

目 录

摘 要	I
Abstract	III
1 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 研究意义	2
2 文献综述	3
2.1 加压训练	3
2.2 血管内皮功能	8
2.3 加压结合低强度抗阻训练与血管内皮功能的关系	13
3 研究对象与方法	16
3.1 研究对象	16
3.2 研究技术路线	16
3.3 研究方法	17
3.4 数据统计方法	26
4 研究结果	27
4.1 实验数据的正态分布检测结果	27
4.2 不同压力加压结合低强度抗阻训练对深蹲、屈臂和伸臂最大力量的比较	29
4.3 不同压力加压结合低强度抗阻训练对肢体围度和体成分的比较	34
4.4 不同压力加压结合低强度抗阻训练对心率和血压的比较	43
4.5 不同压力加压结合低强度抗阻训练对肱动脉直径和 FMD 的比较	47
5 分析与讨论	52
5.1 不同压力加压结合低强度抗阻训练对深蹲、屈臂和伸臂最大力量的影响	52
5.2 不同压力加压结合低强度抗阻训练对肢体围度和体成分的影响	53
5.3 不同压力加压结合低强度抗阻训练对心率和血压的影响	55
5.4 不同压力加压结合低强度抗阻训练对肱动脉直径、FMD 的影响	57
5.5 局限性	59
6 结论	60
参考文献	61

附录.....	68
致谢.....	72
浙江师范大学学位论文诚信承诺书.....	73
浙江师范大学学位论文独创性声明.....	74
学位论文使用授权声明.....	74

1 前言

1.1 研究背景

血管是一个复杂的管道系统，由内皮细胞、支撑细菌和基底膜层构成，它们共同构成了血液从一个器官流向另一个器官的过程，其中动脉血管、静脉血管和毛细血管是血液与器官之间进行物质交换的重要渠道^[1]，起着至关重要的作用。血管内皮细胞（Endothelial cell, EC）是位于血管内膜表面的上皮细胞，它们能够有效地阻止血液中的有害物质，并且能够有效地将血液与血管壁之间的液体、气体和大分子物质隔离开来，从而形成一道有效的屏障。同时内皮具有多种功能，通过调节内分泌和旁分泌的功能，与其他组织和器官之间具有密切的联系，可以调节内分泌和旁分泌的功能^[2]。而良好的血管内皮功能是提升供能和改变运动表现的关键因素^[3]，近年来，研究表明，肱动脉血液介导的内皮扩张能力（Flow-Mediated Dilation, FMD）^[4]是提升供能和改变运动表现的关键因素，它可以透过测量肱动脉管径改变的比例来反映出毛细血管在外界加压下的扩张程度，从而提高血流量，从而实现精确的切变应激。研究表明，科学规律的有氧运动可以提高心血管系统的能力，而且适应群体广泛，但是不足以有效抑制随着年纪增加而引起的肌肉力量衰退^[5]。按照 ACSM 的指导，大强度抗阻锻炼（ $\geq 70\%1RM$ ）可有效地提升肌体能力^[6]，但是高强度抗阻锻炼的适应群体受限，活动损伤风险较大，而且对心血管功能的影响仍有争议，因此，加压锻炼可以以较低的运动强度^[7]，有效地促使肌体适能及心血管发展，从而达到提高心血管功能的目的。研究表明，将抗阻和有氧运动结合起来，可以显著提升血管内皮功能，促使血管新生，从而发挥出积极的作用^[8]。

迄今为止，很多研究结果显示，血管内皮细胞在血液与血管壁之间的摩擦力所产生的生理刺激下可以释放出一氧化氮（NO）作为血管舒张因子。而加压训练则可以通过外部加压来增加毛细血管的剪切应力，激活信息管道，促使毛细血管因子，如血管内皮生长因子（VEGF）和一氧化氮（NO）的产生，从而改善血管内皮。此外，加压训练还能够提高低氧诱导因子-1（HIF1）与 VEGF 的融合速度，从而提高血液流动的效率。通过增强 VEGF 蛋白的生物活性，在低氧环境下，它的表达量会

显著增加，从而促使血管生成和 NO 的有效利用，并且具备抗氧化作用，可以有效防止 NO 的氧化损伤。这可能是加压训练对血管内皮功能改善的主要途径和方式^[9]。而不同的压力设置的加压训练可能对血管内皮功能有着不同程度的影响。

因此，本文拟设置三种不同压力的加压训练方案，通过 8 周不同压力的加压结合低强度抗阻训练的运动干预，比较男大学生血管内皮舒张功能（FMD）的影响情况，分析长期加压结合低强度抗阻训练对男大学生血管内皮舒张功能变化情况。以此为加压训练方式的应用提供客观评价和实验参考。

1.2 研究目的

本研究运用加压结合低强度抗阻运动干预，使用血管内皮功能检测仪器 UNEXEF 38G 对浙江师范大学男大学生的血管内皮功能进行测量和评价，探究不同压力加压结合低强度抗阻训练与血管内皮功能之间的关系，比较不同压力加压结合低强度抗阻训练对男大学生血管内皮功能的影响。

1.3 研究意义

加压训练作为使用外部压力来增加负荷的一种训练方式，其不同的压力设置与训练效果密切相关，本文以血管内皮功能为评价指标，通过 8 周的加压结合低强度抗阻训练，观察不同压力的加压结合低强度抗阻训练干预方式对血管内皮功能的作用，探索男大学生进行加压训练时的合理压力设置，为加压训练在体育教学、运动训练、伤病康复等方面提供理论参考和实践依据。

2 文献综述

2.1 加压训练

2.1.1 加压训练的概述

加压训练（KAATSU Training，简称 KAATSU）又称血流限制训练（BFRT Blood Restriction Training, 简称 BFRT）是在力量训练的基础上在肢体的近心端使用专业的加压设备施加一定压力，使其血液循环受到适度控制以提高训练效果的一种辅助训练方法^[10]。

2.1.2 加压训练的生理机制

尽管加压训练已经被多次证明可以产生类似于大强度抗阻训练的效果，但是其本质的作用机制尚不完全清楚，因此，学者们从不同的视角来探讨加压训练的作用机制。在加压训练条件下，血液和氧气的供应受到了一定程度的限制，从而阻碍了训练过程中产生的肌肉代谢物的有效分解和清除，使得肌肉产生了适应性变化。Fujita 等在研究中发现，通过膝关节屈伸运动加压训练，可以降低血液 PH 值，促进垂体分泌生长激素，从而提高类胰岛素增长因子 1（IGF-1）的水平，从而有效提升机体的肌肉质量^[11]。

研究发现，人体在进行高强度运动时，快肌纤维的激活不仅与力量和速度有关，还受血液中氧气含量的影响，如果动脉血流受到限制，加压部位的氧气供应也会随之受限^[12]，因此在加压训练中，更多的快肌纤维参与收缩，而慢肌纤维激活受到抑制。Manini 等认为，在局部缺血缺氧和代谢压力增加的情况下，即使是在较低的阻力训练中，加压训练也能够激活更多的快速肌肉组织^[13]。

Fry 等研究表明在局部加压结合低强度抗阻的训练干预后，mTOR、S6K1 与 rPS6 的磷酸化作用均显著提升^[14]。mTOR 蛋白能够调节细胞内部蛋白质转录速率。进而增强了肌肉蛋白质的合成^[15]。

Loenneke 等研究表明，在加压训练过程中，细胞水和作用的叠加会导致细胞肿胀反应的增强，这种反应有助于蛋白质的人工合成，同时也可以控制蛋白质的分解，从而有效地提升肌肉的肥大程度。压力训练会对静脉形成压迫，阻碍了血液流动，导致肢体远端产生静脉池作用，促进细胞肿胀。尽管目前对这一问题的研究仍然相对较少^[16]。代谢累积与生长激素、肌纤维募集和代谢信号通路增强是目前学术界主流认为加压训练对提高肌肉质量的生理学机制。

2.1.3 加压训练方法学设计

加压训练是一种以特定加压设备为基础的辅助力量训练方法，其训练效果受到多种因素的影响，包括袖带宽窄度、压力大小、训练强度和间歇时间、个体差异等，因此，对这些因素进行全面分析，以确保加压训练的有效性，并避免出现不必要的风险。

2.1.3.1 加压袖带及长度、宽度

国内学者瞿超艺、魏佳等研究表明，加压训练中施加压力的袖带，需具有高弹性、强收缩性等特点，在加压训练过程中需平整地缠绕在加压部位上，避免加压袖带脱落，造成一定的风险。在正确佩戴加压袖带的同时也要保证体感舒适，确保不会限制训练者完成训练动作，同时要注意皮肤的清洁保护，避免出现皮肤感染和压伤等问题^{[17][18]}。不同宽度长度的加压袖带限制血流的程度不同，Crenshaw 等研究中，宽袖带在相同压力下血流限制程度更高，除此之外，加压袖带的宽度和长度也应该根据受试者的个体差异而调整，以确保在加压训练的过程中，能够稳定提供压力，同时又不会造成伤害^[19]。因此本研究选用 KAATSU 专业加压袖带，上肢用加压袖带长度约 50cm 左右，宽度约 3-4cm，下肢用加压袖带长度约 90cm 左右，宽度约 5cm。

2.1.3.2 适应压力

加压压力既是影响加压训练效果的重要因素，也是造成一定风险的主要原因之一，又受到人群年龄、加压部位、个体差异等因素影响，使用绝对压力或者任意一

项压力进行加压训练并不适宜。因此有学者建议使用动脉闭塞压力值的百分比来对肢体进行加压，阻止血液流向肢体所需要的压力值即为动脉闭塞压力（arterial occlusion pressure,AOP），通常认为使用 40%-80%的动脉闭塞压力进行血流限制训练较为安全且有效^[20]。部分研究根据前人经验设定固定的压力值，范围从 50-300mmHg 不等^{[21][22]}。在 Stray-Gundersen 等^[23]的研究中，使用窄袖带进行 BFRT 的受试者加压值为 300mmHg，使用宽袖带进行 BFRT 的受试者加压值为 160mmHg。赵泽铭^[22]的研究中，通过对受试者进行 150mmHg、200mmHg、250mmHg、300mmHg 四种不同压力值的 BFRT，以探讨不同压力的 BFRT 对下肢主要肌肉体积、肌纤维募集和部分血液指标的影响。芦劼明等^[24]应用 8cm 宽的加压袖带对男性大学生进行 120mmHg、180mmHg 的 BFRT，以探讨不同压力 BFR 结合低强度抗阻训练对男性大学生下肢肌肉及心肺功能影响。所以选择适合的压力设置，对于加压训练尤其重要。佐藤义昭的研究推荐加压训练的压力范围：高龄者（>70 岁）上肢捆绑压力 15-20mmHg 推荐压力 40-60mmHg、下肢捆绑压力 20-30mmHg 推荐压力 60-90mmHg，中高龄者（50-69 岁）上肢捆绑压力 20-30mmHg 推荐压力 60-90mmHg、下肢捆绑压力 30-40mmHg 推荐压力 90-130mmHg，一般人群（<49 岁）上肢捆绑压力 30-40mmHg 推荐压力 90-130mmHg、下肢捆绑压力 40-50mmHg 推荐压力 130-160mmHg，运动员上肢捆绑压力 40-50mmHg 推荐压力 130-180mmHg、下肢捆绑压力 50-60mmHg 推荐压力 160-220mmHg^[25]。Sugiarto 等人的研究给出的上肢压力范围在 3cm 宽的加压袖带使用 50-270mmHg^[26]。Loenneke 等人进行大量研究评估后得出下肢压力指导范围：下肢围度小于 45 cm 或 45 cm-50 cm 采用 120mmHg，51 cm-55 cm 采用 150mmHg，56 cm-59 cm 采用 180mmHg,60 cm 及以上采用 210mmHg^[27]。有研究表明，加压袖带宽度越宽闭塞动脉血流所需要的压力就越小，加压袖带的宽窄度和加压压力高度相关^[28]，以上是不同人群在安静状态下和运动状态下的血液、肌电和激素的变化制定的针对不同人群的加压压力设置。本研究参照上述标准，受试者是男大学生，再通过查阅相关文献最终选择上肢 3-4cm 宽和下肢 5cm 宽的加压压力范围：上肢捆绑压力 40mmHg 加压压力 40-120mmHg，下肢捆绑压力 40mmHg 加压压力 80-180mmHg。

2.1.3.3 训练类型

训练类型对于加压训练效果的影响也尤为重要，与不同的训练相结合，加压训练的侧重的结果也不一样。Kubota 等人对石膏固定患者单独进行限制血流训练，压力设置为 50mmHg，能够减轻患者废用性肌肉萎缩，即使患者不进行主动的肌肉伸缩运动，也可以帮助患者康复。要更好的增强肌肉增长发育，加压训练需要结合更强的运动刺激^[29]。Ozaki 等人的研究表明加压训练结合简单步行，可以对肌肉肥大和肌肉力量有所改进^[30]。李春晨的研究中加压训练结合有氧训练组的气体代谢水平要优于无加压组^[31]。国内学者陆锦华的研究显示加压训练结合低负荷的单关节或者多关节的抗阻训练才能获得最大的肌肉增长益处^[32]。Yan Zhao 等人研究表示，八周加压结合抗阻训练改善了健康年轻男性的心脏功能和血管内皮功能^[33]。因此本研究采用加压训练结合低强度抗阻训练来进行。

2.1.3.4 训练负荷

通过结合加压训练和低强度抗阻训练，可以获得最佳的肌肉增长效果，而抗阻训练的负荷大小也是影响肌肉增长的重要因素之一，目前常用的负荷标准包括最大肌力 1RM、肌肉最大自主收缩力量 MVC 以及主观疲劳度。Laurentino 的研究中八周的加压训练结合 20%1RM 的低负荷膝关节伸展训练，使伸展力量 1RM 增加了 40.1%^[34]。Abe 等人的研究发现在 20%1RM 的强度下的腿部弯举结合 160-240mmHg 的加压训练，腿部最大力量得到了显著提升。过高负荷会导致肌肉力量的下降，而肌肉 CSA 的增长却不会有任何改善^[35]。在 Takarada 的研究中发现 50%1RM 的加压伸膝训练的效果与另一组采用 30%1RM 的训练效果相似，加压训练的强度并非是越大越好，过大的强度不仅让训练变得十分的困难，还会产生一定的危害^[36]。Yamada 的研究中提出过大的训练强度可能会导致动脉血流闭塞，这不仅会引以疼痛，还可能引起血栓和一些严重的心血管疾病^[37]。因此，严格控制加压训练的负荷强度极其重要。在针对加压训练的 Meta 分析中发现，加压训练结合采用最大肌肉力量的 15-30%1RM 的肌肉训练效果更好。本研究采用国内学者魏佳的建议：采用 20%1RM-40%1RM 的负荷进行加压训练^[38]。

2.1.3.5 训练量

训练量是抗阻训练的重要因素之一，而加压结合低强度抗阻训练与传统抗阻训练相比所需要训练量要少，在目前的研究中，采取最多的训练方案即 4 组第一组 30 次，后三组每组 15 次，共计 75 次^[39]。虽然目前尚未公认的加压结合低强度抗阻训练的最佳方案，但这种方案已经被证明有助于疾病康复、运动恢复、肌肉激活增强肌肉力量等各种方面。第一组重复后，大量的代谢产物累积，代谢压力陡增，肌肉疲劳，使得后面重复次数减少。加压结合低强度抗阻训练的训练量不宜过多，因为过度的训练会导致肌肉发育受阻，而且在训练初期，应该尽量避免过度的训练，以免引发肌肉衰竭的情况。应遵循循序渐进的原则，在 20-40%1RM 的负荷下，采用 30-15-15-15 次的训练量。

2.1.3.6 训练频率

加压训练相关研究的训练频率从每周的 2 次到每周 3 次不等，Abe 等人在研究中采用每天两次、加压结合 20%1RM 的低强度抗阻训练，仅持续六天，就可以产生显著的力量增益效果，重要的是，即使在较高的训练频率下，肌肉损伤和氧化应激的标志物也没有升高，说明加压训练结合低强度抗阻训练不会导致肌肉功能的持续下降^[40]。但频率过高的加压训练可能会导致更大的延迟性肌肉酸痛反应。在 Lambert 的研究中建议运动人群除了正常的训练外，还可以进行 2-4 次的加压训练，在 1 天内进行 1-2 次加压训练，临床人群和普通人群每周可以进行 2-3 次的加压训练^[41]。本研究针对的是健康大学生，所以选取每周 3 次的训练频率。

2.1.3.7 间歇时间与方式

在进行加压训练过程中，确保机体血压正常，需要避免过长时间的加压训练，Scott 的研究中建议每次加压总时长上肢为 10-15min，下肢为 15-20min。要密切关注参与者加压训练的使用时间，每次加压训练中的每组之间都需要一定的间歇时间（30-60s）^[42]。研究表明，在组间间歇阶段，持续加压是影响训练效果的关键因素之一，因此，加压袖带的使用可以分为持续性加压和间歇解除加压两种方案，其中

持续加压可以更有效地缓解代谢压力，从而促进肌肉的增长。与持续施加压力相比，间歇性施加压力可以帮助人们放松身心，并有助于提升血管的弹性^[43]。因此本研究的选择每组之间用加压-除压的方式间歇 30-60s。

2.1.4 加压训练的安全性及注意事项

虽然有大量研究和实验证明加压训练的良性训练效应，但其安全性问题仍不容忽视，因此如何安全的设置加压训练至关重要。Madarame 等研究发现不仅发现 D-二聚体和纤维蛋白降解产物（FDP）增加，反式激活蛋白抗凝血酶 III 复合体（TAT）没有显著变化，血栓形成指标也没有显著变化^[44]。此外，Pinto 的研究表明，高血压患者在接受加压训练后，血液动力学和心血管反应明显增强，因此，在心血管疾病患者中，应当谨慎考虑加压训练的安全性和有效性^[45]。

除心血管系统以外，使用不合理的加压袖带、不合理的加压压力、不合理的运动模式，不仅会导致器材损耗率提高，还会让参与者产生不适，甚至有可能会损害健康。有学者提出，在进行加压训练之前不仅应对参与者进行加压训练风险评估，排除血管血液方面、心肺功能方面以及神经感觉方面存在潜在风险的^[46]，还要制定合理有依据的运动方案，才能让加压训练对于普通健康人群来说是一种安全可靠的训练方式。所以为了参与者的健康和实验的正常进行，本研究在筛选参与者的过程中，有着严格的标准。

2.2 血管内皮功能

血管内皮细胞（Endothelial Cell，EC）也称为内皮细胞，它是血管壁内外两侧液体、气体和大分子物质可以选择性透过的屏障，它们一般位于心脏、血管和淋巴管内表面，是一层扁平的鳞状上皮细胞^[47]，具有感觉和效应的功能，又能有效的防止有害物质进入血液^[48]。

从心脏心内室到毛细血管及淋巴微管，内皮细胞是沿着整个循环系统。按表面积计算，内皮是最大的器官之一，通过淋巴和血液传递信号物质来调节血流量、血管张力、血小板聚集和血管新生等生理过程，也能够调节血液和组织液之间物质代

谢的交换，以及包括控制肾小球滤过率、血管张力调节、止血、中性粒细胞的募集和激素转运的液体过滤。通过自分泌和旁分泌合成血管紧张及血管舒张素，从而调控血压，维持内环境稳态^[49]。

2.2.1 血管内皮功能的基本原理

血管内皮细胞是血管内壁上最薄的一层，它们不仅可以阻止血液外渗，还能够提供血液的流动，维护毛细血管的健康功用。此外，血管内皮细胞还具有接收和传递信息、分泌物质等功用，对毛细血管的健康运行至关重要。

血管内皮提供光滑的血管内表面，使血液能够在其内正常流动，同时也能够将血管内外区分开来，有选择性地允许物质的交换，比如水分子或其他小分子物质等^[50]。血管内皮细胞产生和分泌的生物活性物质数量众多，其中包括一氧化氮、内皮素、前列腺素、血栓素、白细胞介素等。这些物质在维持正常的血管功能、调节血流动力学以及参与机体免疫应答等方面发挥着重要的作用。此外，这些细胞还产生了抗凝物质、抑制血小板聚集的物质和促进凝血酶纤溶的因子^[51]。因此，血管内皮几乎与所有的其他组织和器官相互作用。

血管内皮细胞对于维持正常的血压、血流动力学以及组织器官的代谢需求等方面起着关键作用。这些细胞通过释放一系列生物活性物质来调节血管收缩和舒张，从而控制血管的直径和血流量。它们通过向器官和组织提供血液、提供营养物质、维持细胞气体交换和其他代谢需求来促进健康^[52]。血管内皮细胞可以合成各种血管活性因子，包括血管紧张素 II (AT II)、内皮素 1(ET 1)、内皮源性舒张因子(EDRF)等，它们能够调节血管张力，并与循环血管活性介质互相作用^[53]。

血管内皮细胞、血管神经和平滑肌三者之间的协同作用对于维持正常的血管张力，保持身体正常的生理功能，并且与心脑血管疾病的发生、发展以及预后有密切的关系。血管平滑肌细胞出现异常，如增生、肥大、变形等，就会影响它们对于内皮细胞释放的一氧化氮等生物活性物质的反应，从而导致血管舒张功能障碍，加剧高血压和动脉粥样硬化等疾病的发展。血管平滑肌细胞是决定血管舒张活动能否正常运作的关键因素，通常在血管壁的成熟过程中，血管平滑肌细胞会处于收缩状态。

血管内皮细胞对心血管疾病的产生和演变起着至关重要的作用，它们的机能和

结构受到长期暴露于心血管危险因素的影响，从机体的代谢变化到细胞凋亡，都会导致严重的损害，因此，保持血管内皮细胞的健康状态至关重要。由于血管活性物质的合成受到影响，血管的活性能力大大降低，血管壁结构发生变化，从而使血管硬度显著增加^[54]。

近年来，随着科学研究的不断深入，我们发现动脉粥样硬化的首要发病原因一方面是人体功能失调，心脑血管疾病的发生率极高，而且早期表现往往不明确，极易被忽略，所以，早期检测和确诊显得尤为重要，临床和社区可以将人体机能的检测当作早期确诊的重要依据。科学研究证明，早期发现和治疗动脉粥样硬化等心脑血管疾病可以有效预防，因而，对血管内皮功能的评估显得尤为重要，以便及早发现和治疗此类疾患。

2.2.1 血管内皮功能的评价方式和意义

经过深入研究，我们发现，目前用于检测血管内皮功能的方法主要分为有创和无创两类，前者多以外科手术的方式，如前臂体积测量、冠状动脉造影等，以获取更准确的结果^[55]。血管舒张功能检测、外周动脉张力测定、心外膜脂肪厚度测量、颈动脉内-中膜厚度测定等非侵入性方法可以有效检测血流介导的血管舒张功能、外周动脉张力及心外膜脂肪厚度等^[55]。Deanfield 等科学家的研究表明，早期筛查不适合使用过于复杂、耗费时间的检查方法^[56]。

内皮细胞具有强大的功能，可以促进血管舒张、抑制血栓形成、抵抗炎症，且主要是通过合成和分泌血管活性物质来发挥作用。血管舒张可以分为两种形式：第一种是内皮依赖性舒张，即在受到生理性刺激（如反应性充血）或药物（如乙酰胆碱）的作用下，血管内皮细胞会释放内皮舒张因子，对血管平滑肌产生作用，最终导致血管扩张^[57]。血管内皮结构和功能正常时，才能形成一系列作用，这取决于血管内皮的正常功能和状态。当内皮细胞受到损伤或功能发生异常时，NO 的释放量也会相应减少，从而降低血管扩张的能力^[58]。

非内皮依赖性舒张：指由于直接影响于毛细血管平滑肌，而不需要依赖于血管内皮外源性 NO 供体，如硝酸甘油、硝酸性钠等，从而达到毛细血管扩张的效果。经过对非内皮依赖性舒张功能的检测，可以更加准确地反映机体冠状动脉的扩张情况，

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/358114016063006111>