

运动干预功能障碍人群血流限制训练的文献热点可视化分析

<https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.3058>

王梦婷, 古艳萍, 任文博, 覃倩, 白冰怡, 廖远朋

2095-4344.3058

投稿日期: 2020-04-27

送审日期: 2020-04-30

采用日期: 2020-06-17

在线日期: 2020-09-25

中图分类号:

R459.9; R493; R496

文章编号:

2095-4344(2021)08-01264-06

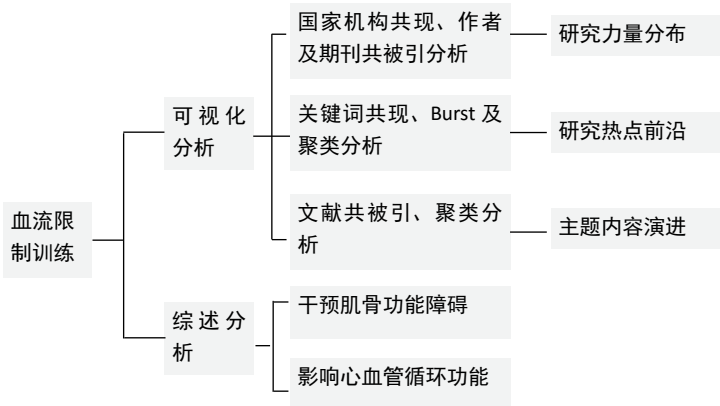
文献标识码: B

文章快速阅读:

文章特点一

△运用 CiteSpace 软件以可视化形式直观展现血流限制训练的前沿热点、主题内容及科研力量;

△从文献计量学角度把握该研究领域主要内容, 结合关键文献综述分析, 展望未来发展方向。



文题释义:

CiteSpace: 译为引文空间, 是在文献计量学、数据可视化背景下发展起来的引文分析软件, 基于研究领域相关的施引文献、引用文献两者形成的引文网络数据, 通过科学知识图谱, 可视化地呈现该研究领域相关知识的结构、发展规律以及分布情况。

血流限制训练: 是运用低负荷抗阻力量, 可有效增加肌肉力量和容积, 负荷刺激小, 损伤风险低, 由此被广泛应用在体育、康复和临床等领域, 具有一定的应用前景, 是一种干预肌肉骨骼、循环、代谢和神经系统疾病可能的运动疗法。但其训练方法、适应机制等研究仍需深入探讨。

摘要

背景: 血流限制训练作为一种新兴训练方式, 可有效增加肌肉力量和容积、提高肌肉功能, 为运动干预功能障碍提供一种新途径。而该领域目前从机制到应用存在诸多争议。

目的: 探究近年来血流限制训练应用的研究热点与主要内容, 为该领域未来研究发展提供新的思路 and 方向。

方法: 运用 CiteSpace 5.6.R3 软件对 Web of Science 核心合集数据库中 2009 至 2019 年有关血流限制训练的 441 篇文献进行可视化分析, 综合图谱和数据结果, 结合关键文献分析研究热点。

结果与结论: ①血流限制训练研究自 21 世纪以来呈上升趋势, 主要以美国、日本及其机构发表成果较多且影响力较高; ②研究主题发展趋势逐渐从对局部组织器官的影响向对身体机能影响发展, 从普通人群训练应用向特殊人群干预治疗发展; ③热点关键词为血流限制、力量、骨骼肌、肌肥大、生长激素和适应, 研究热点主要内容包括不同生理适应机制、训练方法学影响变量、功能障碍人群康复应用及心血管循环功能影响等; ④低负荷血流限制训练作为一种运动干预的有效方法, 逐渐被应用在骨骼肌肉、心血管、代谢及神经疾病的临床治疗或康复干预中, 未来研究可围绕血流限制训练长期运动效益、运动生理适应机制、不同人群应用效果、训练方法安全性等内容发展。

关键词: 骨; 肌肉; 血流; 可视化分析; CiteSpace; 功能; 心血管功能; 运动

Research hotspots of blood flow restriction training for dyskinesia based on visualization analysis

Wang Mengting, Gu Yanping, Ren Wenbo, Qin Qian, Bai Bingyi, Liao Yuanpeng

College of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China

Wang Mengting, Master candidate, College of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China

Corresponding author: Liao Yuanpeng, PhD, Professor, College of Sports Medicine and Health, Chengdu Sport University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China

Abstract

BACKGROUND: Blood flow restriction training, as an emerging training method, can effectively increase muscle cross-sectional area and improve muscular

成都体育学院运动医学与健康学院, 四川省成都市 610041

第一作者: 王梦婷, 女, 1996 年生, 四川省绵阳市人, 汉族, 成都体育学院在读硕士, 主要从事运动康复研究。

通讯作者: 廖远朋, 博士, 教授, 成都体育学院运动医学与健康学院, 四川省成都市 610041

<https://orcid.org/0000-0003-4741-035X> (王梦婷)

引用本文: 王梦婷, 古艳萍, 任文博, 覃倩, 白冰怡, 廖远朋. 运动干预功能障碍人群血流限制训练的文献热点可视化分析 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(8):1264-1269.



function, providing a new way for sports intervention of dyskinesia. However, there are many controversies in the field from mechanism to application.

OBJECTIVE: To explore the current research hotspots and main contents in the application of blood flow restriction training, and to provide new ideas and directions for future research and development in this field.

METHODS: A total of 441 articles regarding blood flow restriction training published from 2009 to 2019 were retrieved from the Web of Science Core Collection database for a visual analysis using CiteSpace 5.6.R3. Based on key literatures, the analysis was performed by integration of mapping and data.

RESULTS AND CONCLUSION: The research on blood flow restriction training has been on an upward trend since the 21st century, mainly published by the United States, Japan and their institutions with more achievements and higher influence. The development of the research theme has gradually changed from the impact on local tissues and organs to the impact on body functions, from the training and application in general populations to intervention therapy in special populations. Hot keywords are blood flow restriction, strength, skeletal muscle, muscle hypertrophy, growth hormone, and adaptation; its research hotspots mainly include different physiological adaptation mechanisms, training methods that influence variables, rehabilitation for people with dyskinesia, effects on cardiovascular function, etc. Low-intensity blood flow restriction training as an effective exercise intervention is mainly used in the clinical treatment and rehabilitation of musculoskeletal, cardiovascular, metabolic, and neurological diseases. Future research can focus on long-term exercise benefits, physiological adaptation mechanisms, application effects in different populations, and safety of training methods.

Key words: bone; muscle; blood flow; visualization analysis; CiteSpace; function; cardiovascular function; exercise

How to cite this article: WANG MT, GU YP, REN WB, QIN Q, BAI BY, LIAO YP. Research hotspots of blood flow restriction training for dyskinesia based on visualization analysis. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(8):1264-1269.

0 引言 Introduction

美国运动医学会 (American College of Sports Medicine, ACSM) 及美国医学会于 2007 年共同提出运动是良医 (Exercise Is Medicine, EIM) 健康促进项目, 运动促进健康理念对疾病预防和治疗影响深远^[1]。而康复领域则充分印证 EIM 宗旨, 运动疗法是学科的重要组成部分, 而运动干预功能障碍也是一直以来的热点、难点问题。主动参与是运动康复的重要原则, 对于术后、卧床、慢性病等人群, 体力低下、活动受限、无法负重等问题严重限制主动活动能力进而继发不同功能障碍^[2], 有研究指出 84 d 的卧床制动肌肉力量可显著下降 40%, 肌肉萎缩 17%^[3]。

血流限制训练 (blood flow restriction training, BFRT) 运用加压装置在肢体近端进行外部加压以限制静脉回流, 以 20% 的 1 个最大重复次数 (repetition maximum, RM) 的负荷进行抗阻运动可有效改善肌肉功能、提高有氧耐力和预防肌萎缩^[4-6], 其相较于传统力量训练负荷刺激小、损伤风险低且易于接受, 为运动干预功能障碍人群提供一条新治疗途径^[7]。

近年来, 国内外研究均证实血流限制训练具有广阔的研究前景和应用价值^[8-9]。科学知识图谱可以显示科学知识的发展进程与结构关系, 主要表现知识单元或知识群之间的复杂关系, 进而用于研究领域的科学合作、前沿热点及知识演进等分析^[10]。目前中国研究尚无对血流限制训练研究热点及内容较系统、直观的可视化分析。因此, 文章运用 CiteSpace 软件进行知识图谱可视化分析, 旨在通过相关领域的主要研究国家、机构、学者、关键词、被引文献及期刊等的知识图谱及其相关数据, 把握当前研究热点, 梳理领域发展历程及趋势, 发掘目前存在的问题, 以展望未来研究方向, 为深入开展该领域科研和临床工作的学者及专家等提供参考。

1 资料和方法 Data and Methods

1.1 资料来源 作者于 2020 年 2 月检索, 时间跨度 2009 年至 2019 年; 检索数据库为 Web of Science 核心合集, 索引为 SCI-EXPANDED; 检索策略: 检索式: (TS=(“blood flow restrict*” training OR KAATSU training OR “vascular occlusion” training)) AND 语种: (English) AND 文献类型: (Article OR Review), 共得到文献 442 篇。

1.2 文献可视化分析方法

1.2.1 可视化网络构建 数据采用全纪录与引用参考文献, 纯文本格式, 导入 CiteSpace 5.6.R3 软件, 文献处理剔除 1 条文献记录信息不全的文献后, 得 441 篇文献。设置参数时区选择 2009 至 2019 年, 分割为 “2” 年。主题词术语来源默认全选, 数据筛选为 Top20 进行显示, 图谱修剪的修正算法选择路径寻找 (Pathfinder)、修剪切片网络 (Pruning sliced networks)、修剪合并网络 (Pruning the merged network); 视图可视化默认选择静态集群视图 (Cluster View-Static) 和显示合并网络 (Show Merged Network)。

1.2.2 节点类型 分别选取国家、机构、关键词、学科作共现分析, 对关键词作聚类分析和突现性分析; 选取被引文献、被引作者, 被引期刊为节点作共被引分析, 被引文献作聚类分析, 分析知识演进。以上根据不同节点合理设置不同阈值, 绘制清晰、直观科学知识图谱, 并总结分析数据。

1.2.3 指标解读 频次 (frequency) 为节点出现次数, 高频关键词反映学科研究热点, 高被引频次节点代表学科基础知识共同体, 可反映某阶段研究主题; 中心度 (Sigma 值) 为综合中介中心性和突现性的值, 高中心度节点为连接不同节点间的特殊点, 起 “枢纽” 作用, 是结构和引文的关键部分。图谱中引文年环的大小与频次成正比, 颜色代表节点出现年份, 时间递进颜色由冷色至暖色; 外圈紫色圆环标注表示该节点有较大中介中心性 (centrality), 是图谱中的关键节点^[10-11]。

2 结果 Results

2.1 发文量 血流限制训练研究发文整体呈现缓慢 - 平稳 - 迅速的上升趋势, 见图 1, 自 2009 年开始出现增长, 2010 至 2014 年发文量呈稳定发展状态, 2015 年至今呈现逐年上升, 近 2 年发文量大量增加, 说明血流限制训练相关研究不断受到学者们的重视。

2.2 学科分布 目前血流限制训练主要应用于体育科学 (246) 和生理学 (186) 2 个学科领域, 同时涉及基础医学研究、康复、神经科学等学科见表 1。近年来, 血流限制训练文献量出现爆发式增长, 出现更多新交叉学科, 如老年医学、营养学和生物物理学, 随着这些学科的发展, 血流限制训练更广泛应

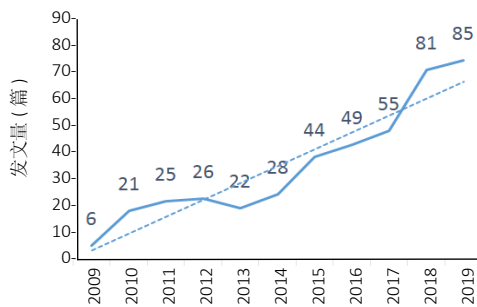


图 1 | 血流限制训练发文量年度趋势图

Figure 1 | The annual trend of publications regarding blood flow restriction training

表 1 | 血流限制训练发文主要学科分布 Top10

Table 1 | Top 10 main disciplines involved in the literatures regarding blood flow restriction training

研究学科	频次	%
Sport Science	246	55.8
Physiology	186	42.2
Medicine Research Experimental	19	4.3
Rehabilitation	18	4.1
Neurosciences	17	3.9
Geriatrics Gerontology	11	2.5
Nutrition Dietetics	10	2.3
Orthopedics	9	2.0
Clinical Neurology	8	1.8
Biophysics	6	1.4

表注：基于数据库将同一文献可能被分为 2 种或以上的学科，比例计算基于 441 篇文献

用在临床治疗中，如用于肌肉骨骼康复、神经血管疾病和代谢疾病等干预。

2.3 研究影响力分布

2.3.1 国家与机构分析 美国在血流限制训练领域研究发文量达 182 篇，日本发文量 61 篇，存在突现性 (Burst=12.98)，其次是巴西 (81)、澳大利亚 (38)、英国 (30)、加拿大 (25)、丹麦 (21) 和德国 (15) 等。以日本、英国、新西兰和丹麦等与其他国家之间合作较多，而中国的相关研究仅 2 篇，国内研究在国际上影响力较小。美国、巴西、日本和澳大利亚 4 国研究机构处于领先地位，同时具有较大影响力。美国密西西比大学 (49) 研究成果最多，其次为俄克拉荷马大学 (44)、日本东京大学 (33)、圣保罗大学 (25) 和迪肯大学 (10)，而俄克拉荷马大学发表文献影响力最大，合作机构较多，中心度为 0.42，见图 2。

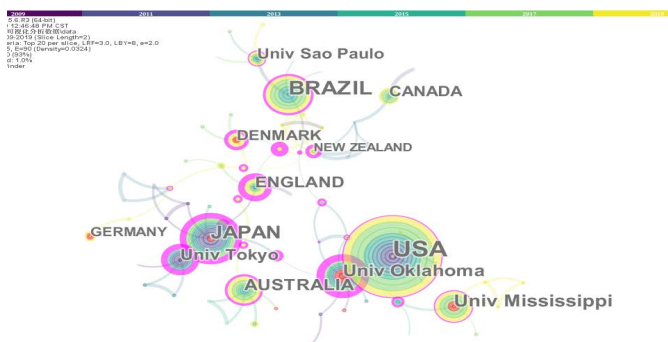


图 2 | 国家 / 机构合作关系图谱

Figure 2 | Map of country/institution cooperation relationship

2.3.2 作者与发表期刊分析 频次前 5 位被引作者 TAKARADA Y(255 次)、LOENNEKE JP(246 次)、ABE T(202 次)、YASUDA T(189 次) 和 KARABULUT M(119 次)，为该研究领域的关键作者，具有较高学术地位。频次，中心度排名靠前期刊为《J Appl Physiol》(401 次，1.25)，《Med Sci Sport Exer》(398 次，0.80)，《Eur J Appl Physiol》(397 次，0.72)，《J Stren Cond Res》(274)，《Scand J Med Sci Sport》(271 次，0.42)，见图 3，主要为运动生理学和体育科学领域相关杂志。

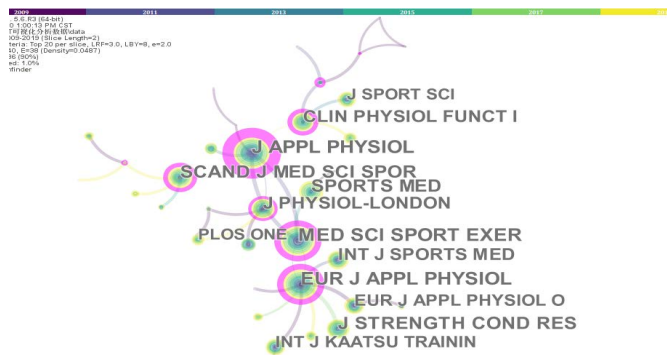


图 3 | 血流限制训练发期刊共被引图谱

Figure 3 | The co-citation map of journals regarding blood flow restriction training

2.4 关键词共现分析 高频次关键词为血管阻断 (vascular occlusion, 187 次)、力量 (strength, 182 次)、血流限制 (blood flow restriction, 127 次)、骨骼肌 (skeletal muscle, 97 次)、肌肥大 (muscle hypertrophy, 90 次)；高中心度词为生长激素 (growth hormone, 1.14)、力量 (strength, 1.09)、骨骼肌 (skeletal muscle, 0.59)、适应 (adaptation, 0.57)、反应 (response, 0.45)，见图 4。采用 log-likelihood ratio 算法 (LLR) 提取关键词得 7 个聚类主题词，见图 5，模块值 (Modularity Q)=0.69>0.5，聚类结构显著；平均轮廓值 (Mean Silhouette)=0.92>0.7，聚类可信度高，各聚类内部主题词明确，各聚类主要关键词见表 2。

“肌肉功能、生长激素、肌肥大”为 2009 至 2014 年的突现热点，“肌肉蛋白合成调节”为 2011 至 2016 年突现热点，见表 3，说明血流限制训练对骨骼肌形态、功能的影响及其生理适应机制是学者们长期以来关注的焦点，其主要应用在发展肌力和促进肌肥大方面；提高运动表现、心肺适能

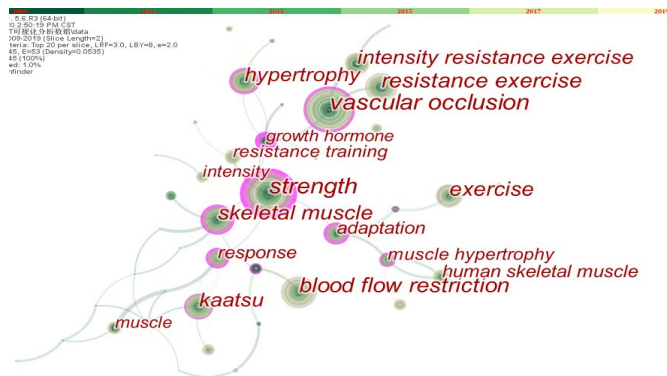


图 4 | 血流限制训练发关键词共现图谱

Figure 4 | Cooccurrence map of keywords regarding blood flow restriction training

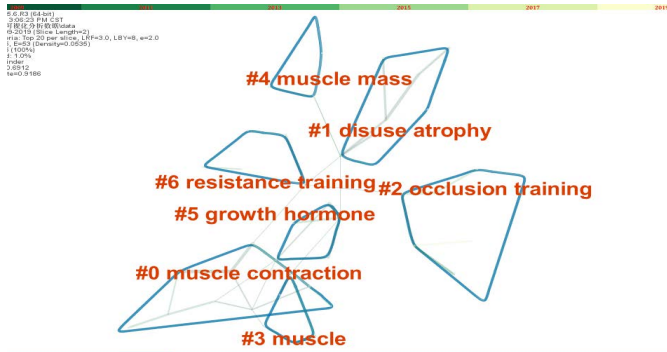


图5 | 血流限制训练发文关键词聚类图谱

Figure 5 | Cluster map of keywords regarding blood flow restriction training

表2 | 血流限制训练发文关键词聚类分析表

Table 2 | Cluster analysis of keywords regarding blood flow restriction training

聚类 ID	主要关键词
#0	肌肉收缩、知觉、损伤、纤维蛋白溶解、血栓形成、骨代谢、骨碱性磷酸酶和 I 型胶原交联胺基末端肽等
#1	废用性肌萎缩、力量、速率压力积、血压、血管功能和肌肉横截面积等
#2	加压训练、训练量、卧推、深蹲、血管生成、微血管过滤、毛细血管化和卫星细胞等
#3	肌肉、血乳酸、高水平运动员、心肺适能、血液动力学、无氧能力和耐力等
#4	肌肉容积、肌肉生长、细胞肿胀、微循环、纤维募集、自主疲劳、衰老、肌腱刚度、力矩和杨氏模量等
#5	生长激素、去甲肾上腺素、皮质醇、类胰岛素生长因子、睾酮、肌肥大、肌生长抑制素、热休克蛋白和哺乳动物雷帕霉素靶蛋白等
#6	抗阻训练、肌肉疲劳、磁共振成像、超声、主观疲劳程度和缺氧环境等

表3 | 血流限制训练发文突现词信息表

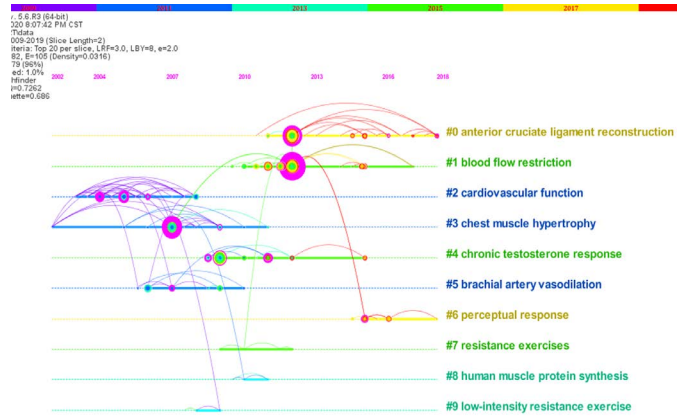
Table 3 | Information on burst words regarding blood flow restriction training

中文关键词	英文关键词	突现强度	2009 至 2019 年
生长激素	Growth Hormone	8.1127	■■■■■
肌肥大	Muscle Hypertrophy	7.8874	■■■■■
肌肉功能	Muscular Function	10.2514	■■■■■
力量训练	Strength Training	3.8345	■■■■■
激素反应	Hormonal Response	2.7762	■■■■■
肌肉	Muscle	3.0807	■■■■■
蛋白合成	Protein Synthesis	7.5854	■■■■■
耐力	Endurance	4.4078	■■■■■
激活	Activation	5.0629	■■■■■
加压训练	Occlusion Training	5.0690	■■■■■

表注：“■■■■■”为突现词出现年份

和局部耐力等方面。另对心血管功能、血流动力学、内皮功能影响也是该领域研究热点之一，见表 2，随着研究领域的不断扩展，血流限制训练广泛应用在骨骼肌肉障碍、心脑血管疾病、代谢障碍（糖尿病、肥胖）、免疫和产后等领域^[12]。

2.5 文献共被引分析 采用 LLR 算法聚类分析，图谱模块值(Q)=0.73>0.5，聚类结构十分显著，平均轮廓值(MS)=0.70，各聚类可信度较高。绘制时间线视图，图中节点大小与频次成正比；颜色条带越暖，说明引文时间越晚，反之同理，外圈紫色圆环标注为关键节点文献。总结关键节点文献信息，见表 4。由图谱可知，血流限制训练主题演进可大致分为奠基萌芽时期(2007 年前)、系统成形时期(2008 至 2015 年)、迅速发展时期(2016 年后)，见图 6。



图注：年份颜色条带标注引文出现时间，对应图中网络连线；相同颜色聚类标签为同时期研究主题

图6 | 血流限制训练文献共被引时间线图

Figure 6 | Timeline for literature co-citation regarding blood flow restriction training

表4 | 共被引分析关键文献

Table 4 | Co-citation analysis of key literatures

作者	年份	频次	中心度	主要内容
TAKARADA 等 ^[18]	2004	14	0.67	低负荷力量训练与加压刺激相结合影响肌肉功能，提出加压刺激可能的生理影响机制
TAKANO 等 ^[19]	2005	31	0.49	低负荷血流限制训练影响运动后激素以及血流动力学变化，提出心血管疾病康复应用可能
FUJITA 等 ^[2]	2007	60	1.10	提出血流限制训练引起肌肉肥大可能的代谢以及细胞分子机制
RATAMESS 等 ^[20]	2009	80	0.14	健康人的抗阻训练模型，大强度负荷引起肌肥大适应
FRY 等 ^[14]	2010	70	0.14	血流限制训练影响老年人肌肉生长及其细胞分子机制，提出老年人肌肉康复应用可能
KARABULUT 等 ^[21]	2010	75	0.14	对比低负荷血流限制训练与传统抗阻训练在老年人肌肉力量训练中的效果
LAURENTINO 等 ^[15]	2012	101	1.27	提出血流限制训练肌肉生长在基因表达水平上的潜在机制
LOENNEKE 等 ^[16]	2012	121	0.60	定量验证加压强度主要受袖带宽度影响，总结提出血流限制训练可能的方法学变量

血流限制训练起源于上个世纪 60 年代，由日本学者首次提出，最早在 21 世纪初出现相关研究文献。初期主要围绕血流限制训练提高肌力、肌肥大、心血管反应及激素影响变化等内容展开。2007 年 FUJITA 等^[2]指出血流限制训练可通过影响下游效应器(核糖体蛋白 S6)磷酸化增加，激活哺乳动物雷帕霉素靶蛋白信号通路，以促进肌细胞增殖生长，初步揭示了其肌肥大适应潜在细胞分子机制。2008 至 2015 年该领域研究出现阶段性转折，基础研究领域得到重大进展，以肌纤维募集、激素效应、活性氧物种、细胞肿胀及肌肉损伤等主要理论假说，围绕介导肌肉蛋白信号通路或诱导卫星细胞增殖等热点内容展开深入的基础机制研究^[13]。期间 FRY 等^[14]学者成功验证在老年人群中相似肌肉肥大机制，LAURENTINO 等^[15]研究指出血流限制训练肌肥大适应与肌生长抑制素(Myostatin)及相关生长分化因子的 mRNA 表达变化有关。

同期，LOENNEKE 等^[16]提出血流限制训练方法学中影响变量争议，总结既往研究中受试大多使用同一绝对压力，加

压数值范围在 50–300 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa), 但被试间不同肢体围度及成分、血压、体位变化和肌肉收缩方式等因素均可影响同一压力下限制的血流量, 进而产生不同结果^[17]。相关基础、应用研究为血流限制训练的推广提供了多层次的科学依据。2016 年至今血流限制训练相关研究迅速发展, 被广泛应用在不同领域、不同的人群中, 在干预肌肉骨骼功能障碍和心血管循环疾病等主题存在诸多讨论。

3 讨论 Discussion

文章结果显示, 血流限制训练研究近年来发文量迅速增加, 研究前景可观。美国、日本机构影响力较高, 发表文献数量领先, 而中国在该领域研究成果仍显不足, 由此, 应鼓励中国学者加强与国外该领域相关机构的交流与合作, 同时积极开展课题自主创新研发, 利于推进国内该领域研究发展, 同时增强国际影响力。《J Appl Physiol》和《Med Sci Sport Exer》为主要文献发表期刊, 收录文献反映研究新动态, 提供一定研究基础参考。文章基于 CiteSpace 软件可视化分析可以直观掌握该领域研究的整体情况, 但该方法同样存在不足, 如仅单一的节点分析、软件无法同时分析多个数据库、图谱解读因人而异。另文章文献纳入仅来源于 Web of Science 数据库, 对该领域研究分析也存在一定局限性, 需进一步完善。因此, 文章将进一步就文献共被引结果详细分析近年研究热点内容。

3.1 血流限制训练改善肌骨功能障碍 近年来, 血流限制训练在肌肉骨骼功能障碍干预中应用逐渐增加, 主要包括老年疾病干预(关节炎、肌少症及骨代谢疾病)、术后功能锻炼(前交叉韧带重建及膝关节置换)及损伤恢复促进(髌股关节疼痛及跟腱断裂)等, 另见产后盆底肌恢复及下背痛干预报道^[22-23]。LOPES 等^[24] 研究对高龄老人运用低强度血流限制训练一定程度上延缓肌肉衰退, 提高肌肉功能。HUGHES 等^[25] 研究指出血流限制训练可以更大程度地减轻术后膝关节的疼痛和肿胀, 并增加关节活动范围。YOW 等^[26] 报道 2 例跟腱断裂患者在 30%1RM 负荷血流限制训练后近 6 周内重返运动。血流限制训练有效提高活动能力、促进损伤恢复, 是肌骨疾病及功能障碍进行快速康复、早期干预的有力手段。

血流限制训练可显著增加肌力和肌肉横截面积, 四肢和躯干的肌群均得到有益适应^[27-28]。MAY 等^[29] 研究指出下肢血流限制训练可增加经训练上肢力量和肌肉横截面积, 而未经训练上肢力量增加, 但肌肉横截面积无变化, 推测血流限制训练可产生神经肌肉适应, 神经肌肉控制能力提高可能与力量训练迁徙现象有关。一项系统性综述指出血流限制训练对骨骼代谢、形成和吸收具有积极作用, 可以增加骨形成标志物(骨碱性磷酸酶)表达, 减少骨吸收标志物(I 型胶原交联羧基末端肽)表达^[30]。在 14 周血流限制训练后跟腱弹性(刚度)和横截面积均产生适应性变化^[31]。血流限制训练可对机体运动系统不同器官组织产生积极影响, 因此, 在特殊人群预防肌肉萎缩和/或促进肌肉肥大、提高肌耐力; 或

在运动员提高运动表现、运动伤病恢复等研究中, 低负荷血流限制训练都具有一定的应用价值^[32-33]。

3.2 血流限制训练影响心血管循环功能 血流限制训练加压刺激减少静脉血回流, 运动中机体血液循环、血流动力学均发生一定变化。SHIMIZU 等^[34] 研究在老年人群中, 20%1RM 负荷血流限制训练后反应性充血指数和足部经皮氧分压均显著增加, 训练后外周循环增加, 血管舒张功能提高。另有研究指出冠心病患者 8 周(30%–40% 1RM)单膝伸展血流限制训练后血流动力学得到改善, 血管收缩压降低 6.77 mmHg^[35]。而血流限制训练产生积极外周血管适应, 主要与运动诱导血管生成的相关信号通路有关, 血流限制训练后使血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)及其受体(VEGFR-2)、缺氧诱导因子 1 α 以及一氧化氮合酶的 mRNA 表达增加^[36]。

一氧化氮合酶的激活促进一氧化氮产生, 而一氧化氮作为内皮重要的血管舒张因子, 用以维持血管完整性^[37]。另有研究指出低负荷血流限制训练后可能减少运动诱发内皮祖细胞动员, 可改善内皮细胞功能^[38]。血流限制训练促进外周循环、改善内皮功能, 为心脑血管疾病、周围神经血管疾病的治疗与康复提供可能途径^[12]。

目前血流限制训练对心血管功能影响研究似乎是正向的, 但已有研究报道存在样本量小、研究周期短, 存在研究发表偏倚等问题, 其结论有待进一步求证。RENZI 等^[39] 研究指出短期或长期血流限制训练会造成心脏负荷增加, 局部血流减少, 血管舒张功能下降。PINTO 等^[40] 研究指出高血压患者在血流限制训练中心率、收缩压、舒张压、心输出量等指标变化均明显增加。在血流限制训练相关并发症报道中, 心血管反应、内皮损伤、血栓形成仍是主要的潜在危险因素^[41]。

基于理论而言, 加压形成的机械应力可能导致血管壁张力变化、静脉顺应性降低, 血流量和切应力增加对内皮产生有害刺激^[42], 可诱导内皮氧化应激反应, 激活细胞促凋亡机制^[43]。同时代谢应激刺激可通过神经体液调节, 使交感神经过度兴奋, 引起剧烈心血管反应, 增加心血管不良事件发生风险^[44]。血流限制训练似乎并不影响凝血功能, 但一项系统性综述指出目前对于血流限制训练影响凝血功能研究^[45], 仅有 4 项临床随机对照试验, 结果相对局限, 还未有明确研究结论。综上, 血流限制训练对心血管影响及其机制存在诸多争议, 缺少系统性综述分析, 在相关临床疾病中的应用, 仍需进一步讨论。

3.3 结论 低负荷血流限制训练是一种有效的运动干预方法, 广泛应用在骨骼肌肉、心血管、代谢及神经疾病的临床治疗或康复干预中, 目前研究主题以对肌肉骨骼系统、循环系统的影响及其适应的生理机制研究为主, 其发展趋势随着交叉学科的出现, 逐渐从对局部组织器官的影响向对身体机能影响发展, 从普通人群训练应用向特殊人群干预治疗发展。目前存在诸多亟待解决的问题, 未来研究可围绕血流限制训练长期运动效益、运动生理适应机制、不同人群应用效果、训练方法安全性等内容发展。

作者贡献: 文章设计、图表整理由第一作者完成。资料收集及成文第一与其他作者共同完成。通讯作者完成审阅审核。

利益冲突: 文章的全部作者声明, 课题研究和文章撰写过程不存在利益冲突。

写作指南: 该研究遵守国际医学期刊编辑委员会《学术研究实验与报告和医学期刊编辑与发表的推荐规范》。

文章查重: 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。

文章外审: 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。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

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进行编辑、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。

4 参考文献 References

[1] 王正珍, 罗曦娟, 王娟. 运动是良医: 从理论到实践 — 第 62 届美国运动医学学会年会综述 [J]. 北京体育大学学报, 2015, 38(8): 42-49, 57.

[2] FUJITA S, ABE T, DRUMMOND MJ, et al. Blood flow restriction during low-intensity resistance exercise increases S6K1 phosphorylation and muscle protein synthesis. *J Appl Physiol.* 2007;103(3):903-910.

[3] TRAPPE S, TRAPPE T, GALLAGHER P, et al. Human single muscle fibre function with 84 day bed-rest and resistance exercise. *J Physiol.* 2004;557(2):501-513.

[4] LOENNEKE JP, WILSON GJ, WILSON JM. A Mechanistic Approach to Blood Flow Occlusion. *Int J Sports Med.* 2010;31(1):1-4.

[5] 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.

[6] 吴旻, 李倩, 包大鹏. 加压力量训练对下肢骨骼肌影响的 Meta 分析 [J]. 中国体育科技, 2019, 55(3): 20-26.

[7] HUGHES L, PATON B, ROSENBLATT B, et al. Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* 2017;51(13):1003-1011.

[8] PATTERSON SD, HUGHES L, WARMINGTON S, et al. Blood flow restriction exercise position stand: considerations of methodology, application, and safety. *Front Physiol.* 2019;10:533.

[9] 李新通, 潘玮敏, 覃华生, 等. 血流限制训练: 加速肌肉骨骼康复的新方法 [J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(15): 2415-2420.

[10] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能 [J]. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.

[11] 石岩, 霍炫伊. 体育运动风险研究的知识图谱分析 [J]. 体育科学, 2017, 37(2): 76-86.

[12] HWANG PS, WILLOUGHBY DS. Mechanisms behind blood flow-restricted training and its effect toward muscle growth. *J Strength Cond Res.* 2019; 33(7S):S167-S179.

[13] PEARSON SJ, HUSSAIN SR. A review on the mechanisms of blood-flow restriction resistance training-induced muscle hypertrophy. *Sports Med.* 2015;45(2):187-200.

[14] FRY CS, GLYNN EL, DRUMMOND MJ, et al. Blood flow restriction exercise stimulates mTORC1 signaling and muscle protein synthesis in older men. *J Appl Physiol.* 2010;108(5):1199-1209.

[15] LAURENTINO GC, UGRINOWITSCH C, ROSCHEL H, et al. Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin gene expression. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(3):406-412.

[16] LOENNEKE JP, FAHS CA, ROSSOW LM, et al. Effects of cuff width on arterial occlusion: implications for blood flow restricted exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2011;112(8):2903-2912.

[17] SCOTT BR, LOENNEKE JP, SLATTERY KM, et al. Exercise with blood flow restriction: an updated evidence-based approach for enhanced muscular development. *Sports Med.* 2014;45(3):313-325.

[18] TAKADARA Y, TSURUTA T, ISHII N. Cooperative effects of exercise and occlusive stimuli on muscular function in low-intensity resistance exercise with moderate vascular occlusion. *Jpn J Physiol.* 2004;54(6):585-592.

[19] TAKANO H, MORITA T, HIDA 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.

[20] AMERICAN COLLEGE OF SPORTS MEDICINE. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(3):687-708.

[21] KARABULUT M, ABE T, SATO Y, et al. The effects of low-intensity resistance training with vascular restriction on leg muscle strength in older men. *Eur J Appl Physiol.* 2010;108(1):147-155.

[22] DUE U, KLARSKOV N, GRAS S, et al. Pelvic floor muscle training with and without supplementary KAATSU for women with stress urinary incontinence- a randomized controlled pilot study. *NeuroUrol Urodynam.* 2019;38(1):379-386.

[23] AMANO S, LUDIN AFM, CLIFT R, et al. Effectiveness of blood flow restricted exercise compared with standard exercise in patients with recurrent low back pain: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials.* 2016; 17:81.

[24] LOPES KG, BOTTINO DA, FARINATTI P, et al. Strength training with blood flow restriction-a novel therapeutic approach for older adults with sarcopenia? A case report. *Clin Interv Aging.* 2019;14:1461-1469.

[25] HUGHES L, ROSENBLATT B, HADDAD F, et al. Comparing the effectiveness of blood flow restriction and traditional heavy load resistance training in the post-surgery rehabilitation of anterior cruciate ligament reconstruction patients: a UK national health service randomised controlled trial. *Sports Med.* 2019;49(11):1787-1805.

[26] YOW BG, TENNENT DJ, DOWD TC, et al. Blood Flow Restriction Training After Achilles Tendon Rupture. *J Foot Ankle Surg.* 2018;57(3):635-638.

[27] 牛严军, 乔玉成, 范艳芝. 加压训练对受试者肌肉形态和功能的影响: Meta 分析 [J]. 首都体育学院学报, 2020, 32(1): 25-34, 86.

[28] YASUDA T, OGASAWARA R, SAKAMAKI M, et al. Relationship between limb and trunk muscle hypertrophy following high-intensity resistance training and blood flow-restricted low-intensity resistance training. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2011;31(5):347-351.

[29] MAY AK, RUSSELL AP, WARMINGTON SA. Lower body blood flow restriction training may induce remote muscle strength adaptations in an active unrestricted arm. *Eur J Appl Physiol.* 2018;118(3):617-627.

[30] BITTAR ST, PFEIFFER PS, SANTOS HH, et al. Effects of blood flow restriction exercises on bone metabolism: a systematic review. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2018. Doi:10.1111/cpf.12512.

[31] CENTNER C, LAUBER B, SEYNNES OR, et al. Low-load blood flow restriction training induces similar morphological and mechanical Achilles tendon adaptations compared with high-load resistance training. *J Appl Physiol.* 2019;127(6):1660-1667.

[32] 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.

[33] SCOTT BR, LOENNEKE JP, SLATTERY KM, et al. Blood flow restricted exercise for athletes: a review of available evidence. *J Sci Med Sport.* 2016;19(5):360-367.

[34] 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.

[35] KAMBIC T, NOVAKOVIC M, TOMAZIN K, et al. Blood flow restriction resistance exercise improves muscle strength and hemodynamics, but not vascular function in coronary artery disease patients: a pilot randomized controlled trial. *Front Physiol.* 2019;10:656.

[36] LARKIN KA, MACNEIL RG, DIRAIN M, et al. Blood flow restriction enhances post-resistance exercise angiogenic gene expression. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(11):2077-2083.

[37] FERGUSON RA, HUNT JEA, LEWIS MP, et al. The acute angiogenic signalling response to low-load resistance exercise with blood flow restriction. *Eur J Sport Sci.* 2018;18(3):397-406.

[38] MONTGOMERY R, PATERSON A, WILLIAMSON C, et al. Blood flow restriction exercise attenuates the exercise-induced endothelial progenitor cell response in healthy, young men. *Front Physiol.* 2019;10:447.

[39] RENZI CP, TANAKA H, SUGAWARA J. Effects of leg blood flow restriction during walking on cardiovascular function. *Med Sci Sports Exerc.* 2010; 42(4):726-732.

[40] PINTO RR, KARABULUT M, POTON R, et al. Acute resistance exercise with blood flow restriction in elderly hypertensive women: haemodynamic, rating of perceived exertion and blood lactate. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2016;38(1):17-24.

[41] LOENNEKE JP, WILSON JM, WILSON GJ, et al. Potential safety issues with blood flow restriction training. *Scand J Med Sci Sports.* 2011;21(4):510-518.

[42] PAIVA FM, VIANNA LC, FERNANDES IA, et al. Effects of disturbed blood flow during exercise on endothelial function: a time course analysis. *Braz J Med Biol Res.* 2016;49(4):e5100.

[43] JENKINS NT, PADILLA J, BOYLE LJ, et al. Disturbed blood flow acutely induces activation and apoptosis of the human vascular endothelium. *Hypertension.* 2013;61(3):615-621.

[44] SPRANGER MD, KRISHNAN AC, LEVY PD, et al. Blood flow restriction training and the exercise pressor reflex: a call for concern. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* 2015;309(9):H1440-H1452.

[45] NASCIMENTO DDC, PETRIZ B, OLIVEIRA SDC, et al. Effects of blood flow restriction exercise on hemostasis: a systematic review of randomized and non-randomized trials. *Int J Gen Med.* 2019;12:91-100.