

背景: 微循环作为人体物质能量代谢交换的唯一场所, 与人体运动能力密切相关。抗阻运动是提高微循环功能的有效方式, 但也有研究指出血流限制训练也能提高微循环功能, 且具有负荷小和安全性高等优点。

目的: 比较6周低负荷血流限制运动、高强度抗阻运动对运动型男性青年大腿微循环功能的影响, 并从血管内皮功能角度探讨运动改善微循环功能的可能机制。

方法: 将湖北民族大学60名体育专业男性大学生按照随机数表法分为对照组、高强度抗阻运动组和低负荷血流限制运动组, 每组20人。低负荷血流限制运动组进行6周(每周3次、每次90 min、运动强度为30%1RM)的低负荷血流限制运动; 高强度抗阻运动组进行6周(每周3次、每次90 min、运动强度为70%1RM强度)的抗阻训练; 对照组该时间段不进行任何形式的运动训练。分别在干预开始的前1 d以及6周干预结束后次日的晨起空腹状态下对3组受试者微血管血流灌注量、经皮氧分压、肌氧饱和度、一氧化氮、内皮型一氧化氮合酶、内皮素1、血管内皮细胞生长因子及大腿围、肌力等指标进行测试。

结果与结论: ①运动干预后, 低负荷血流限制运动组和高强度抗阻运动组的微血管血流灌注量加热值、血细胞移动速度加热值与对照组及运动干预前相比有显著差异( $P < 0.05$ ); 低负荷血流限制运动组微血管血流灌注量加热值、血细胞移动速度加热值与高强度抗阻运动组相比有显著差异( $P < 0.05$ ); 经皮氧分压和肌氧饱和度与干预前相比有显著性差异( $P < 0.05$ )。②运动干预后, 低负荷血流限制运动组和高强度抗阻运动组一氧化氮、内皮型一氧化氮合酶、内皮素1、血管内皮细胞生长因子与对照组及运动干预前相比有显著差异( $P < 0.05$ )。③运动干预后, 低负荷血流限制运动组和高强度抗阻运动组大腿围和大腿肌肉力量与运动干预前相比有显著差异( $P < 0.05$ )。④上述结果证实, 6周低负荷血流限制运动和高强度抗阻运动可能通过调节内皮型一氧化氮合酶、内皮素1、血管内皮细胞生长因子等血管因子的分泌, 提高体育专业大学生大腿微循环功能, 并增加大腿肌肉的收缩力量, 且低负荷血流限制运动对微血管血流灌注量、血细胞移动速度的干预效果更佳, 因此低负荷血流限制运动较高强度抗阻运动在提高微循环功能方面更具优势。

关键词: 低负荷血流限制; 高强度抗阻; 微循环功能; 肌肉力量; 微血管血流灌注量; 经皮氧分压; 肌氧饱和度; 一氧化氮; 内皮素1; 血管内皮生长因子

## Effects of low-load blood flow restriction exercise and high-intensity resistance exercise on the thigh microcirculation function of athletic young men

Peng Yong<sup>1</sup>, Hu Jiangping<sup>2</sup>, Zhu Huan<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Physical Education, Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei Province, China; <sup>2</sup>School of Physical Education, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

Peng Yong, PhD candidate, Lecturer, School of Physical Education, Hubei Minzu University, Enshi 445000, Hubei Province, China

Corresponding author: Hu Jiangping, PhD candidate, Associate professor, School of Physical Education, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China

<sup>1</sup>湖北民族大学体育学院, 湖北省恩施市 445000; <sup>2</sup>广西民族师范学院体育学院, 广西壮族自治区崇左市 532200

第一作者: 彭永, 男, 1991年生, 山东省临沂市人, 汉族, 俄罗斯圣彼得堡彼得大帝理工大学在读博士, 讲师, 主要从事血流限制训练研究。

通讯作者: 胡江平, 菲律宾亚当森大学在读博士, 副教授, 广西民族师范学院体育学院, 广西壮族自治区崇左市 532200

<https://orcid.org/0000-0001-5980-9742>(彭永)

基金资助: 湖北省教育厅哲学社会科学项目(22Q145), 项目负责人: 彭永; 恩施州科技计划项目(E20220009), 项目负责人: 彭永

引用本文: 彭永, 胡江平, 朱欢. 低负荷血流限制和高强度抗阻运动对男性运动青年大腿微循环功能的影响[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(2):393-401.



## Abstract

**BACKGROUND:** Microcirculation, as the only place for the energy metabolism of body substances, is closely related to the human movement ability. Resistance exercise is an effective way to improve the function of microcirculation, but some studies have also pointed out that blood flow restriction exercise can also improve the function of microcirculation and has the advantages of small load and high safety.

**OBJECTIVE:** To compare the effects of 6-week low-load blood flow restriction exercise and high-intensity resistance exercise on the thigh microcirculation function of athletic young men, and to explore the possible mechanism by which exercises improve microcirculation function from the perspective of vascular endothelial function.

**METHODS:** Sixty sports students from Hubei Minzu University were divided into control group, high-intensity resistance exercise group and low-load blood flow restriction exercise group according to the random number table method, with 20 students in each group. The low-load blood flow restriction exercise group performed a low-load blood flow restriction exercise for 6 weeks (three times a week, 90 minutes each, at an exercise intensity of 30% 1RM). The high-intensity resistance exercise group received a high-intensity resistance exercise for 6 weeks (three times a week, 90 minutes each, at an exercise intensity of 70% 1RM). The control group did not perform any form of exercise training during this period. Microcirculatory blood perfusion, transcutaneous partial pressure, muscle oxygen saturation, nitric oxide, endothelial nitric oxide synthase, endothelin 1, vascular endothelial cell growth factor, thigh circumference, and muscle strength were tested in each group on the day before the intervention and the morning after the end of the 6-week intervention.

**RESULTS AND CONCLUSION:** After the exercise intervention, heating values of microcirculatory blood flow perfusion and blood cell movement speed in the low-load blood flow restriction exercise group and the high-intensity resistance exercise group were significantly different from those in the control group and before the exercise intervention ( $P < 0.05$ ). The heating values of microcirculatory blood flow perfusion and blood cell movement speed showed significant differences between the low-load blood flow restriction exercise group and the high-intensity resistance exercise group ( $P < 0.05$ ). After the exercise intervention, the levels of nitric oxide, endothelial nitric oxide synthase, endothelin 1, and vascular endothelial cell growth factor were significantly different in the low-load blood flow-limiting exercise group and the high-intensity resistance exercise group compared with the control group and the pre-exercise intervention ( $P < 0.05$ ). After the exercise intervention, thigh circumference and thigh muscle strength were significantly different in low-load blood flow restriction group and high-intensity resistance exercise groups compared with the pre-exercise intervention ( $P < 0.05$ ). All these findings indicate that 6-week low-load blood flow restriction exercise and high intensity resistance exercise may regulate the secretion of vascular factors such as endogenous nitric oxide synthase, endothelin-1 and vascular endothelial growth factor to improve the function of thigh microcirculation and increase the contractile strength of the thigh muscle. In addition, And low-load blood flow restriction exercise has better intervention effects on microcirculatory blood perfusion volume and blood cell movement speed, so low-load blood flow restriction exercise is more advantageous than high-intensity resistance exercise in improving microcirculation function.

**Key words:** low-load blood flow restriction; high-intensity resistance; microcirculation function; muscle strength; microcirculatory blood flow perfusion; percutaneous oxygen partial pressure; muscle oxygen saturation; nitric oxide; endothelin 1; vascular endothelial growth factor

**Funding:** Philosophy and Social Science Research Project of Hubei Provincial Department of Education, No. 22Q145 (to PY); Science and Technology Program Project of Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, No. E20220009 (to PY)

**How to cite this article:** PENG Y, HU JP, ZHU H. Effects of low-load blood flow restriction exercise and high-intensity resistance exercise on the thigh microcirculation function of athletic young men. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2025;29(2):393-401.

## 0 引言 Introduction

微循环是人体输送氧气和营养物质的基本结构,能将细胞代谢产生的废物排出体外,有助于调节血液分配到新陈代谢活跃的组织,特别是运动时工作的骨骼肌<sup>[1]</sup>。因此,提高微循环功能能增强骨骼肌能量代谢水平,进而提升运动过程中骨骼肌对运动负荷的适应能力。抗阻运动作为提高骨骼肌功能的有效方式,已在体育领域广泛应用。研究表明,抗阻运动能通过改善微循环血流动力学、促进血管增生等途径提高微循环功能,增强肌肉功能<sup>[2-3]</sup>。

随着血流限制技术在运动训练中的应用,有研究指出血流限制抗阻运动也能显著提高骨骼肌微循环功能,且相比于传统的抗阻运动具有负荷小及安全性高等优点<sup>[4]</sup>。血流限制作为一种新的训练方式,是指将血流限制带(或袖带)放置在四肢(手臂或腿部)近端,使用加压空气泵来限制静脉从骨骼肌流出,同时保持动脉流入,达到限制血流的目的<sup>[5]</sup>。在血流限制过程中会产生缺血和缺氧的肌肉环境,从而导致高水平的代谢应激。当血流限制与运动同时使用时,会造成机械张力进一步增加,使肌肉缺血和缺氧程度加剧<sup>[6]</sup>。当血流压力释放之后,由于二氧化碳、乳酸及腺苷等代谢物质的刺激会使血管发生舒张反应,尤其是起到强烈的舒血管效应。这些代谢产物易透过细胞膜弥散到细胞间隙,作用于阻力血管平滑肌,产生强烈的扩血管作用,促使微血管发生舒张反应,增大血管

的血流量,以此来清除加压训练过程中产生的代谢废物,以及为缺血缺氧的肌细胞提供更充足的氧气和营养物质。在反复的缺血缺氧以及再灌注刺激下,会使微血管静脉顺应性、壁张力以及内皮细胞剪切应力增大,促进微血管内皮细胞生长因子表达以及调节一氧化氮/内皮素1水平,进而提高微循环功能<sup>[7]</sup>。血管内皮细胞生长因子是一种特异的、强烈的血管内皮细胞促分裂因子和血管生成因子,具有促进内皮细胞生长、增大微血管密度等功能<sup>[8]</sup>。一氧化氮是一种强效的血管舒张因子,内皮素1是体内最强的血管收缩因子,其与一氧化氮浓度的平衡对血管张力及血流量的维持有着重要的意义,因此提高一氧化氮/内皮素1水平能增强血管舒张功能,改善微血管血流灌注量<sup>[9]</sup>。

虽然目前已有学者对血流限制训练与微循环功能的关系进行研究,但研究成果较少,血流限制训练是否能提高微循环功能以及较传统抗阻运动具有更佳的干预效应尚不明确。另外,相关研究主要是从血流动力学角度评价人体微循环功能<sup>[2, 4, 10]</sup>,少有研究从血流营养状态和细胞氧合状态角度进一步评价微循环功能。血流限制训练提高微循环功能的机制可能与促进内皮细胞生长因子及一氧化氮等因子的释放有关,但目前相关研究较少且主要集中在一次性和短期低负荷血流限制训练对相关因子的干预研究,其研究重点是观察血管因子对血流限制训练的急性反应特征<sup>[11-12]</sup>。与单次或短期干预中内皮细

胞对血流剪切应力的反应不同,长期干预下内皮细胞可能会对血流剪切应力产生适应性。内皮细胞对血流剪切应力的刺激反应是调节内皮细胞释放一氧化氮及内皮素 1 等血管因子的动力,当长期干预使内皮细胞对血流剪切应力的刺激适应后,其释放血管因子的种类和剂量将与单次干预不同<sup>[13]</sup>,因此探讨长期干预下内皮细胞释放血管因子的种类和剂量有助于深入揭示血流限制训练改善微循环功能的机制。

基于此,此课题组通过对体育专业大学生进行为期 6 周的低负荷血流限制训练、高强度抗阻训练,比较不同抗阻运动方式对体育专业大学生微循环功能及肌肉力量的影响,并将微血管血流灌注量与经皮氧分压、肌氧饱和度相结合共同评价微循环功能,进而从血流动力学、血流营养状态即细胞氧合状态等角度科学评价微循环功能。另外,课题组还将从一氧化氮、内皮素 1 及内皮细胞生长因子等因子角度探讨低负荷血流限制训练改善体育专业大学生微循环功能的机制。

## 1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 随机对照试验,单因素方差分析,配对样本 *t* 检验。

1.2 时间及地点 试验于 2021-09-13/10-24 在湖北民族大学体适能训练中心完成。

1.3 对象 试验方案于 2021-09-05 获得湖北民族大学生物医学伦理委员会批准(审批编号:HBMZDX2021043)。

1.3.1 纳入标准 选择湖北民族大学 2021 级体育专业健康男学生。所有受试者试验前均签署由课题组制定的书面知情同意书。

1.3.2 排除标准 ①有肝病、肾病等慢性疾病;②有运动损伤和手术史;③有皮肤类和心血管类疾病,近半年服用影响皮肤血管舒张功能的药物;④有高血压,尤其是舒张压高于 90 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa);⑤力量基础较差,不能承受一定的运动负荷。

1.3.3 脱落标准 ①试验组受试者未能完成 90% 以上训练次数者;②试验期间对训练内容有明显不适;③服用影响血管收缩或舒张的药物;④其他不符合纳入标准的情况或受试者自愿退出试验。

1.3.4 样本量估算 应用 Gpower 软件,设置 Power=0.8,  $\alpha=0.05$ ,组数为 3 组,最终估算出样本总量约 60 名,每组 20 名。经过筛选共纳入 60 名男学生为研究对象,采用随机数表法将受试对象分为低负荷血流限制运动组、高强度抗阻运动组和对照组,每组 20 名。

### 1.4 方法

1.4.1 训练方法 低负荷血流限制运动组受试者进行 6 周、每周 3 次、每次 90 min、抗阻强度为 30%1RM 的杠铃深

蹲和负重弓步蹲训练(包括 15 min 准备活动和 15 min 放松活动),2 次训练时间间隔不低于 48 h,训练强度参考 COOK 等<sup>[14-15]</sup>制定的训练方法,每个动作完成 3 组训练,每组完成 10 次,每次组间休息 1 min,每个动作之间休息 3 min。血流限制训练采用袖带加压(日本 KAATSU Master 公司),袖带宽 5 cm,用卷尺测量腹股沟到髌骨上缘的距离,在腹股沟下缘 1/3 的地方使用加压袖带进行捆绑,并与大腿纵轴垂直<sup>[16]</sup>。压力大小根据 LOENNEKE 等<sup>[17]</sup>所绘制的血流阻塞与大腿围关系对应表进行设定,见表 1。该方法使用的血流限制压力相当于动脉闭塞的 60%。

表 1 | 血流限制训练的压力对照表

Table 1 | Pressure control table for blood flow restriction training

| 大腿周长         | 动脉闭塞压 60% |
|--------------|-----------|
| < 45-50.9 cm | 16 kPa    |
| 51-55.9 cm   | 20 kPa    |
| 56-59.9 cm   | 24 kPa    |
| ≥ 60 cm      | 28 kPa    |

表注:大腿周长的测量点在腹股沟下缘到髌骨上缘连线的上 1/3 处。

高强度抗阻运动组进行 6 周、每周 3 次、每次 90 min、抗阻强度为 70%1RM 的杠铃深蹲和负重弓步蹲训练(包括 15 min 准备活动和 15 min 放松活动),2 次训练时间间隔不低于 48 h,训练强度参考 COOK 等<sup>[14-15]</sup>所制定的训练方法,每个动作完成 3 组训练,每组完成 10 次,每次组间休息 1 min,每个动作之间休息 3 min。对照组学生该时间段不进行任何形式的运动训练。

除上述训练内容的差异外,通过携带心率表及计步器记录保证 3 组受试者其他时间体力活动的量与强度基本保持一致。运动干预点设置在湖北民族大学体适能训练研究中心。干预期间,3 组受试者各课程由相同的教师组进行教学,上课内容、运动强度和运动量基本一致。

1.4.2 试验质量与运动风险控制 ①全部受试者均是大学一年级、同一个专业学生,所学课程均一致,且由相同的教师组教学;②运动干预均在同一时间段进行(下午 4:30-6:00),每次运动时有专业医生在现场进行医务监督;③干预前和干预后指标的采集均在湖北民族大学运动生理学实验室完成,测试状态为晨起空腹,采集时间均在上午 7:00 开始,且由同一专业医生和教师负责进行采集;④在整个试验期间,所有学生的健康状况及生活习惯均符合试验标准。

1.5 主要观察指标 在干预开始的前 1 d 以及干预结束后的第 2 天晨起空腹状态下采集所有受试者右臂肱静脉 5 mL 全血,采用 3 000 r/min 离心 15 min,离心后取血清,储存于 -80 °C 冰箱保存。同时分别测试 3 组受试者右腿微循环功能、大腿维度和大腿肌肉力量,所有测试指标采用双盲法。

**1.5.1 微循环功能** 该评价采用微血管血流灌注量 (microcirculatory blood perfusion, MBP), 经皮血氧分压 (TcPO<sub>2</sub>) 和肌氧饱和度 (SmO<sub>2</sub>) 指标相结合, 其中 MBP= 血细胞移动速度 × 血细胞浓度 /100, 单位为 PU, 测试状态包括基础值和加热后值 (44 °C)。MBP、TcPO<sub>2</sub> 测试仪器为双通道激光多普勒血流检测仪 (PF6000, 瑞典), 测试部位为大腿腹股沟至髌骨上缘 1/3 处<sup>[16]</sup>。SmO<sub>2</sub> 测试仪器为近红外光谱无线肌氧检测仪 (美国 Moxy 公司), 测试部位同 MBP。

主要观察的微循环功能指标包括微血管血流灌注量基础值 (PU)、血细胞浓度基础值 (比值)、血细胞移动速度基础值 (比值)、微血管血流灌注量加热值 (PU)、血细胞浓度加热值、血细胞移动速度加热值、经皮氧分压 (kPa) 和肌氧饱和度 (%)。

**1.5.2 血液指标检测** 所有血液指标检测均在南京建成生物有限公司完成。其中内皮素 1、血管内皮细胞生长因子采用 ELISA 法测定 (DG5033A ELISA 仪, 华东电子有限公司, 南京); 一氧化氮和内皮型一氧化氮合酶均采用硝酸还原酶法测定, 仪器为 ZD-6A 自动硝酸还原酶仪 (中国检测联盟, 北京)。

**1.5.3 大腿围及大腿肌肉力量测量** 大腿围使用 Homeglen 测量尺进行测量, 测试部位为大腿腹股沟至髌骨上缘 1/3 处。大腿肌肉力量使用 Micro FET3 便携式数字化肌力与脊柱关节活动度测量仪 (Hoggan, 美国) 进行测试, 共测试 3 次, 每次测试完成休息 1 min 进行下一次测试, 然后取 3 次平均值作为最后的测试值。测试时被测者仰卧位, 双手自然放松放在身体两侧, 手掌朝上; 被测者非测试腿屈膝脚跟至测试腿膝关节处; 测试者靠近被测者近端的手臂穿过测试腿腘窝, 并将手掌握住屈膝腿膝关节处支撑; 测试者靠近被测者远端的手拿测量仪放于被测者胫骨远端; 被测者发力约 4 s, 测试者抵抗并读出数据。

**1.6 统计学分析** 使用 SPSS 25.0 软件对统计的数据进行整理分析, 数据在统计前先采用 Shapiro-Wilk 方法进行正态分布检验, 所有数据均为正态分布数据, 结果以  $\bar{x} \pm s$  表示。同一时间组间比较采用单因素的方差分析, 事后检验采用 Bonferroni 法; 同一组试验前后的比较采用配对 *t* 检验。  $P < 0.05$  为差异有显著性意义。

## 2 结果 Results

**2.1 受试者数量分析** 共 60 名男学生为该研究的受试者, 均是在严格控制的情况下进行的训练, 所以各组均没有试验对象脱落。

**2.2 试验流程图** 根据试验流程的先后顺序, 制作了试验流程图, 见图 1。

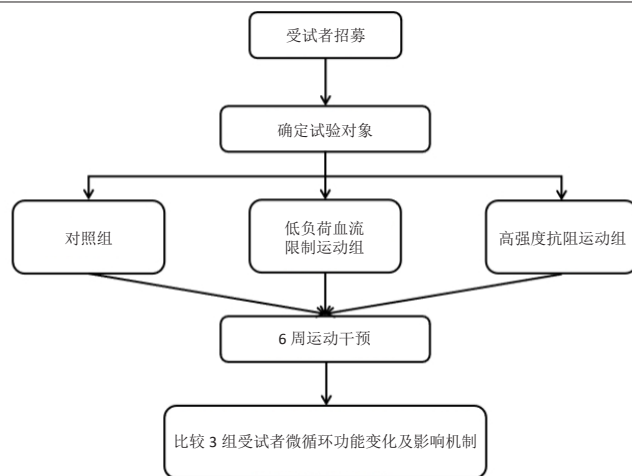


图 1 | 试验干预流程图  
Figure 1 | Trial flow chart

**2.3 受试者基线资料** 受试者均为男性, 年龄 19–20 岁, 身体健康状况良好, 有运动基础, 可以承受一定的运动负荷, 且无手术史和疾病。由表 2 可知, 3 组受试者试验前年龄、身高、体质量和体质量指数均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 | 受试者基本临床资料  
Table 2 | Clinical data of the subjects

| 组别         | 年龄 (岁)     | 身高 (m)    | 体质量 (kg)   | 体质量指数 (kg/m <sup>2</sup> ) |
|------------|------------|-----------|------------|----------------------------|
| 对照组        | 19.22±0.43 | 1.75±0.06 | 65.34±5.53 | 21.29±1.00                 |
| 高强度抗阻运动组   | 19.33±0.49 | 1.73±0.05 | 65.84±6.12 | 22.08±1.56                 |
| 低负荷血流限制运动组 | 19.44±0.51 | 1.76±0.05 | 67.79±5.17 | 21.95±1.76                 |
| <i>P</i> 值 | 0.382      | 0.138     | 0.391      | 0.235                      |

**2.4 干预前后各组受试者微循环功能变化** 见表 3。组间比较结果显示: 运动干预前各组各指标相互间差异无显著性意义; 运动干预后高强度抗阻运动组和低负荷血流限制运动组的微血管血流灌注量加热值、血细胞移动速度加热值与对照组相比均有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 干预后低负荷血流限制运动组微血管血流灌注量加热值、血细胞移动速度加热值显著高于高强度抗阻运动组 ( $P < 0.05$ )。组内比较结果显示: 运动干预后高强度抗阻运动组和低负荷血流限制运动组的微血管血流灌注量加热值、血细胞移动速度加热值、经皮氧分压和肌氧饱和度与干预前相比均有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 低负荷血流限制运动组的血细胞浓度与干预前相比有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 干预前后对照组各指标差异无显著性意义。

**2.5 干预前后各组受试者血液细胞因子水平的变化** 见表 4。组间比较结果显示: 运动干预前各组各指标相互间差异无显著性意义; 运动干预后高强度抗阻运动组和低负荷血流限制运动组的一氧化氮、内皮型一氧化氮合酶、内皮素 1、血管内皮细胞生长因子水平与对照组相比均有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 干预后高强度抗阻运动组和低负荷

表 3 | 干预前后各组受试者微循环功能的比较 ( $\bar{x}\pm s$ ,  $n=20$ )  
Table 3 | Comparison of microcirculation function in the three groups before and after intervention

| 指标               | 组别         | 干预前          | 干预后                         | 组内比较<br>P 值 | 组间比较 P 值 |       |
|------------------|------------|--------------|-----------------------------|-------------|----------|-------|
|                  |            |              |                             |             | 干预前      | 干预后   |
| 微血管血流灌注量基础值 (PU) | 对照组        | 7.40±2.07    | 7.91±2.17                   | 0.222       | 0.829    | 0.628 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 7.68±2.37    | 7.74±2.25                   | 0.883       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 7.25±2.02    | 7.21±2.30                   | 0.952       |          |       |
| 血细胞浓度基础值 (比值)    | 对照组        | 65.66±22.20  | 69.09±17.93                 | 0.198       | 0.824    | 0.844 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 69.26±17.58  | 69.47±16.00                 | 0.968       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 67.91±17.70  | 66.51±15.71                 | 0.800       |          |       |
| 血细胞移动速度基础值 (比值)  | 对照组        | 11.32±1.28   | 11.49±1.97                  | 0.752       | 0.874    | 0.775 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 11.18±2.30   | 11.16±1.86                  | 0.972       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 10.95±2.69   | 10.96±2.83                  | 0.996       |          |       |
| 微血管血流灌注量加热值 (PU) | 对照组        | 90.87±26.05  | 91.00±28.09                 | 0.977       | 0.978    | 0.010 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 92.28±29.17  | 113.14±26.89 <sup>abc</sup> | 0.002       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 90.26±31.94  | 122.81±36.31 <sup>ab</sup>  | 0.001       |          |       |
| 血细胞浓度加热值         | 对照组        | 193.72±51.94 | 194.94±51.94                | 0.910       | 0.979    | 0.662 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 192.83±51.68 | 209.11±46.25                | 0.051       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 190.33±50.27 | 205.50±46.95 <sup>a</sup>   | 0.001       |          |       |
| 血细胞移动速度加热值       | 对照组        | 46.87±4.40   | 48.40±6.31                  | 0.131       | 0.919    | 0.001 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 47.53±4.21   | 54.25±5.52 <sup>abc</sup>   | 0.001       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 46.58±5.72   | 59.31±6.83 <sup>ab</sup>    | 0.001       |          |       |
| 经皮氧分压 (kPa)      | 对照组        | 8.96±0.84    | 8.99±0.80                   | 0.818       | 0.659    | 0.094 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 8.81±0.89    | 9.57±0.92 <sup>a</sup>      | 0.001       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 8.68±1.01    | 9.63±1.14 <sup>a</sup>      | 0.001       |          |       |
| 肌氧饱和度 (%)        | 对照组        | 61.67±8.81   | 61.82±8.88                  | 0.912       | 0.918    | 0.008 |
|                  | 高强度抗阻运动组   | 60.46±8.94   | 71.32±9.17 <sup>a</sup>     | 0.001       |          |       |
|                  | 低负荷血流限制运动组 | 60.76±9.66   | 71.05±11.42 <sup>a</sup>    | 0.001       |          |       |

表注：与运动干预前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与对照组比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ ；与低负荷血流限制运动组比较，<sup>c</sup> $P < 0.05$ 。

表 4 | 干预前后各组受试者一氧化氮、内皮型一氧化氮合酶、内皮素 1 和血管内皮细胞生长因子水平比较 ( $\bar{x}\pm s$ ,  $n=20$ )  
Table 4 | Comparison of nitric oxide, endothelial nitric oxide synthase, endothelin 1 and vascular endothelial growth factor levels in the three groups before and after intervention

| 指标                         | 组别         | 干预前          | 干预后                        | 组内比较<br>P 值 | 组间比较 P 值 |       |
|----------------------------|------------|--------------|----------------------------|-------------|----------|-------|
|                            |            |              |                            |             | 干预前      | 干预后   |
| 一氧化氮 ( $\mu\text{mol/L}$ ) | 对照组        | 36.86±4.21   | 36.16±4.21                 | 0.337       | 0.842    | 0.001 |
|                            | 高强度抗阻运动组   | 36.06±4.33   | 40.02±5.08 <sup>ab</sup>   | 0.001       |          |       |
|                            | 低负荷血流限制运动组 | 36.34±4.00   | 42.16±4.63 <sup>ab</sup>   | 0.001       |          |       |
| 内皮型一氧化氮合酶 (U/mL)           | 对照组        | 7.16±0.51    | 7.11±0.66                  | 0.623       | 0.731    | 0.001 |
|                            | 高强度抗阻运动组   | 7.21±0.59    | 7.97±0.75 <sup>ab</sup>    | 0.001       |          |       |
|                            | 低负荷血流限制运动组 | 7.31±0.56    | 8.21±0.64 <sup>ab</sup>    | 0.001       |          |       |
| 内皮素 1 (ng/L)               | 对照组        | 59.87±6.93   | 60.21±6.32                 | 0.527       | 0.780    | 0.001 |
|                            | 高强度抗阻运动组   | 60.59±8.77   | 54.34±7.59 <sup>ab</sup>   | 0.001       |          |       |
|                            | 低负荷血流限制运动组 | 58.79±7.18   | 50.78±6.23 <sup>ab</sup>   | 0.001       |          |       |
| 血管内皮细胞生长因子 (ng/L)          | 对照组        | 180.05±24.82 | 179.37±28.69               | 0.826       | 0.955    | 0.001 |
|                            | 高强度抗阻运动组   | 178.31±27.44 | 210.87±33.85 <sup>ab</sup> | 0.001       |          |       |
|                            | 低负荷血流限制运动组 | 180.95±27.53 | 218.05±28.70 <sup>ab</sup> | 0.001       |          |       |

表注：与运动干预前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ ；与对照组比较，<sup>b</sup> $P < 0.05$ 。

血流限制运动组各指标差异显著性意义。组内比较结果显示：运动干预后高强度抗阻运动组和低负荷血流限制运动组的一氧化氮、内皮型一氧化氮合酶、内皮素 1、血管内皮细胞生长因子水平与干预前相比均有显著差异 ( $P < 0.05$ )；干预前后对照组各指标差异无显著性意义。

2.6 干预前后各组受试者大腿围和大腿肌肉力量变化 见表 5。组间比较结果显示：运动干预前后各组各指标相互间差异没有显著性意义。组内比较结果显示：运动干预后高强度抗阻运动组和低负荷血流限制运动组的大腿围和大腿肌肉力量与干预前相比均有显著差异 ( $P < 0.05$ )；干预前后对照组各指标差异没有显著性意义。

表 5 | 干预前后各组受试者大腿围和大腿肌肉力量比较 ( $\bar{x}\pm s$ ,  $n=20$ )  
Table 5 | Comparison of thigh circumference and thigh muscle strength in the three groups before and after the intervention

| 指标          | 组别         | 干预前        | 干预后                     | 组内比较<br>P 值 | 组间比较 P 值 |       |
|-------------|------------|------------|-------------------------|-------------|----------|-------|
|             |            |            |                         |             | 试验前      | 试验后   |
| 大腿围 (cm)    | 对照组        | 54.23±3.27 | 54.39±2.86              | 0.401       | 0.990    | 0.059 |
|             | 高强度抗阻运动组   | 54.13±3.04 | 56.60±3.02 <sup>a</sup> | 0.001       |          |       |
|             | 低负荷血流限制运动组 | 54.09±2.90 | 56.35±3.00 <sup>a</sup> | 0.001       |          |       |
| 大腿肌肉力量 (kg) | 对照组        | 47.54±6.93 | 47.68±7.40              | 0.959       | 0.732    | 0.082 |
|             | 高强度抗阻运动组   | 45.57±7.63 | 52.17±9.08 <sup>a</sup> | 0.001       |          |       |
|             | 低负荷血流限制运动组 | 46.39±7.86 | 53.63±7.81 <sup>a</sup> | 0.019       |          |       |

表注：与运动干预前比较，<sup>a</sup> $P < 0.05$ 。

2.7 不良事件 试验干预期间，并未发生引起受试者运动损伤和运动安全等不良医学事件。

### 3 讨论 Discussion

3.1 不同形式抗阻运动对体育专业大学生大腿微循环功能的影响 微循环作为人体物质能量代谢交换的唯一场所，其功能是将氧气等营养物质输送到组织细胞，并将组织细胞产生的二氧化碳等代谢废物排出体外，因此微循环与组织细胞功能有密切的关系<sup>[1]</sup>。抗阻运动被证实是提高肌肉微循环功能的有效方式。刘超杰<sup>[2]</sup>研究表明，6 周高强度抗阻力量训练能显著提高体育专业大学生大腿微循环功能，增大微血管血流量。另外，12 周循环抗阻训练能有效提高普通运动型男性青年心脏的泵血功能和微循环功能，降低动脉血压<sup>[10]</sup>。此外，单次高强度抗阻运动也能提高肌肉微循环功能。潘颖等<sup>[4]</sup>研究表明，高强度抗阻运动能提高低体质量女性骨骼肌微循环功能。抗阻运动提高微血管功能与促进血管内皮细胞一氧化氮的释放有关。抗阻运动过程中，骨骼肌泵通过增加从动脉到静脉的压力梯度来增加骨骼肌微血管血流量，增大微血管内皮细胞剪切应力，促进血管内皮细胞释放一氧化氮，促使血管扩张并降低血流阻力，从而进一步增大血流量，以满足工作肌肉的新陈代谢需求<sup>[18-19]</sup>。

虽然抗阻运动是提高肌肉微循环功能的有效方式，但高强度的抗阻运动易造成运动伤害。血流限制训练是指使用专业的绑带对上肢或下肢的根部施加一定的压力，使静脉血液回流受到适度控制，并在这种状态下进行低强度运动训练。与传统的高强度力量训练相比，该方式不仅能量消耗低、肌肉微损伤程度小，且对微血管功能

有较好的干预效果。当压力释放后,动脉到静脉的压力梯度会进一步增大,对血管内皮细胞产生更强的剪切应力,促使一氧化氮的产生;同时加压过程中产生的腺苷等代谢物质在压力释放后还会进一步促使微血管舒张,进而产生更高的血流灌注量。在反复的缺血再灌注刺激下,微血管舒张功能得到提高。潘颖等<sup>[4]</sup>研究表明,低强度血流限制抗阻运动能达到与高强度抗阻运动相当的肌肉激活效应,而这种激活效益与微循环功能的变化有关。当骨骼肌通过阻力训练收缩时,血管系统被机械地压缩,当血管收缩与外部压力袖带施加的压力相结合时会对血管产生更强的压力刺激,达到与高强度抗阻运动同等甚至更佳的效果。综上,低负荷血流限制训练和高强度抗阻训练均能改善微循环功能,但高强度抗阻运动易造成运动伤害,而低强度血流限制训练的安全性较好,能降低运动训练中的风险<sup>[20]</sup>。

虽然现有的研究证实低负荷血流限制训练和高强度抗阻训练均能提高微循环功能,但哪种干预方式效果更好尚缺乏有力的证据支撑。此次研究显示,经过6周的运动干预后,高强度抗阻运动组和低负荷血流限制运动组受试者微血管血流灌注量加热后值显著提高,且低负荷血流限制运动组高于高强度抗阻运动组,表明两种运动均能显著改善体育专业大学生大腿微循环功能,但低负荷血流限制抗阻运动具有更佳的干预效果。微血管血流灌注量是单位时间内流入微循环的血液量,是评价微循环功能的重要指标<sup>[21]</sup>。目前,对微循环功能的评价主要是各种刺激下微血管的血流变化能力(微血管反应性),其中局部皮肤加热、血流阻断、压力刺激以及离子渗透等是常用的方式<sup>[22]</sup>。在这些刺激手段中,局部皮肤加热的重复性以及患者的依从性最高<sup>[23-24]</sup>,因此,此次研究使用局部皮肤加热刺激来评价微循环功能。

当局部皮肤加热到42-44℃,微血管将达到最大的舒张功能,此时微血管血流量代表着微血管最大血流储备能力。微循环血流量的大小与人体能量代谢水平相适应,尤其在高强度运动状态下血流储备能力能否满足人体能量代谢的需求是决定运动能力的关键因素。因此,局部热刺激下微血管血流储备能力是评价微循环功能的科学方式,其与运动能力有着密切关系。但基础状态下微循环血流量并不能科学评价微循环功能,当人体处于微循环功能障碍的早期阶段时,微循环血流量可能不会发生明显变化或者通过代偿反应维持在正常值,以满足人体的物质能量代谢需求。另外,正常静息状态下,微血管的血流呈动态变化,微血管扩张和收缩程度不同,所测得的血流量可能有较大差异,因此微循环血流灌注量的基线值不能用于评价微循环功能,而局部加热能消除这种差异<sup>[25]</sup>。

此外,安静状态下人体物质代谢水平主要与温度有关,而长期运动干预显然不能显著改变人体正常状态下的温度,因此安静状态下长期从事运动干预人群的能量代谢水平可能不会显著提高。微循环血流量的大小与人体能量代谢水平相匹配,因此安静状态下从事运动干预人群的微循环血流量也不会显著提高。作者团队的相关研究表明,长期运动训练能提高赛艇运动员肱二头肌微循环血流储备能力,但对微循环血流量的基础值无明显影响(与普通入相比)<sup>[26]</sup>。另外,微血管血流灌注量=血细胞移动速度×血细胞浓度/100,因此微血管血流灌注量是血细胞移动速度、血细胞浓度两个指标的综合反应,代表了血细胞移动速度、血细胞浓度的变化特点。基于以上因素,此次研究以局部加热刺激后微血管血流灌注量值作为评价微循环功能的核心指标,而微血管血流灌注量基础值不能较好地反映微循环功能的变化。

KIM等<sup>[27]</sup>研究表明,4周血流限制等长握力训练后受试者前臂皮肤微血管传导性(即血流/平均动脉压)显著提高。有多项研究得出相似结论<sup>[28-30]</sup>,4周血流限制膝关节屈伸训练能显著提高受试者小腿微血管反应性,增大血管血流量。另外,还有研究得出6周血流限制膝关节屈伸训练能提高受试者小腿微血管血流量<sup>[31-32]</sup>。此外,还有研究表明8周低负荷血流限制训练能提高受试者前臂和小腿血管传导性,增大血流量<sup>[6]</sup>。综上,4-8周血流限制下的抗阻训练能对受试者微血管血流量产生积极作用。此次研究中,受试者经过6周低负荷血流限制运动后微血管血流灌注量显著增大,这与上述研究的结论一致<sup>[31-32]</sup>。

经皮氧分压是一种评估组织血流灌注的非侵入性方法,已广泛应用于皮肤微血管血流灌注量的评估和微循环功能的评价。此次研究表明,6周的低负荷血流限制训练能显著提高体育专业大学生大腿经皮氧分压,与其他学者的研究结果相似<sup>[33-34]</sup>。SHIMIZU等<sup>[33]</sup>研究表明,4周低强度限制血流训练使受试者脚背经皮氧分压显著增加。此外,杨明明等<sup>[33]</sup>研究表明青少年跆拳道运动员经过6周血流限制训练后,大腿经皮氧分压显著提高,但男女之间存在差异。运动员大腿经皮氧分压的提高,可以增大微血管与肌肉细胞的氧分压差,促使氧气由微血管进入到肌肉细胞,提高肌肉细胞的氧气含量。肌氧饱和度是评价肌肉细胞中肌红蛋白氧合能力的重要指标,能够反映微循环向肌肉细胞输送氧气的能力。肌肉细胞中的氧气是由微血管透过毛细血管壁弥散到肌肉细胞中,微血管中的氧分压与肌肉细胞中的氧分压差越大,氧气由微血管弥散到肌肉细胞的效率就越高,肌氧饱和度就越高<sup>[35]</sup>。因此,肌氧饱和度能在微血管血流灌注量和经皮氧分压的基础上进一步评价微血管向肌肉细胞输送氧气的能力。此次研究表明,6周的低负荷血流限制训练能显著提高体

育专业大学生大腿肌氧饱和度,与其他学者研究结果相似。孙宇斌等<sup>[36]</sup>研究表明,肌氧饱和度在运动开始后逐渐下降,在加压袖带和运动带来的双重负荷下,肌氧饱和度下降更为显著,但训练结束后可恢复至运动前水平,说明加压训练可以提高运动刺激肌肉组织利用氧的能力。另外,CHRISTIANSEN等<sup>[37]</sup>研究表明,6周血流限制训练后受试者施加血流限制的腿部氧输送和摄取增加,乳酸显著降低,肌肉力量显著增大,下肢氧弥散能力显著提高。综上,6周的低负荷血流限制训练能提高大腿经皮氧分压,增大微血管与肌肉细胞的氧分压差,进而提高肌氧饱和度,为肌肉收缩提供更多的氧气和能量。

综合干预前后受试者微血管血流灌注量、经皮氧分压及肌氧饱和度的变化,认为6周低负荷血流限制运动和高强度抗阻运动均能提高体育专业大学生大腿微循环功能,且低负荷血流限制组干预效果更好。但也有研究表明两种运动方式对微循环功能的改善并无显著性差异,MOUSER等<sup>[6]</sup>研究表明,8周的低负荷血流限制运动和高强度抗阻运动均能够提高微血管功能,且两组干预效果无显著差异;此外,SCOTT等<sup>[38]</sup>研究表明,低负荷血流限制运动和高强度抗阻运动均能提高老年女性微血管功能,但两组无显著差异。作者认为,造成此次研究与上述学者研究结果差异的原因可能是采用的抗阻运动方案不同,但是其中更为准确的原因仍需进一步研究证明。

在肌肉收缩过程中,肌肉细胞中的能量供应是决定肌肉收缩力量的重要因素之一,而微循环功能的改善可以为肌肉细胞提供更多的氧气和能量物质,进而为肌肉收缩提供更多的能量,使肌肉产生更大的收缩力量。刘超杰<sup>[2]</sup>研究表明,6周高强度抗阻训练能提高体育专业大学生下肢微循环功能和下肢最大肌肉力量,且二者存在正相关关系,微循环功能的改善可能是提高肌肉力量的重要因素。另外,低负荷血流限制过程中微循环功能的改善可以提高肌纤维的募集程度,进而增加肌肉力量<sup>[4]</sup>。此次研究显示,干预后低负荷血流限制运动组和高强度抗阻运动组两侧大腿肌肉力量均显著高于干预前,但两组间无显著性差异,这与干预前后微循环功能的变化不一致,说明微循环功能的改善可能不是影响肌肉力量最为关键的因素,神经系统对肌纤维的募集程度、肌纤维类型以及肌纤维中无氧代谢酶的活性等因素可能也起到重要的作用,但其中更为准确的机制仍需进一步研究明确。

**3.2 不同形式抗阻运动改善体育专业大学生微循环功能的机制** 血清一氧化氮、内皮素1、血管内皮生长因子等血管因子水平的变化被证实是运动改善微循环功能的主要机制<sup>[9]</sup>。正常情况下,一氧化氮和内皮素1的动态平衡是维持血管正常舒缩功能的主要原因。TAN等<sup>[39]</sup>发现低负荷血流限制训练可促进内皮型一氧化氮合酶表达,产生更

多的一氧化氮,同时抑制内皮素1表达。TAKANO等<sup>[40]</sup>研究表明,与单独的低负荷训练相比,短期低负荷血流限制训练能显著改善受试者微血管功能,其机制与一氧化氮和内皮素1的生物利用度有关。此外,血管内皮细胞生长因子与微循环功能有着密切的关系,血管内皮细胞生长因子能促进毛细血管增生,提高微血管密度以及增大血流灌注量。LARKIN等<sup>[41]</sup>研究发现,一次血流限制训练后能显著提高健康年轻人血清低氧诱导因子、内皮型一氧化氮合酶和血管内皮细胞生长因子表达。另外,HUNT等<sup>[42]</sup>研究表明短期血流限制运动后受试者血管内皮细胞生长因子表达增强,一氧化氮的生物利用度增加。此外,4-8周血流限制运动也能促进受试者血清血管内皮细胞生长因子表达。SHIMIZU等<sup>[33]</sup>发现4周的低负荷血液限制训练使健康老年人血管内皮细胞生长因子和经皮氧分压显著提高,血管内皮功能和外周血循环得到改善。ZHAO等<sup>[43]</sup>研究表明,8周低负荷血流限制训练能促进受试者血管内皮细胞生长因子和血管内皮细胞生长因子受体表达,改善心脏功能和血管内皮功能。综上,单次及4-8周的低负荷血流限制训练均能促进受试者一氧化氮、内皮素1、血管内皮细胞生长因子等血管因子的表达,提高微循环功能。

此次研究结果显示,6周的低负荷血流限制运动、高强度抗阻运动后体育专业大学生血清一氧化氮、血管内皮细胞生长因子水平显著升高,内皮素1水平降低。另外,干预前后受试者内皮型一氧化氮合酶活性显著升高,表明受试者血清中的一氧化氮为内源型一氧化氮。因此,此课题组认为6周的低负荷血流限制运动、高强度抗阻运动均能通过提高微血管舒张功能和促进微血管增生提高受试者微循环功能,这与相关研究结论一致<sup>[43-44]</sup>。马晓缓等<sup>[44]</sup>研究表明,12周低负荷血流限制训练使高血压患者血清血管内皮细胞生长因子与内源性一氧化氮水平显著升高,同时降低血清内皮素1含量,改善患者微循环功能。谭朝文等<sup>[45]</sup>得出相似结论,8周低负荷血流限制训练能下调原发性高血压大鼠血液中内皮素1的表达,并上调血管内皮细胞生长因子、内皮型一氧化氮合酶的表达,促进一氧化氮释放,改善微血管内皮功能。低负荷血流限制过程中一氧化氮的产生可能与压力刺激释放之后血流速度的加快有关。当血流限制的压力释放后,微血管中的血流速度加速,血流对血管表面的流体剪切应力随之增大,在剪切应力的作用下,内皮细胞开始释放血管活性物质内源性一氧化氮,同时抑制内皮素1的释放。

一氧化氮作为强效的舒血管因子,能促使血管平滑肌舒张松弛,激活可溶型鸟氨酸活化酶,使血管保持较高的张力,增强血管弹性,提高血管的舒张功能,进而增大血流灌注量。一氧化氮还能抑制某些促动脉粥样硬化信号途径,包括血管平滑肌细胞迁移、单核细胞活化、

黏附和迁移等,从而减少血管硬化的发生<sup>[46]</sup>。内皮素 1 是由内皮细胞释放的一种强效缩血管因子,使血管张力调节功能紊乱,内皮依赖性舒张力下降,并使血管壁结构发生异常改变,从而降低血管舒张功能。另外,内皮素 1 还能促进血管平滑肌细胞释放血管紧张素 II,而血管紧张素 II 可刺激内皮素 1 分泌,两者之间存在着反馈模式的调节机制<sup>[47]</sup>。血管紧张素 II 也是一种缩血管因子,可促进外周血管收缩和醛固酮分泌,因此内皮素 1 水平升高能协调血管紧张素 II 产生更强血管收缩效应,导致血管弹性和血管舒张功能下降。正常情况下,一氧化氮与内皮素 1 水平的平衡是血管保持正常张力和舒张功能的重要因素,其水平失衡会导致血管舒张功能明显下降。此外一氧化氮与血管内皮细胞生长因子有密切关系,其通过血管舒张来调节血管生成因子血管内皮细胞生长因子表达,从而调节血管生成<sup>[48]</sup>。因此,改善一氧化氮水平不仅能提高血管舒张功能,且能促进血管新生,增大毛细血管密度。

血管内皮细胞生长因子是目前发现最有效的血管增生因子,在促进血管新生方面起到了重要作用。剪切应力能促进肌肉间质中血管内皮细胞生长因子的表达,并作用于毛细血管内皮上的血管内皮细胞生长因子受体,刺激毛细血管生成。此外,血流限制运动过程中肌肉的缺氧缺血环境还能激活低氧诱导因子促进血管内皮细胞生长因子表达。血管新生主要包括出芽式血管新生和分裂式血管新生,其中前者是一种基本方式,由 Tip 细胞或 Stalk 细胞介导。血管内皮细胞生长因子通过与血管内皮细胞生长因子受体 2 结合,诱导血管内皮细胞转化为 Tip 细胞或 Stalk 细胞,其中 Tip 细胞主要作用是伸出丝状伪足,探索组织环境,引导血管新生,发挥严格控制和即时反馈的作用;Stalk 细胞主要起增殖作用,连接形成毛细血管腔<sup>[49-50]</sup>。在 Tip 细胞或 Stalk 细胞作用下,能保证血管新生达到最佳状态<sup>[51]</sup>。

虽然此次研究得出低负荷血流限制训练能调节血液一氧化氮、内皮素 1 及血管内皮细胞生长因子等因子的释放,改善受试者微循环,但这些因子的变化与高强度抗阻运动组并无显著差异,这与此次研究中干预前后两组受试者微循环功能的变化特点不一致,说明在血流限制训练改善微循环功能的机制中可能还存在其他方面的机制与路径,这也是作者后续研究中需进一步探讨的问题。

**3.3 结论** 6 周低负荷血流限制运动和高强度抗阻运动可能通过调节内皮型一氧化氮合酶、内皮素 1、血管内皮细胞生长因子等血管因子的分泌,提高体育专业大学生大腿微循环功能,并增加大腿肌肉的收缩力量,且低负荷血流限制运动对微血管血流灌注量、血细胞移动速度的干预效果更佳,因此低负荷血流限制运动较高强度抗阻运动在提高微循环功能方面更具优势。

**致谢:**感谢广西民族师范学院胡江平副教授和湖北民族大学运动科学研究中心主任朱欢老师,试验是由胡江平老师和朱欢老师共同设计完成的,感谢西华大学刘晓丽教授在试验过程中给予的帮助,感谢所有参与试验学生的支持和配合。

**作者贡献:**胡江平和朱欢负责试验总体设计及论文修改,彭永负责试验的実施和论文初稿撰写,彭永和朱欢负责试验数据的收集和分析。

**利益冲突:**文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

**前瞻性临床研究数据共享声明:**文章作者同意:①可以在一定范围内开放研究参与者去标识的个体数据;②可以在一定范围内开放共享文章报告结果部分的去标识个体基础数据,包括正文、表、图及附件;③可以在一些情况下开放研究方案和知情同意书等相关文档;④全文开放获取数据的时间是从文章出版后即刻,并无终止日期。

**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。

**版权转让:**文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

**出版规范:**该研究遵守了《临床随机对照试验的报告标准(CONSORT)》的规范标准。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。

## 4 参考文献 References

- [1] TSCHAKOVSKY ME, SHERIFF DD. Immediate exercise hyperemia: contributions of the muscle pump vs. rapid vasodilation. *J Appl Physiol.* 2004;97(2):739-747.
- [2] 刘超杰. 六周高强度力量训练对体育教育专业男子大学生肌力、围度、微循环的影响及三者之间关系的研究 [D]. 上海:上海体育学院,2021.
- [3] 冯燕. 有氧、抗阻运动对衰老小鼠骨骼肌毛细血管生成和卫星细胞的影响研究 [D]. 上海:华东师范大学,2019.
- [4] 潘颖,赵彦,马晓媛,等. 血流限制伴小强度抗阻运动对低体质量女性骨骼肌微循环、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):677-684.
- [5] KAMBIČ T. Blood flow restriction training: you can occlude your veins, but not your oxygen transport. *J Physiol.* 2020;598(18):3825-3826.
- [6] MOUSER JG, MATTOCKS KT, BUCKNER SL, et al. High-pressure blood flow restriction with very low load resistance training results in peripheral vascular adaptations similar to heavy resistance training. *Physiol Meas.* 2019;40(3):035003.
- [7] DA CUNHA NASCIMENTO D, SCHOENFELD BJ, PRESTES J. Potential implications of blood flow restriction exercise on vascular health: a brief review. *Sports Med.* 2020;50(1):73-81.
- [8] 钱洲曜,王勇平. 血管内皮生长因子有望成为加速骨折愈合的全新治疗手段 [J]. *中国组织工程研究*,2020,24(17):2759-2769.
- [9] 朱欢,高炳宏. 有氧运动对人体微血管反应性的作用及机制研究进展 [J]. *生命科学*,2020,32(8):855-863.
- [10] 胡国鹏,王人卫,王振,等. 12 周循环抗阻训练对男子大学生心血管动力学参数的影响 [J]. *中国运动医学杂志*,2010,29(2):205-207.
- [11] KILGAS MA, MCDANIEL J, STAVRES J, et al. Limb blood flow and tissue perfusion during exercise with blood flow restriction. *Eur J Appl Physiol.* 2019;119(2):377-387.
- [12] GRØNFELDT BM, LINDBERG NIELSEN J, MIERITZ RM, et al. Effect of blood-flow restricted vs heavy-load strength training on muscle strength: systematic review and meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports.* 2020;30(5):837-848.

- [13] 王艺璇, 蔡军. 剪切力和拉伸应力对血管内皮细胞的影响 [J]. 中国医学前沿杂志 (电子版), 2012, 4(8): 38-41.
- [14] COOK SB, LAROCHE DP, VILLA MR, et al. Blood flow restricted resistance training in older adults at risk of mobility limitations. *Exp Gerontol*. 2017;99:138-145.
- [15] COOK SB, CLEARY CJ. Progression of blood flow restricted resistance training in older adults at risk of mobility limitations. *Front Physiol*. 2019;10:738.
- [16] LOENNEKE JP, THIEBAUD RS, FAHS CA, et al. Blood flow restriction does not result in prolonged decrements in torque. *Eur J Appl Physiol*. 2013;113(4):923-931.
- [17] LOENNEKE JP, KIM D, FAHS CA, et al. Effects of exercise with and without different degrees of blood flow restriction on torque and muscle activation. *Muscle Nerve*. 2015;51(5):713-721.
- [18] ERCAN M, KOKSAL C. The relationship between shear rate and vessel diameter. *Anesth Analg*. 2003;96(1):307.
- [19] TSCHAKOVSKY ME, ROGERS AM, PYKE KE, et al. Immediate exercise hyperemia in humans is contraction intensity dependent: evidence for rapid vasodilation. *J Appl Physiol*. 2004;96(2):639-644.
- [20] CLARK BC, MANINI TM, HOFFMAN RL, et al. Relative safety of 4 weeks of blood flow-restricted resistance exercise in young, healthy adults. *Scand J Med Sci Sports*. 2011;21(5):653-662.
- [21] 朱欢, 万利, 刘尧峰, 等. 低氧适应与低氧运动对慢性病患者微血管反应性的干预效应及机制研究进展 [J]. 中国运动医学杂志, 2021, 40(6): 490-495.
- [22] 朱欢, 高炳宏. 微血管反应性在耐力性运动员训练中的应用 [J]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(10): 907-914.
- [23] AGARWAL SC, ALLEN J, MURRAY A, et al. Comparative reproducibility of dermal microvascular blood flow changes in response to acetylcholine iontophoresis, hyperthermia and reactive hyperaemia. *Physiol Meas*. 2010;31(1):1-11.
- [24] AGARWAL SC, ALLEN J, MURRAY A, et al. Laser Doppler assessment of dermal circulatory changes in people with coronary artery disease. *Microvasc Res*. 2012;84(1):55-59.
- [25] 徐菲菲, 郭渝成, 刘秀华. 皮肤微血管功能检测的研究进展 [J]. 微循环学杂志, 2014, 24(3): 71-76.
- [26] 朱欢, 高炳宏, 梁世雷, 等. 我国赛艇运动员肱二头肌微循环血流储备能力的研究 [J]. 中国应用生理学杂志, 2015, 31(1): 61-65.
- [27] 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 Gerontol*. 2017;99:127-132.
- [28] EVANS C, VANCE S, BROWN M. Short-term resistance training with blood flow restriction enhances microvascular filtration capacity of human calf muscles. *J Sports Sci*. 2010;28(9):999-1007.
- [29] 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.
- [30] PATTERSON SD, FERGUSON RA. Enhancing strength and postocclusive calf blood flow in older people with training with blood-flow restriction. *J Aging Phys Act*. 2011;19(3):201-213.
- [31] HUNT JE, GALEA D, TUFFT G, et al. Time course of regional vascular adaptations to low load resistance training with blood flow restriction. *J Appl Physiol*. 2013;115(3):403-411.
- [32] FAHS CA, ROSSOW LM, LOENNEKE JP. Effect of different types of lower body resistance training on arterial compliance and calf blood flow. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2012;32(1):45-51.
- [33] 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. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116(4):749-757.
- [34] 杨明明, 朱欢, 王丹. 血流限制训练对不同性别跆拳道运动员经皮氧分压及经皮二氧化碳分压的影响 [C]. 第十二届全国体育科学大会论文摘要汇编——墙报交流 (体能训练分会), 2022: 22-23.
- [35] 肖哲, 朱欢, 胡江平, 等. 10 周有氧运动和有氧结合抗阻运动对肥胖大学生微循环功能的影响及机制研究 [J]. 中国全科医学, 2022, 25(19): 2349-2355, 2362.
- [36] 孙宇斌, 杨紫强, 林文杰, 等. 加压训练对肌氧饱和度的影响 [J]. 体育科技文献通报, 2021, 29(8): 198-199, 208.
- [37] CHRISTIANSEN D, EIBYE K, HØSTRUP 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 Physiol*. 2020;598(12):2337-2353.
- [38] SCOTT BR, PEIFFER JJ, THOMAS HJ, et al. Hemodynamic responses to low-load blood flow restriction and unrestricted high-load resistance exercise in older women. *Front Physiol*. 2018;9:1324.
- [39] TAN Z, ZHAO Y, ZHENG Y, et al. The effect of blood flow-restricted low resistance training on microvascular circulation of myocardium in spontaneously hypertensive rats. *Front Physiol*. 2022;13:829718.
- [40] TAKANO H, MORITA T, LIDA 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.
- [41] LARKIN KA, MACNEIL RG, DIRAIN M, et al. Blood flow restriction enhances postresistance exercise angiogenic gene expression. *Med Sci Sports Exerc*. 2012;44(11):2077-2083.
- [42] HUNT JE, WALTON LA, FERGUSON RA. Brachial artery modifications to blood flow-restricted handgrip training and detraining. *J Appl Physiol*. 2012;112(6):956-961.
- [43] 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. *Int Health*. 2021;13(5):471-479.
- [44] 马晓媛, 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): 341-344, 354.
- [45] 谭朝文, 赵彦, 俞莹莹, 等. 低负荷加压训练改善自发性高血压大鼠的血压效果及机制研究 [J]. 体育科学, 2020, 40(3): 46-53, 63.
- [46] 徐菲菲, 郭渝成, 刘秀华. 皮肤微血管功能检测的研究进展 [J]. 微循环学杂志, 2014, 24(3): 71-76.
- [47] 高丽君, 王军, 周红艳, 等. 自发性高血压大鼠左心室肥厚与 ACE-Ang II-AT1R 轴/Ace2-Ang(1-7)-MasR 轴变化 [J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2016, 30(6): 568-571.
- [48] MACHADO MJC, BOARDMAN R, RIU F, et al. Enhanced notch signaling modulates unproductive revascularization in response to nitric oxide-angiotensin signaling in a mouse model of peripheral ischemia. *Microcirculation*. 2019;26(6):e12549.
- [49] SCHAAP MB, HOUBAERT D, MECE O, et al. Lysosomal pathways and autophagy distinctively control endothelial cell behavior to affect tumor vasculature. *Front Oncol*. 2019;9:171.
- [50] TANG X, WANG JJ, WANG J, et al. Endothelium-specific deletion of Nox4 delays retinal vascular development and mitigates pathological angiogenesis. *Angiogenesis*. 2021;24(2):363-377.
- [51] PITULESCU ME, SCHMIDT I, GIAIMO BD, et al. Dll4 and Notch signalling couples sprouting angiogenesis and artery formation. *Nat Cell Biol*. 2017;19(8):915-927.

(责任编辑: WJ, ZN, WL, LCH)