

# 血流限制训练对运动员最大摄氧量的影响 及其作用机制研究进展

单鑫海<sup>1,2</sup> 朱欢<sup>1,2</sup> 陈自华<sup>1,2</sup> 李淼<sup>1,2</sup> 胡江平<sup>3</sup> 陆碧琼<sup>3</sup> 周慧敏<sup>4</sup> 周术锋<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>湖北民族大学运动科学研究中心, 恩施土家族苗族自治州 445000; <sup>2</sup>湖北民族大学硒资源研究与生物应用湖北省重点实验室, 恩施土家族苗族自治州 445000; <sup>3</sup>广西民族师范学院体育学院, 崇左 532200; <sup>4</sup>徐州工业职业技术学院, 徐州 221000)

**摘要** 该研究总结了血流限制训练对运动员最大摄氧量( $VO_2\max$ )的影响, 并探讨了其中潜在的作用机制, 为提高运动员 $VO_2\max$ 提供了新的理论依据和训练模式。研究表明: (1) 持续2周以上的血流限制结合低强度有氧训练、血流限制结合低强度抗阻训练及血流限制结合中、高强度的间歇训练均能显著提高运动员的 $VO_2\max$ , 且训练效果优于传统训练模式。因此, 在运动训练中可将血流限制训练作为提高运动员 $VO_2\max$ 的替代训练方式, 不同运动项目可根据专项训练特点选择针对性的血流限制训练模式。另外, 血流限制训练还为运动员伤病期间竞技能力和身体状态的保持或提升提供了新的训练思路; (2) 增大心输出量、提高骨骼肌微循环功能、优化线粒体功能等是血流限制训练提高运动员 $VO_2\max$ 的主要机制; (3) 目前主要存在缺乏不同训练模式的训练效果比较、缺乏同种训练模式不同训练参数训练效果的比较、女性运动员研究不足、缺乏不良事件与安全性考量的系统性探讨以及缺乏作用机制整合等问题, 建议后续重点围绕以上问题展开研究。

**关键词** 血流限制训练; 运动员; 最大摄氧量; 心输出量; 微循环; 线粒体; 代谢应激

## Research Progress on the Effect of Blood Flow Restriction Training on Athletes' Maximal Oxygen Uptake and Its Mechanisms

SHAN Xinhai<sup>1,2</sup>, ZHU Huan<sup>1,2</sup>, CHEN Zihua<sup>1,2</sup>, LI Miao<sup>1,2</sup>, HU Jiangping<sup>3</sup>, LU Biqiong<sup>3</sup>, ZHOU Huimin<sup>4</sup>, ZHOU Shufeng<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>Sports Science Research Center of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China; <sup>2</sup>Hubei Key Laboratory of Selenium Resource Research and Biological Application of Hubei Minzu University, Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture 445000, China; <sup>3</sup>College of Physical Education, Guangxi Normal University for Nationalities, Chongzuo 532200, China; <sup>4</sup>Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221000, China)

**Abstract** This study summarizes the effects of blood flow restriction training on athletes'  $VO_2\max$  and explores the underlying mechanisms, providing new theoretical basis and training models for improving athletes'  $VO_2\max$ . The research shows: (1) blood flow restriction combined with low-intensity aerobic training for more than 2 weeks, blood flow restriction combined with low-intensity resistance training, and blood flow restriction combined with

收稿日期: 2026-03-09

接受日期: 2026-04-30

2024年广西民族师范学院科研团队项目(批准号: KYTD201404)、2025年湖北省自然科学基金(批准号: 2025AFD659)和2024年湖北民族大学博士科研启动基金(批准号: BS24039)资助的课题

\*通信作者。Tel: 15272988972, E-mail: 102099464@qq.com

Received: March 9, 2026

Accepted: April 30, 2026

This work was supported by the 2024 Scientific Research Team Project of Guangxi Minzu Normal University (Grant No.KYTD201404), the 2025 Hubei Provincial Natural Science Foundation (Grant No.2025AFD659), and the 2024 Doctoral Research Start-Up Fund of Hubei Minzu University (Grant No.BS24039)

\*Corresponding author. Tel: +86-15272988972, E-mail: 102099464@qq.com

moderate-to-high-intensity interval training can all significantly increase athletes'  $VO_2\max$ , and the training effects are better than traditional training methods. Therefore, blood flow restriction training can be used as an alternative training method to improve athletes'  $VO_2\max$  in sports training. Different sports projects can choose targeted blood flow restriction training modes according to the characteristics of specific training. In addition, blood flow restriction training also provides new training ideas for maintaining or improving the competitive ability and physical condition of athletes during injury periods; (2) increasing cardiac output, improving microcirculation function of skeletal muscles, and optimizing mitochondrial function are the main mechanisms by which blood flow restriction training improves athletes'  $VO_2\max$ ; (3) currently, there are problems such as lack of comparison of training effects of different training modes, lack of comparison of training effects of different training parameters of the same training mode, insufficient research on female athletes, lack of systematic discussion on adverse events and safety considerations, and lack of integration of mechanism studies. It is recommended to focus on these issues in subsequent research.

**Keywords** blood flow restriction training; athletes; maximal oxygen uptake; cardiac output; microcirculation; mitochondria; metabolic stress

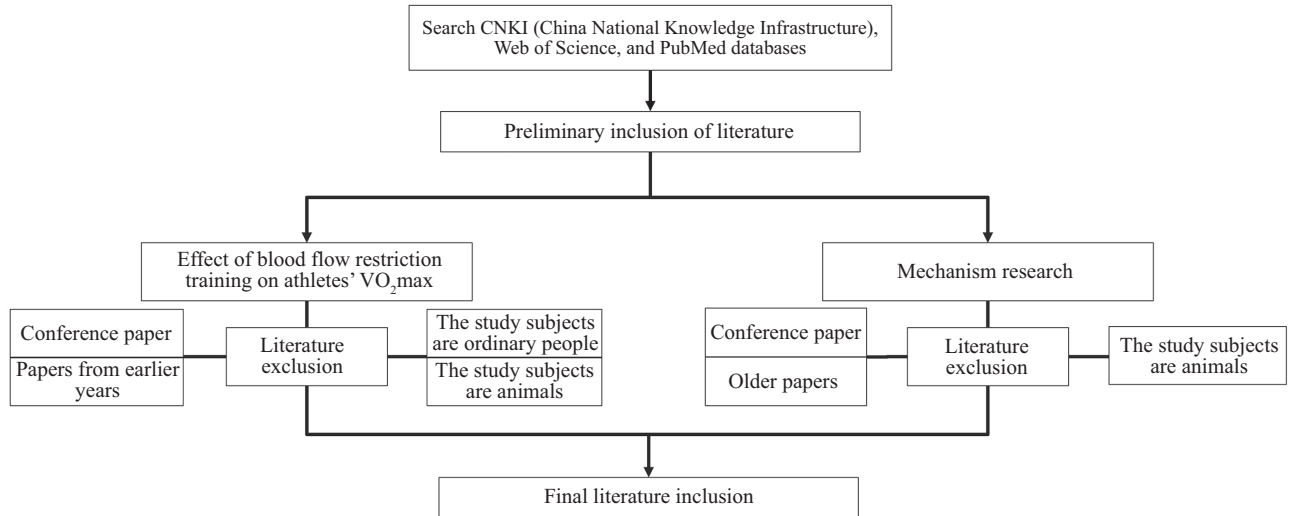
最大摄氧量(maximal oxygen uptake,  $VO_2\max$ )是指人体在进行大肌肉群参与的递增负荷直至力竭运动过程中,当氧运输系统的脏泵血功能与骨骼肌利用氧能力达到个体极限时,单位时间内所能摄取并利用的最大氧量<sup>[1]</sup>。 $VO_2\max$ 综合反映了呼吸系统、循环系统与肌肉代谢系统的整合功能,是评价人体有氧代谢能力和心肺耐力水平的核心指标,如美国运动医学学会已将 $VO_2\max$ 认定为评定个体有氧能力的“金标准”<sup>[2]</sup>。对于运动员而言,较高的 $VO_2\max$ 通常意味着更强的持续供能能力和更优的耐力表现,是决定竞技成绩的关键生理基础。因此,运动训练中提高运动员的 $VO_2\max$ 至关重要,同时也是热点研究话题和训练难题。虽然 $VO_2\max$ 主要受遗传因素影响,但运动训练仍能在一定程度上提高 $VO_2\max$ 。在运动训练中,针对 $VO_2\max$ 的传统训练模式主要是以长时间、中等强度的有氧训练为主。此类训练存在耗时长、提升效果慢等问题。在此背景下,低氧训练成为了提升运动员 $VO_2\max$ 的更有效方式,但是该训练模式对训练环境要求高,且训练方案中各项参数的科学制定存在较大难题,影响该类训练方式的推广应用<sup>[3-4]</sup>。因此,如何在常氧环境下以更短的时间提升运动员的 $VO_2\max$ 成为了训练难题。

随着血流限制技术在运动训练中的应用,常氧环境下的血流限制训练成为了有效的解决措施。血流限制训练又称加压训练,是一种通过止血带袖带等装置,对四肢近心端施加外部压力,在运动过程中

部分限制工作肌肉的动脉流入,使静脉血液聚集的训练方法<sup>[5]</sup>。其核心机制是通过局部加压,在目标肌肉处形成缺血-缺氧环境,从而在低强度训练中模拟高负荷训练下的代谢应激和肌肉适应效果<sup>[6]</sup>。有研究表明,长期血流限制训练能显著提高运动员的 $VO_2\max$ ,且较传统训练模式具有效果更好、耗时更短及运动强度更低等优点<sup>[7-9]</sup>。基于血流限制训练对 $VO_2\max$ 显著的训练效益及应用优势,其已成为提高运动员 $VO_2\max$ 的新的训练方式,并在训练实践中得到应用。但不同血流限制训练模式是否均能有效提高运动员的 $VO_2\max$ 尚缺乏统一的认识。另外,对于血流限制训练提高运动员 $VO_2\max$ 的生物学机制,相关学者主要从单一视角进行研究,缺乏归纳总结。基于此,本研究通过中国知网、PubMed、Web of Science等数据库,将“血流限制训练(blood flow restriction training)、加压训练(KAATSU training)、运动训练(exercise training)、运动员(athlete)、最大摄氧量(maximal oxygen uptake)、有氧能力(aerobic capacity)”等关键词相结合检索相关文献(图1),总结不同血流限制训练模式对运动员 $VO_2\max$ 的影响,并探讨其中的作用机制,为提高运动员 $VO_2\max$ 提供新的理论依据和训练模式参考。

## 1 血流限制训练对运动员 $VO_2\max$ 的影响

根据相关文献,运动员被定义为参与有组织竞技体育(团队或个人项目)的人群,参与者要进行系统性的高强度运动训练,并以定期竞技对抗为核心



将以运动员为研究对象的期刊论文视为高级别研究证据;将以普通人为研究对象的期刊论文视为较低级别研究证据,将学位论文视为低级别研究证据。

Journal papers with athletes as the study subjects are regarded as high-level research evidence; journal papers with the general population as the study subjects are regarded as lower-level research evidence, while dissertations are regarded as low-level research evidence.

图1 文献的排除标准及证据分级说明

Fig.1 Exclusion criteria for literature and explanation of evidence grading

活动特征,以运动成绩与竞技表现为重要目标<sup>[10-11]</sup>。本研究对运动员的定义将参考此标准。

### 1.1 血流限制下的有氧训练对运动员VO<sub>2</sub>max的影响

有氧训练是指以大肌肉群参与的、节律性的、持续较长时间的中低强度运动。在有氧训练过程中,人体通过改善呼吸系统的功能提高机体的VO<sub>2</sub>max。但是由于训练强度较低,对身体的刺激相对温和,该种训练方式对运动员VO<sub>2</sub>max的提升速度较慢,且易进入瓶颈期。相比于传统的有氧训练,血流限制下的有氧训练能更有效提升运动员的VO<sub>2</sub>max。

PARK等<sup>[12]</sup>以男子篮球运动员为研究对象,发现2周下肢血流限制结合低强度步行训练(160 mmHg逐步增至220 mmHg,大腿根部加压,袖带宽11 cm,坡度5%,20%~40%最大心率,3 min/组×5组,2次/d,6 d/周)能显著提高运动员VO<sub>2</sub>max,但单纯的步行训练不能提高运动员VO<sub>2</sub>max。在该研究中,运动员的运动强度仅为20%~40%最大心率,属于低强度有氧训练。但该强度下的血流限制训练仍能显著提高运动员的VO<sub>2</sub>max,且训练周期仅需2周。由此可见,血流限制刺激是提升运动员的VO<sub>2</sub>max的重要因素,运动员对该刺激有较高的敏感性。另外,该研究也为伤病恢复期运动员的训练提供了可参考的模式。由于运动强度较低,伤病恢复期的运动员可采用该训练模式保

持心肺耐力水平。HELD等<sup>[13]</sup>以高水平赛艇运动员(男12女4)为研究对象,发现5周下肢血流限制训练结合划船有氧训练(自制弹性绷带,压力为绷带最大长度的75%,大腿根部,袖带宽13 cm,血乳酸<2 mmol/L,10 min/组×2组,3次/周)和有氧划船训练均能提升运动员的VO<sub>2</sub>max,但血流限制组的提升幅度更大。虽然该研究证实血流限制下的低强度有氧训练能提高运动员的VO<sub>2</sub>max,但所使用的加压装置为自制绷带,而非标准化的加压设备,因此该研究无法在袖带宽度、加压压力等方面实现标准化,其科学性有待进一步探讨。

针对这一问题,后期HELD等<sup>[14]</sup>采用了标准化的加压袖带,发现5周上肢血流限制结合低强度游泳训练(75%个体闭塞压,上肢近心端,袖带宽8 cm,10 min/组×2组,3次/周)能显著提高男性高水平游泳运动员VO<sub>2</sub>max,而对照组运动员无显著变化。对于赛艇、游泳等有氧运动项目,VO<sub>2</sub>max是决定运动表现的核心因素。以往多采用长时间(单次)中等强度的有氧训练模式,存在耗时长、疲劳程度深等问题。血流限制下的有氧训练不仅大幅度缩减了训练时间,且运动员承受的运动强度更低,因此该种训练方式在训练实践中更具应用潜力。在该研究中,对照组运动员VO<sub>2</sub>max未出现类似变化,其原因可能是训练强度和训练量过低,无法对运动员产生有效的刺

激<sup>[14]</sup>。此外, CHEUNG等<sup>[15]</sup>研究发现, 6周血流限制结合跑步训练(100%个体动脉闭塞压, 大腿近端, 坡度5%, 5 km/h, 19 min/次, 3次/周)能显著提高耐力运动员 $VO_2max$ 。由于该研究采用的压力达100%个体动脉闭塞压, 实验后仅有7人(实验前为16人)完成实验内容, 其原因与较高的疼痛感和能量消耗有关。这提示, 血流限制压力过高会使运动员产生明显的不良反应, 导致运动员依从性下降以及受试者流失。

CHEN等<sup>[16]</sup>进一步延长训练周期, 发现8周下肢血流限制结合跑步训练(1.3倍收缩压, 大腿近端, 袖带宽14.2 cm, 50%心率储备, 3 min/组×5组, 3次/周)和跑步训练均能提高男性耐力运动员(中长跑运动员、铁人三项和马拉松运动员) $VO_2max$ , 但血流限制组的提升幅度更大。该研究使用的袖带宽度达14.2 cm, 明显高于其他研究中的袖带宽度。随着袖带宽度的增加, 其血流限制的效果更好, 肌肉内部的缺氧缺血程度更深, 这会对肌肉、心肺等组织产生更深的缺血缺氧刺激以及产生更大的机械压力。在代谢反射和机械反射作用下, 运动员的心血管反射更明显, 如心率、每搏输出量显著增大, 进而提高 $VO_2max$ 。

但过宽的袖带也会使运动员肌肉等组织产生强烈的生理不适甚至疼痛感, 这可能会降低运动员的训练依从性并影响其身体机能的恢复。另外, 过宽的袖带还会产生更大的血压反应, 增大心脏的工作负荷强度<sup>[17]</sup>。因此, 需综合衡量运动效益和负面影响, 对于超宽袖带应谨慎使用。但该研究未记录和监控训练过程中运动员出现的不良反应, 这是该研究在研究内容上的重要缺失。此外, 该研究的研究对象并非来源于同一项目, 而是混合项目<sup>[16]</sup>。虽然这些项目均属于有氧项目, 但在专项水平、专项特点等方面仍具有差异, 可能会使运动员对血流限制训练的敏感性不同。因此, 即使是相同的训练方案, 不同项目运动员的训练收益可能也不尽相同。故该研究不仅要明确血流限制训练对运动员 $VO_2max$ 的影响, 且要进一步明确不同项目运动员训练效果的差异性, 进而为血流限制训练在不同项目中的应用提供支撑。虽然以上皆提示, 血流限制结合低强度有氧训练能显著提高运动员的 $VO_2max$ , 但研究结果主要基于男性运动员, 女性运动员偏少。无论是加压量还是骨骼肌等组织的疲劳耐受能力等都存在性别差异, 进而影响训练效果, 所以该训练能否

在女性运动员中推广应用还需要更多研究支持。

此外, 上述研究均采用的是单一肢体(上肢或下肢)的血流限制训练, 对上下肢相结合血流限制训练模式探讨不足。针对上述问题, 吴明云<sup>[18]</sup>以同等性别比例的空手道运动员(8男8女)为研究对象并采用了上下肢轮替的血流限制训练模式。该研究发现, 10周上下肢轮替的血流限制结合有氧训练(上肢120 mmHg/下肢200 mmHg, 肢体近端1/3处, 上肢3 cm/下肢5 cm, 70%~85%最大心率, 30 min/次, 3次/周)和传统有氧训练均能提高运动员 $VO_2max$ 、12 min跑步距离, 但血流限制组提升幅度更大<sup>[18]</sup>。在该研究中, 采用上下肢轮替加压的训练模式, 相比单一的上肢或下肢加压训练, 该模式会对运动员产生更强烈更全面的刺激。另外, 上述研究在训练内容和训练强度上的设置也具有创新性, 为血流限制训练在运动训练中的应用提供了新的思路和方法。上述研究的训练频率为3次/周, 但每次的专项有氧训练内容不同。周一、周三、周五的训练内容分别是匀速跑、功率自行车、间歇跑。此外, 上述研究还根据不同专项训练内容设置了不同的运动强度(渐进模式的运动强度)。这种训练模式不仅能更有效地提升训练效果, 且能提高运动员的训练依从性和训练兴趣。对于渐进强度的血流限制下的有氧训练, 有研究指出持续4周以上(3次/周, 20~30 min/次, 总次数12次以上)的有氧耐力练习便能提高运动员的 $VO_2max$ <sup>[9]</sup>。因此, 为了提高血流限制训练的效果, 建议在训练中不同阶段采取渐进性的运动强度, 确保训练强度的有效性和科学性。

在单一压力的基础上, 有学者探讨了不同压力下的上下肢血流限制结合有氧训练对运动员 $VO_2max$ 的影响。李春晨<sup>[19]</sup>以田径专项男生为研究对象, 发现8周不同压力血流限制结合有氧训练(上肢100/140/180 mmHg、下肢140/180/220 mmHg, 上肢3 cm/下肢5 cm, 40~50 min/次, 心率≤无氧阈心率, 3次/周)与常规有氧训练均能提高运动员的 $VO_2max$ 、肺通气量, 但血流限制组的提高幅度更大, 且加压压力越大, 训练效果越显著。该研究不仅证实血流限制结合有氧训练能有效提高运动员的 $VO_2max$ , 且指出在一定范围内, 加压的压力越大,  $VO_2max$ 的提升效果越好。这是因为随着袖带压力的增大, 机体缺氧的程度会更深, 从而进一步促进毛细血管增生、线粒体生成, 提高肌细胞利用氧气的的能力等。但该

研究未说明加压袖带宽度,影响研究结果的推广应用。

此外,还有学者探讨了血流限制结合低强度有氧训练对伤病运动员的 $VO_2\max$ 的影响。PINHEIRO等<sup>[20]</sup>以1名患有膝骨关节炎的男性自行车手为研究对象,发现9周下肢血流限制下的低强度有氧骑行训练(80%个体闭塞压,大腿近端,30%最大输出功率,12 min/次×2次,2次/周)能提高运动员康复期内的 $VO_2\max$ 和平均输出功率。有氧能力是影响耐力运动员竞技表现的核心因素,在伤病期间停训会造成有氧能力的退化,进而降低运动员竞技水平。但在康复期间运动员无法进行传统的中高强度的有氧训练,因此血流限制结合低强度有氧训练可以作为运动员伤病期间的潜在训练方式,耐力运动员在伤病期间可以通过该训练方式保持身体机能状态。但该研究也具有局限性,其仅针对一名伤病运动员进行研究,研究结果的普适性不足。建议后续研究,增大样本量并针对不同专项伤病运动员、不同受伤部位运动员开展针对性的研究。

综上所述,现有的研究表明持续2~10周、3~6次/周、15~50 min/次的血流限制结合低强度有氧训练能提高运动员的 $VO_2\max$ ,且训练效果优于相同训练方案的有氧训练(图2)。其原因可能是血流限制结合低强度有氧运动可以在不增加主观疲劳度的基础上,显著提高受试者的急性生理反应(如加深缺氧缺血程度),进而诱发更强烈的代谢压力、心血管反应等,使其效果要优于传统的有氧训练<sup>[21]</sup>。另外,由于训练强度较低,血流限制下的低强度有氧训练还可以作为运动员在伤病期间保持有氧能力的训练方式。

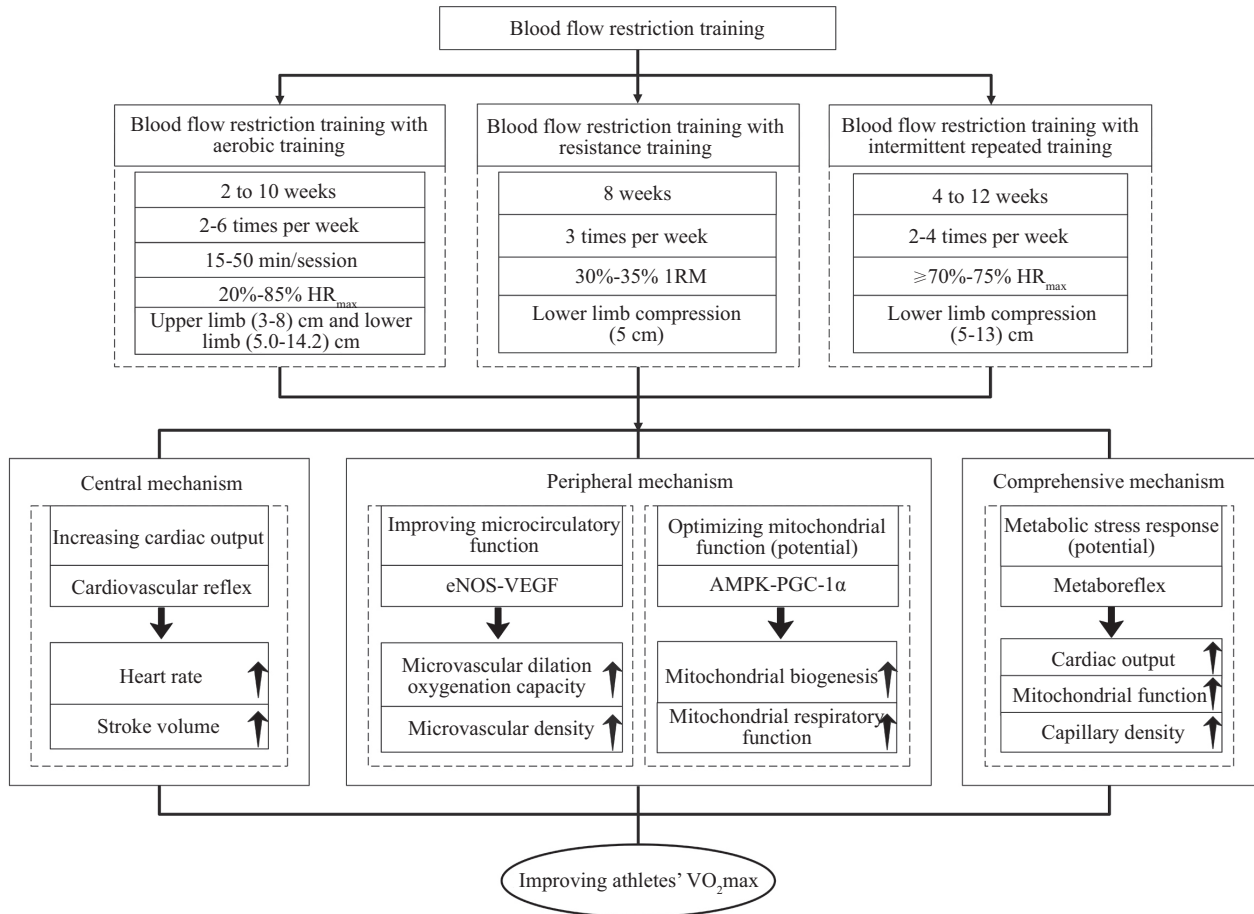
但目前相关研究也存在一定局限性,仅对单一训练模式、袖带宽度、加压位置等因素进行研究,缺乏对不同训练模式、干预时间等训练参数的对比研究,且有部分研究未明确袖带宽度。另外,目前相关研究人群侧重于男性运动员,女性比例不足,尤其缺少单独针对女性的研究,因此研究结果的普适性不足。此外,多数研究未记录和监控训练过程中运动员出现的不良反应以及不良反应的持续时间。这些不良反应可能会加重运动员训练过程中的疲劳程度以及影响运动表现,甚至导致运动损伤。同时,这些不良反应也会影响血流限制训练的训练效果,如降低运动员对运动负荷的耐受能力和敏感性。

## 1.2 血流限制结合抗阻训练对运动员 $VO_2\max$ 的影响

既往的研究表明,传统抗阻训练对 $VO_2\max$ 的提升干预效果有限,尤其对具有一定有氧能力基础的运动员<sup>[22]</sup>。这是由于传统抗阻训练主要诱导快肌纤维的增粗,并且以磷酸原系统和糖酵解系统供能为主,对运动员的有氧供能系统不能产生有效的刺激<sup>[23]</sup>。但在传统抗阻训练基础上施加血流限制刺激能有效提升运动员的 $VO_2\max$ 。

张娜<sup>[24]</sup>以男子公路自行车运动员为研究对象,发现8周下肢血流限制抗阻训练[180 mmHg,大腿近端,袖带宽5 cm,深蹲、臀推、杠铃硬拉和弓箭步蹲训练,35% 1RM(one repetition maximum),3次/周]能够显著提高运动员的 $VO_2\max$ ,而高强度抗阻训练(70%~80% 1RM)对 $VO_2\max$ 无显著影响。王明波等<sup>[25]</sup>得出相似结论,8周下肢血流限制抗阻训练(200~220 mmHg,大腿近端,袖带宽5 cm,深蹲、硬拉等练习,30% 1RM,3次/周)能显著提高高水平男子手球运动员 $VO_2\max$ 、30 m加速跑成绩,而传统高强度训练组(70% 1RM)的训练效果不显著。以上研究揭示,传统高强度抗阻训练(70%~80% 1RM)不能显著提高运动员的 $VO_2\max$ ,而血流限制抗阻运动能在较低的运动强度(30%~35% 1RM)下提高运动员的 $VO_2\max$ 。这是由于血流限制抗阻训练能局部限制动脉血流入并完全阻塞静脉血回流,创造了一种“高压缺氧”的微环境,使快肌纤维快速疲劳导致慢肌纤维得到更多刺激,并且缺氧环境会促进红细胞的生成、线粒体密度的增加以及毛细血管增生等,进而引起机体 $VO_2\max$ 的提升<sup>[26]</sup>。而传统的高强度抗阻训练主要是动员快肌纤维工作,无法提高慢肌细胞对氧气的利用能力。

综上所述,现有的研究表明传统的高强度抗阻训练不能有效提高运动员 $VO_2\max$ ,而血流限制结合抗阻训练能以更低的运动强度(20%~35% 1RM)显著提高运动员的 $VO_2\max$ (图2)。当前,血流限制训练有血流限制结合有氧训练、抗阻训练及高强度间歇性训练等多种方式,其中血流限制抗阻训练是最常用的方式。但既往的研究主要针对运动员的肌肉肥大、肌肉力量等,而对运动员有氧能力的研究较少。基于上述研究结果,建议运动员在日常训练中将血流限制结合抗阻训练作为提升 $VO_2\max$ 的训练手段,在提升运动员肌肉力量的同时提高运动员的有氧能力,以获得综合的训练收益。但目前相关研究成果



图中向下箭头代表上游通路介导下游生理过程发生改变, 体现信号/生理机制的因果传导关系; 向上箭头表示对应生理指标、组织结构或功能水平上调和提升。HR<sub>max</sub>: 最大心率。

The downward arrow in the figure represents the upstream pathway mediating changes in downstream physiological processes, reflecting the causal transmission relationship between signals/physiological mechanisms; the upward arrow indicates the upregulation and enhancement of corresponding physiological indicators, tissue structure, or functional levels. HR<sub>max</sub>: maximal heart rate

图2 血流限制训练对运动员VO<sub>2</sub>max的影响及作用机制

Fig.2 Effects of blood flow restriction training on athletes' VO<sub>2</sub>max and underlying mechanisms

仍较少, 尤其是缺乏短周期(如4~6周)的训练研究。另外, 上述研究仅探讨了单一肢体(下肢)、单一袖带宽度(5 cm)下的血流限制抗阻训练对运动员VO<sub>2</sub>max的影响。不同袖带宽度、加压位置等会对训练效果产生不同的影响, 因此相关研究结果的普适性和推广性不足, 还需更多的研究予以支撑。

### 1.3 血流限制结合间歇性重复训练对运动员VO<sub>2</sub>max的影响

间歇性重复训练尤其是高强度间歇训练和冲刺间歇训练, 已被证实能有效提升运动员VO<sub>2</sub>max<sup>[27]</sup>。在高强度间歇性训练的基础上施加血流限制刺激能进一步提高运动员的VO<sub>2</sub>max。ELGAMMAL等<sup>[28]</sup>以男子篮球运动员为研究对象, 发现4周下肢血流限制结合全力冲刺间歇训练(100~160 mmHg, 大腿近端,

袖带宽8 cm, 30 s/组, 3组/次, 3次/周)与传统冲刺训练均能提高运动员的VO<sub>2</sub>max, 但血流限制组提升幅度更大。另外, 周志博等<sup>[29]</sup>以U17(年龄17岁以下)男子足球运动员为研究对象, 发现4周小场地血流限制结合高强度间歇训练(210 mmHg, 大腿近端, 袖带宽5 cm, 模拟比赛强度, 4节×3 min, 间歇1.5 min, 3次/周)均能显著提升运动员VO<sub>2</sub>max和骨骼肌再氧化率, 而高强度间歇训练赛组仅能提升VO<sub>2</sub>max, 且幅度小于血流限制训练组。骨骼肌再氧化率是反映运动后或间歇期内肌肉组织中氧合血红蛋白、肌红蛋白恢复速度的重要指标, 可以有效反映肌肉氧供与氧利用恢复能力, 其与VO<sub>2</sub>max的大小呈正相关, 是影响VO<sub>2</sub>max的重要指标。对于高强度间歇训练, 增大每搏输出量是提高VO<sub>2</sub>max的主要原因, 但其无法

通过外周机制(肌细胞利用氧的能力)提高 $VO_2\max$ 。其原因可能是随着运动强度的增大,活性氧自由基将大量产生,其会攻击肌细胞内线粒体以及损伤毛细血管内皮细胞功能,进而降低肌细胞摄取和利用氧的能力。

TANGCH AISURIYA等<sup>[30]</sup>进一步延长训练周期,发现12周下肢血流限制结合高强度间歇训练(30%个体闭塞压,大腿根部,袖带宽11 cm,4 min/组×4组,60%~80%最大输出功率,2次/周)与连续训练(65%~75%最大输出功率,75 min/次)或仅高强度间歇训练(80%最大输出功率,4 min/组×4组)均能提高男子公路自行车运动员 $VO_2\max$ 、峰值功率,但血流限制组的提升幅度更大。相比于其他研究,该研究中运动员的年龄相对较大(35~49岁)。随着年龄的增加,运动员的 $VO_2\max$ 会逐渐下降,而血流限制下的高强度间歇性训练能在降低总运动量的情况下,对运动员 $VO_2\max$ 产生更加显著的影响。另外,该研究还指出血流限制训练方案在老龄运动员中具有较好的安全性和耐受性,训练后肌酸激酶等肌肉损伤指标以及炎症方面没有明显的变化。因此,对于老龄运动员,血流限制下的高强度间歇性训练是提高 $VO_2\max$ 较为理想的训练方式。

但也有研究持不同结论。TÖRPEL等<sup>[31]</sup>研究发现,4周下肢血流限制结合高强度功率自行车间歇训练[(273±33) mmHg,大腿根部,袖带宽5 cm,4 min/组×3组,3次/周]与传统高强度间歇训练均能提升男性运动员最大输出功率,但两种训练方式均未能提高运动员 $VO_2\max$ 的相对值。其原因可能是在该研究中两种训练方案均未能产生高强度的代谢压力(两组受试者生长激素、胰岛素样生长因子-1均未出现显著变化),血流限制训练方案也未能较高强度间歇训练诱发更高的代谢压力和心血管反应。另外,该研究中运动员较高的竞技水平(实验前 $VO_2\max$ 已处于较高水平)和较短的训练周期也是导致运动员 $VO_2\max$ 未能显著提高的重要原因。这提示,血流限制训练对运动员 $VO_2\max$ 的影响与运动员 $VO_2\max$ 的基线水平有关。当运动员的 $VO_2\max$ 已处于较高水平时,血流限制训练可能无法进一步提高运动员的 $VO_2\max$ 。

虽然多数研究表明,血流限制下的高强度间歇训练能提高运动员 $VO_2\max$ ,但由于训练强度高,该种训练方式往往带给运动员的主观疲劳度过高,并增

大受伤风险。针对这一问题,有学者提出在训练间歇恢复期施加血流限制刺激。MITCHELL等<sup>[32]</sup>以竞技自行车运动员和铁人三项运动员为研究对象,发现4周下肢血流限制结合间歇骑行训练(120 mmHg,大腿上部,袖带宽10 cm,30 s/组,4~7组/次,休息期间进行2 min加压,2次/周)能显著提升运动员的 $VO_2\max$ ,而常规间歇骑行训练组无显著变化。该研究提示,在不影响训练负荷量和主观感知反应的前提下,训练休息期间施加血流限制也能有效提高运动员的 $VO_2\max$ 。休息期间施加血流限制刺激,能进一步降低局部组织的氧饱和度指数、摄氧量等,造成更深的代谢压力,进而刺激相关激素的释放和促进微血管生成,提高肌肉摄取和利用氧的能力。有研究指出,相比于高强度间歇性训练(100%最大有氧功率),血流限制联合高强度间歇训练(恢复期施加血流限制刺激)后,受试者的肌氧饱和度更低及心率、乳酸水平更高,且肌肉的激活程度更高、疲劳程度更轻<sup>[33]</sup>。但MITCHELL研究在设计上也存在局限性,所有的运动员均使用了统一的压力(120 mmHg),忽略了不同运动员对血流压力的耐受能力和反应,进而影响了肌肉的氧合水平和肌肉代谢产物的积累。

针对训练强度高的问题,可以采用中等强度的间歇性训练与血流限制相结合,避免运动员承受的运动强度过大。REZA等<sup>[34]</sup>以男子足球运动员为研究对象,发现2周下肢血流限制结合中等强度的间歇训练(140~180 mmHg,大腿根部加压,袖带宽13 cm,400 m间歇跑,3~4组/次,60%~70%心率储备,4次/周)与传统间歇训练均能提升运动员 $VO_2\max$ ,但血流限制组的提升幅度更大,同时运动员主观疲劳度更低。CHEN等<sup>[35]</sup>得出相似结论,6周下肢血流限制下的中等强度间歇训练(180~200 mmHg,大腿根部,袖带宽5 cm,4 min/组,4组/次,70%~75%最大心率,2次/周)与高强度间歇训练均能提升男子篮球运动员 $VO_2\max$ ,且血流限制组运动员的主观疲劳度更低。较低的主观疲劳度可能是由于间歇期袖带减压,从而增加血液回流促进肌肉疲劳的消除,为下一次间歇训练提供了更好的身体状态;同时提高运动员的依从性并降低损伤风险,这对血流限制训练在运动员训练模式的推广有积极作用。虽然上述研究均揭示血流限制下的中等强度间歇训练能降低运动员的主观疲劳感,但在加压的袖带宽度方面具有较大差异。有研究指出,相同的压力下宽袖带对应的血流限制程度、主

观疲劳度、疼痛评分等更高<sup>[36]</sup>。但在REZA等<sup>[34]</sup>的研究中(13 cm袖带宽度), 运动员在训练后的主观疲劳感仍较低, 其原因可能是整体训练强度偏低以及训练周期偏短(仅持续2周)。由此可见, 血流限制期间训练强度和训练周期会对运动员的疲劳感产生影响, 需谨慎设置运动强度和训练周期, 避免运动员产生过度疲劳。

综上, 现有的研究表明持续2~12周、2~4次/周的下肢血流限制结合间歇性训练能显著提高运动员 $VO_2max$ , 且该种方式具有耗时短、运动员的主观疲劳感低等优点(图2)。基于该种训练模式在训练时间、训练兴趣等方面的优势, 建议将该种训练方式作为提高运动员 $VO_2max$ 的重要方式。但如何在训练实践中选择合适的训练模式需进一步探讨。目前, 血流限制下的间歇性重复训练有血流限制联合中等强度间歇性训练、血流限制联合高强度间歇性训练以及高强度训练的间歇期施加血流限制刺激三种模式。若从训练效果角度考量, 可选择血流限制联合高强度间歇训练。该种训练模式能对运动员造成强烈的缺氧缺血刺激, 对 $VO_2max$ 的提升效果最好。但这种模式的运动强度大、运动员疲劳程度深, 可能会增大运动损伤的风险以及降低运动员的依从性。血流限制联合中等强度间歇训练可避免上述问题, 但该种训练模式对运动员的生理负荷相对较低, 训练效果有限。基于这两种训练模式的局限性, 运动员可选择高强度训练的间歇期施加血流限制刺激。这种模式既能保证训练效果, 又能避免运动员产生过度的疲劳。

## 2 血流限制训练提高运动员 $VO_2max$ 的机制

综合现有研究证据, 血流限制训练提高运动员 $VO_2max$ 的机制可归纳为中央与外周两大层面。在中央机制层面, 血流限制训练可能通过增加心脏泵血功能提升心输出量, 从而提高人体 $VO_2max$ 。在外周机制层面, 血流限制训练可能通过改善人体微循环功能, 并激活AMPK-PGC-1 $\alpha$ 通路促进线粒体功能(潜在机制)提高运动员 $VO_2max$ 。此外, 局部代谢应激反应所诱导的低氧与代谢物积累可作为综合中介进一步介导上述适应(图2)。

### 2.1 中央机制——增大心输出量

心脏功能水平对机体有氧能力具有显著影响,

其中心输出量作为直接反映心脏泵血功能的重要指标, 是决定 $VO_2max$ 的中心机制。长期血流限制训练能提高心脏的射血能力, 增大心输出量。PARK等<sup>[12]</sup>研究发现, 2周下肢血流限制结合低强度步行训练能显著提高运动员每搏输出量, 且训练期间运动员的心输出量也显著增加, 但单纯的步行训练未产生类似效应。其原因是无论运动强度还是整体运动量, 单纯的步行训练都未能提高心输出量的阈值。

另外, 赛前3周加压训练结合冲刺间歇训练和单纯冲刺间歇训练均能显著提高公路自行车运动员最大心率与每搏输出量, 使运动员在训练时具有更高的心输出量, 但血流限制训练组的提高幅度更大<sup>[37]</sup>。其原因是血流限制训练能提升心肌收缩量, 从而增强心脏的泵血功能; 同时血流限制训练所造成的代谢反射更强, 可促进血管强烈扩张, 减少血流阻力, 增加回心血量, 为心脏下次射血提供更多的血液储备量。此外, MITCHELL等<sup>[32]</sup>研究发现, 4周下肢血流限制结合间歇骑行训练和间歇性骑行训练均能提高运动员的心输出量, 但仅血流限制训练组 $VO_2max$ 得到提高。该研究提示, 除心输出量外, 血流限制训练还能通过其他机制(外周)共同提高 $VO_2max$ , 而单一的高强度间歇性训练无法产生类似效应。

综上, 血流限制训练会增大外周血管阻力, 呼吸肌与心脏为维持更高的供氧量需要额外做功, 即通过增大心率与射血分数提高心输出量, 保证经肺部摄取的氧气能够高效输送至外周组织, 使肺通气与肺血流之间维持良好的动态匹配, 进而提高整体气体交换效率, 最终引起 $VO_2max$ 的改变, 且这种效应可能受袖带宽度等因素的影响。随着袖带宽度的增加, 外周血管的阻力随之增大, 为了满足肌肉等组织的供氧供血需求, 心脏通过继续增大心输出量等代偿反应来满足机体的需求。血流限制训练对心输出量的影响可能还与袖带压力有关。相较于低压力条件, 高压血流限制可能诱发更显著的局部缺氧和代谢应激反应, 引起心脏产生适应性变化, 增强心脏泵血功能, 进而提升 $VO_2max$ 。

### 2.2 外周机制——提高骨骼肌微循环功能

人体外周氧气的输送与交换效率是影响有氧能力的重要因素。微循环是机体内物质交换的主要场所, 其结构和功能特征与骨骼肌氧供能力密切相关, 在外周氧交换过程中发挥着关键作用, 对 $VO_2max$ 有着重要影响<sup>[38]</sup>。目前, 对于微循环功能的评价主要

通过微血管舒张功能(血管反应性)、血流氧合状态、微血管密度等。在微血管反应性方面,主要通过局部热刺激、血流阻断等刺激评价血管的舒张能力。在血流氧合状态上,经皮氧分压(transcutaneous oxygen pressure,  $TcPO_2$ )和肌氧饱和度(muscle oxygen saturation,  $SmO_2$ )是常用指标<sup>[39]</sup>。 $TcPO_2$ 主要反映皮肤及浅层组织微循环的氧分压水平,可综合表征局部供血与氧弥散能力。 $SmO_2$ 则反映骨骼肌内血红蛋白与肌红蛋白的氧合状态,能够较为直接地揭示运动或缺血条件下肌肉氧供-氧耗平衡变化。

血流限制训练在短期内可能引起组织氧供受限,但长期反复刺激可促使微血管结构与功能发生适应性变化,进而提升微循环功能。彭永等<sup>[40]</sup>研究发现,6周低强度血流限制抗阻训练和高强度抗阻运动均能提高体育专业大学生微循环功能(微血管反应性 $\uparrow$ 、 $TcPO_2\uparrow$ 、 $SmO_2\uparrow$ ),且血流限制训练的干预效果更好。这提示,与传统高强度抗阻训练相比,血流限制结合低强度训练在诱导 $SmO_2$ 适应性改善方面显示出一定优势,其可通过较低负荷引起微血管功能和氧运输能力的显著变化。另外,耿宇<sup>[41]</sup>通过自身对照实验,发现2周单侧腿血流限制结合有氧联合抗阻训练也能显著提高运动员实验腿微血管热充血能力。该研究通过高频率、高运动量的训练模式,在较短的周期实现显著的效果,进一步说明血流限制训练对微血管反应性充血能力的积极作用。血流限制训练提高微血管反应性的机制,主要与促进内源性NO产生以及提高NO的生物利用度等因素有关<sup>[40,42]</sup>。

另外,血流限制训练对微血管密度的影响也是提升 $VO_{2max}$ 的重要机制。微血管密度作为反映骨骼肌微循环网络容量和交换潜力的重要结构性指标,直接决定了单位肌组织内可参与物质交换的毛细血管数量,是限制氧气弥散距离、提高氧扩散通量和增强组织氧提取能力的关键因素。BJØRNSSEN等<sup>[43]</sup>以高水平举重运动员为研究对象,血流限制结合抗阻运动能增加I型纤维周围毛细血管的数量。在这个过程中,VEGF水平的变化起到了重要作用。血流限制训练所诱导的局部低氧环境通过激活缺氧诱导因子-1 $\alpha$ (hypoxia-inducible factor-1 $\alpha$ , HIF-1 $\alpha$ )等缺氧相关信号通路,驱动血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)表达<sup>[44-45]</sup>。VEGF是一类高度特异性作用于血管内皮细胞的生长因子,

在血管生成和微血管重塑过程中发挥关键调控作用。HIF-1 $\alpha$ 是VEGF-A表达的重要调节因子,是细胞感知缺氧并启动适应性基因表达的关键转录因子,在连接缺氧刺激与血管生成及能量代谢适应中具有重要作用。TAYLOR等<sup>[46]</sup>研究发现,血流限制联合间歇冲刺训练和间歇冲刺训练均能促进男子运动员血液中过氧化物酶体增殖物激活受体 $\gamma$ 共激活因子1 $\alpha$ (peroxisome proliferator-activated receptor  $\gamma$  coactivator 1 $\alpha$ , *PGC-1 $\alpha$* )、*VEGF*及*VEGFR-2* mRNA的表达,且血流限制训练组*HIF-1 $\alpha$*  mRNA水平在运动后也显著升高。血流限制训练通过诱导局部缺氧环境,激活HIF-1 $\alpha$ 信号通路并上调VEGF表达,从而促进骨骼肌毛细血管生成与微血管结构优化,改善外周氧供条件,从而提升 $VO_{2max}$ 。

综上所述,微血管功能与结构限制外周氧供效率是影响 $VO_{2max}$ 的重要生理基础。血流限制训练通过外部加压改变局部血流动力学特征,在缺血、缺氧刺激下显著改善微血管扩张功能和提升血流灌注水平,并促进组织氧合能力的提升,为提升运动员 $VO_{2max}$ 提供了重要的外周生理学依据。

### 2.3 外周机制——优化线粒体功能(潜在机制)

线粒体是细胞内能量代谢的核心场所,其数量、结构完整性及功能状态直接决定机体有氧代谢效率和氧利用能力,是影响 $VO_{2max}$ 的重要外周机制<sup>[47]</sup>。运动训练是诱导线粒体生物发生与功能增强的重要方式<sup>[48]</sup>,而血流限制训练能在较低运动强度下对线粒体生物合成产生更加显著的影响。GROENNEBAEK等<sup>[49]</sup>研究发现,低负荷血流限制抗阻训练与传统高强度抗阻训练对普通健康人群骨骼肌线粒体蛋白合成速率、线粒体呼吸功能的改善效果相似。

有学者进一步研究血流限制训练诱导线粒体生物发生的上游分子调控机制。LI等<sup>[50]</sup>研究发现,血流限制联合抗阻训练和抗阻训练均能促进健康成年人血液中VEGF和PGC-1 $\alpha$ 的表达。该研究提示,血流限制训练可增强运动诱导的*PGC-1 $\alpha$* 转录反应。PGC-1 $\alpha$ 作为细胞能量代谢调控中的关键转录共激活因子,可通过调控多种线粒体相关转录因子,促进线粒体生物发生并增强氧化磷酸化能力,在维持线粒体数量与功能稳态中发挥重要作用。

另外,AMP激活的蛋白激酶(AMP-activated protein kinase, AMPK)作为细胞内重要的能量感应激酶,

在能量不足状态下被激活,通过上调PGC-1 $\alpha$ 的表达及活性,介导线粒体生物发生和氧化代谢能力的提升,从而在能量稳态维持和运动诱导的代谢适应中发挥关键作用。PREOBRAZENSKI等<sup>[51]</sup>研究发现,血流限制训练能诱导健康男性体内AMPK相关的乙酰辅酶A羧化酶(acetyl-CoA carboxylase, ACC)蛋白磷酸化水平增加,同时伴随PGC-1 $\alpha$  mRNA水平提高。ACC磷酸化增加通常被视为AMPK激活的经典下游标志,因此该研究进一步证实了血流限制训练对AMPK的激活效果。这提示,血流限制训练可能通过降低局部肌肉氧合水平并增强代谢引起能量应激,激活AMPK并上调PGC-1 $\alpha$ 表达,从而促进线粒体生物合成及功能改善。

但也有学者认为血流限制训练并不能改善细胞的线粒体功能。LAVIGNE等<sup>[52]</sup>研究发现,血流限制结合动态膝关节伸展训练并未引起普通健康人群线粒体呼吸能力的额外提升。不同研究结果的差异可能与实验设计有关。在LAVIGNE等<sup>[52]</sup>的研究中,采用的是自身对照实验,而非分组对照实验。虽然在实验过程中,不同的腿施加了不同的训练方案,但由于血液循环的整体性、神经调控的完整性等,两种训练方式的干预效果可能会相互影响,进而无法有效体现出干预效果。针对这一问题,建议后续研究在不改变训练方案的前提下,采用分组对照实验进一步研究。

综上,血流限制训练通过局部缺氧与能量应激等激活AMPK-PGC-1 $\alpha$ 信号通路提高线粒体生物合成能力并改善线粒体呼吸功能,进而提高肌细胞利用氧的能力,这是提高VO<sub>2</sub>max的重要外周机制。但目前相关研究主要以普通健康人群为研究对象,缺乏运动员群体相关的研究证据,因此该研究结论的证据等级和力度较低。不同人群对血流限制训练的敏感性和反应性可能存在差异,因此上述研究结果是否适用于运动员还需进一步研究,建议未来以运动员为研究对象,深入探讨血流限制训练对线粒体功能的影响。

#### 2.4 综合机制——代谢应激反应(潜在机制)

运动过程中形成的肌肉组织代谢微环境能通过促进氧气解离、线粒体生物发生与毛细血管生成等路径增强肌肉组织的供氧和利用氧的能力,以及通过心血管中枢反射效应增大心输出量,进而从中央和外周两个途径影响VO<sub>2</sub>max。血流限制训练通

过对机体局部形成缺氧缺血的环境,使靶肌群在低负荷条件下形成相对低氧与代谢物滞留状态,从而提高代谢微环境的生理效应。魏文哲等<sup>[53]</sup>研究表明,不同程度血流限制结合递增跑均能显著提高健康青年男性运动过程中的心率、通气量及血乳酸水平,且局部代谢压力与缺氧程度、加压压力相关。该研究认为,适度压力的血流限制可在动态有氧运动中增强代谢刺激强度,提高机体对低氧与酸性环境的耐受能力,从而对心肺功能产生积极影响。该结果从心肺的整体反应层面强化了血流限制训练通过提升代谢微环境的生理效益促进有氧适应的证据。另外,TEIXEIRA等<sup>[54]</sup>以普通健康男性为研究对象,相比于高负荷抗阻训练,血流限制下的抗阻运动产生的乳酸浓度更高,肌肉氧饱和度下降幅度更大。这提示,血流限制结合抗阻运动可提升局部低氧程度并导致H<sup>+</sup>与乳酸在肌内的滞留,从而强化代谢微环境的酸化与缺氧特征。因此,与传统低负荷训练相比,血流限制训练能够在较低机械负荷下诱发更强的代谢压力。这种代谢压力源于无氧糖酵解过程,其特征是随后代谢产物(如乳酸、氢离子、无机磷酸盐和肌酸)的积累,促进激素(如睾酮、生长激素)和肌细胞因子(如白细胞介素6)的释放。这些介质通过触发相关的信号通路促进线粒体生成和血管生成因子表达<sup>[51]</sup>。另外,这种代谢压力也会通过刺激交感神经提高心率和每搏输出量,增大心输出量。

综上所述,代谢微环境作为连接运动刺激与有氧适应的关键中介,局部低氧与代谢产物蓄积会降低运动时氧转运效率,同时提升心输出量。血流限制训练通过人为诱导局部缺氧与代谢物滞留,能在低机械负荷条件下放大代谢压力信号,强化代谢微环境的生物学效应。但上述研究同样是以普通健康人群为研究对象,研究证据的等级和力度较低,尚不能作为直接证据应用于运动员群体。

### 3 研究不足和未来的研究方向

#### 3.1 缺乏不同训练参数下训练效果的对比

目前血流限制训练领域相关研究在参数设置方面尚缺乏统一规范,尤其是在袖带宽度与加压策略的选择上存在较大差异。在相同加压压力条件下,较宽的袖带能够在更深层组织及更长的血管段上施加压迫作用,从而以较低的绝对压力值实现动脉血流限制,窄袖带往往需要更高的压力才能达到类似

效果。不同研究在加压压力设定策略上也有所不同,部分研究采用固定的绝对压力值(如180 mmHg),而其他研究则基于个体动脉闭塞压设定相对压力(如80%个体闭塞压),该差异是由袖带材质(如弹性或非弹性袖带)所造成的。但袖带材质的差异可能会影响训练效果、运动员训练依从性、训练舒适度等。目前,相关研究缺乏不同实验参数的对比实验,难以建立起标准化训练方案。鉴于此,未来需通过系统的参数比较研究,明确袖带宽度、材质及加压策略之间的交互作用,并在此基础上建立一套适用于不同性别及不同训练目标的核心参数标准,以推动血流限制训练机制研究的深入并提升其应用的安全性与科学性。

### 3.2 缺乏针对女性运动员的研究

当前研究多数以男性青年运动员为主要对象,对女性运动员群体的系统性探讨明显不足。性别相关的生理差异可能会导致训练产生不同的反应,但在既有研究中往往被忽视。女性在血管功能、肌肉围度和肌肉耐受力方面与男性存在显著差异,这会导致其在疼痛感知、局部压迫耐受性及疲劳特征等方面产生差异,且女性生理期相关激素可能进一步影响训练强度选择、运动负荷完成度及对血流限制刺激的敏感性。尽管少数研究采用了男女混合样本,但普遍存在性别比例失衡且未进行性别分层分析的问题,这会对研究结果产生干预。未来有必要在性别平衡的基础上,深入探讨女性及不同性别运动员对血流限制训练的差异性适应,为血流限制训练在女性运动员中的应用提供理论依据和方法参考。

### 3.3 缺乏不良事件与安全性考量的系统性探讨

目前,相关研究多聚焦于血流限制训练提升运动员 $VO_2max$ 的正面效益,而对潜在不良事件、风险人群及禁忌证缺乏系统性的探讨与总结。血流限制训练可能引发肌肉酸胀、肌肉疼痛、肌肉疲劳及延迟性肌肉酸痛,并存在诱发运动性横纹肌溶解症、运动性高血压等风险<sup>[36,55]</sup>。另外,PARK等<sup>[12]</sup>发现篮球运动员在血流限制训练期间出现了收缩压过高以及身体疼痛等不良反应。当运动员存在心脏功能不全(高强度训练所致)、运动性高血压、运动性贫血、急性运动损伤以及疲劳状态时,上述不良现象的发生率会增大。另外,对生理期女性运动员开展血流限制训练,可能诱发子宫痉挛,加剧其痛经程度。

随着袖带宽度增加、血流限制压力增大,上述

不良现象可能会进一步加重。有研究指出,当血流限制压力为100%个体动脉闭塞压时,16名运动员中仅有7人完成了6周的血流限制训练<sup>[15]</sup>。由此可见,血流限制训练诱发的不良反应在运动员群体中也有较高的发生率。但通过对相关文献梳理,发现仅有少量研究记录训练过程中运动员产生的不良反应以及训练后不良反应的变化,多数研究对训练安全性关注不足。针对这一问题,建议后续学者关注运动员训练过程中出现的不良反应、持续时间以及对运动表现的影响,系统评估不同干预参数下血流限制训练的安全性,从而保障血流限制训练在训练实践中的安全性。

### 3.4 缺乏深入的机制研究及各机制间的整合研究

目前,血流限制训练作用机制的研究大多集中在细胞等层面,对于其分子机制的系统解析仍较有限。另外,现有的研究主要通过单一路径探讨相应的作用机制,未从整体上进行研究。各机制之间是否存在相互关联或协同作用以及其在提升 $VO_2max$ 中的贡献等都需开展系统性研究。另外,虽然不同血流限制训练模式均能提高运动员 $VO_2max$ ,但其背后的作用机制和路径可能存在差异。目前,尚未发现有研究比较不同血流限制训练模式提高运动员 $VO_2max$ 的机制差异。解决上述问题,能深层次地揭示血流限制训练提高运动员 $VO_2max$ 的生物学机制,为血流限制训练在运动训练中的应用提供坚实的理论依据和支撑。

## 4 小结

(1) 持续2周以上的血流限制结合低强度有氧训练、血流限制结合低强度抗阻训练及血流限制结合中、高强度的间歇训练均能显著提高运动员的 $VO_2max$ ,且训练效果优于传统训练模式。因此,运动训练中可将血流限制训练作为提高运动员 $VO_2max$ 的替代训练方式,不同运动项目可根据专项训练特点选择针对性的血流限制训练模式。(2) 增大心输出量、提高骨骼肌微循环功能、优化线粒体功能等是血流限制训练提高运动员 $VO_2max$ 的主要机制。(3) 目前主要存在缺乏不同训练模式的训练效果比较、缺乏同种训练模式不同训练参数训练效果的比较、女性运动员研究不足、缺乏不良事件与安全性考量的系统性探讨以及缺乏作用机制整合等问题,建议后续重点围绕以上问题展开研究。

## 参考文献 (References)

- [1] CHARKOT J, BIENKOWSKI W, KUSY B, et al. The impact of maximal oxygen uptake ( $VO_{2max}$ ) on athletic performance and health: a review [J]. *Qual Sport*, 2025, 43: 61293-316.
- [2] 毕志远, 王欣欣, 顾正秋, 等. 临界功率: 生理学基础与实践应用[J]. 成都体育学院学报(BI Z Y, WANG X X, GU Z Q, et al. Critical power: physiological basis and practical application [J]. *Journal of Chengdu Sport University*), 2026, 52(3): 85-96.
- [3] 包大鵬, 郭振向, 周开祥, 等. 低氧训练模式的演进与发展理念[J]. 体育与科学(BAO D P, GUO Z X, ZHOU K X, et al. Evolution and development paradigms of hypoxic training modalities [J]. *Sport & Science*), 2025, 46(5): 94-102.
- [4] FENG X M, ZHAO L L, CHEN Y H, et al. Optimal type and dose of hypoxic training for improving maximal aerobic capacity in athletes: a systematic review and Bayesian model-based network meta-analysis [J]. *Front Physiol*, 2023, doi: 10.3389/fphys.2023.1223037.
- [5] KAMBIC T, JUG B, LAINSCAK M. Response: commentary: blood flow restriction exercise: considerations of methodology, application, and safety [J]. *Front Physiol*, 2021, doi: 10.3389/fphys.2021.665568.
- [6] 唐一丹, 屈成刚. 4周加压抗阻训练对男子公路自行车运动员下肢肌肉力量和冲刺能力的影响[J]. 辽宁体育科技(TANG Y D, QU C G. Effect of 4 weeks KAATSU resistance training on lower limb muscle strength and sprint ability of male road cyclists [J]. *Liaoning Sport Science and Technology*), 2022, 44(5): 63-9.
- [7] ZHANG Z K, GAO X J, GAO L. Effects of blood flow restriction training on aerobic capacity and performance in endurance athletes: a systematic review and meta-analysis [J]. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 2025, 17(1): 160-9.
- [8] DONG K, TANG J, XU C L, et al. The effects of blood flow restriction combined with endurance training on athletes' aerobic capacity, lower limb muscle strength, anaerobic power and sports performance: a meta-analysis [J]. *BMC Sports Sci Med Rehabil*, 2025, 17(1): 24-39.
- [9] 董宽, 徐成立, 田静, 等. 血流限制下耐力训练对有氧能力和下肢肌力及运动表现影响的Meta分析[J]. 中国组织工程研究(DONG K, XU C L, TIAN J, et al. Effects of endurance training with blood flow restriction on aerobic capacity, lower limb muscle strength, and sports performance: a Meta-analysis [J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*), 2024, 28(23): 3766-72.
- [10] KIM J H, MARTINEZ M W, GUSEH J S, et al. A contemporary review of sudden cardiac arrest and death in competitive and recreational athletes [J]. *Lancet*, 2024, 404(10468): 2209-22.
- [11] CAMPA F, CORATELLA G. Athlete or non-athlete? This is the question in body composition [J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 814572-5.
- [12] PARK S, KIM J K, CHOI H M, et al. Increase in maximal oxygen uptake following 2-week walk training with blood flow occlusion in athletes [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2010, 109(4): 591-600.
- [13] HELD S, BEHRINGER M, DONATH L. Low intensity rowing with blood flow restriction over 5 weeks increases  $VO_{2max}$  in elite rowers: a randomized controlled trial [J]. *J Sci Med Sport*, 2020, 23(3): 304-8.
- [14] HELD S, RAPPELT L, DEUTSCH J P, et al. Low-intensity swimming with blood flow restriction over 5 weeks increases  $VO_{2}$  peak: a randomized controlled trial using Bayesian informative prior distribution [J]. *Eur J Sport Sci*, 2023, 23(8): 1622-8.
- [15] CHEUNG C P, THOMPSON K M A, ROBERTSON A A, et al. Cardiac responses and adaptations to blood flow restriction exercise [J]. *J Appl Physiol*, 2026, 140(4): 1006-18.
- [16] CHEN Y T, HSIEH Y Y, HO J Y, et al. Running training combined with blood flow restriction increases cardiopulmonary function and muscle strength in endurance athletes [J]. *J Strength Cond Res*, 2022, 36(5): 1228-37.
- [17] CHEN L S, BROSELIN P, MCLAURIN N, et al. Physiological and perceptual responses to blood flow restriction resistance exercise with different cuff types [J]. *Transl J Am Coll Sport Med*, 2025, 10(2): e000292-7.
- [18] 吴明云. 加压有氧训练对空手道组手运动员有氧能力的影响[D]. 上海: 上海体育学院, 2021.
- [19] 李春晨. 不同压力的加压结合有氧训练对田径专项学生运动中气体代谢的影响[D]. 天津: 天津体育学院, 2022.
- [20] PINHEIRO F A, PIRES F O, RØNNESTAD B R, et al. The effect of low-intensity aerobic training combined with blood flow restriction on maximal strength, muscle mass, and cycling performance in a cyclist with knee displacement [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2022, 19(5): 2993-9.
- [21] 刘嘉俊, 汤珊, 郑航, 等. 血流限制视角下加压结合低强度有氧运动对急性生理负荷与主观疲劳度的影响研究[J]. 武汉体育学院学报(LIU J J, TANG S, ZHENG H, et al. Effects of blood flow restriction combined with low-intensity aerobic exercise on acute physiological load and rating of perceived exertion [J]. *Journal of Wuhan Sports University*), 2023, 57(11): 67-74.
- [22] OZAKI H, LOENNEKE J P, THIEBAUD R S, et al. Resistance training induced increase in  $VO_{2max}$  in young and older subjects [J]. *Eur Rev Aging Phys Act*, 2013, 10: 107-16.
- [23] ASLAM S, HABYARIMANA J D, BIN S Y. Neuromuscular adaptations to resistance training in elite versus recreational athletes [J]. *Front Physiol*, 2025, 16: 1598149-65.
- [24] 张娜. 加压抗阻训练对男子公路自行车运动员下肢力量与有氧能力的影响[J]. 辽宁体育科技(ZHANG N. The influence of compression resistance training on the lower limb strength and aerobic capacity of male road cyclists [J]. *Liaoning Sport Science and Technology*), 2025, 47(4): 134-40.
- [25] 王明波, 李志远, 魏文哲, 等. 高水平男子手球运动员下肢加压力量训练效果实证研究[J]. 中国体育科技(WANG M B, LI Z Y, WEI W Z, et al. Empirical study of KAATSU training effect on lower limb of male elite handball players [J]. *China Sport Science and Technology*), 2019, 55(5): 30-6.
- [26] FERGUSON R A, MITCHELL E A, TAYLOR C W, et al. Blood-flow-restricted exercise: strategies for enhancing muscle adaptation and performance in the endurance-trained athlete [J]. *Exp Physiol*, 2021, 106(4): 837-60.
- [27] MØLMEN K S, RØNNESTAD B R. A narrative review exploring advances in interval training for endurance athletes [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2024, 49(7): 1008-13.
- [28] ELGAMMAL M, HASSAN I, ELTANAHI N, et al. The effects of repeated sprint training with blood flow restriction on strength, anaerobic and aerobic performance in basketball [J]. *Int J Hum*

- Mov Sports Sci, 2020, 8(6): 462-8.
- [29] 周志博, 肖红, 于亮. 小场地比赛结合下肢加压训练对足球运动员反复冲刺能力的影响[J]. 首都体育学院学报(ZHOU Z B, XIAO H, YU L. Effect of small sided games with KAATSU training on repeated sprint ability of soccer players [J]. Journal of Capital University of Physical Education and Sports), 2021, 33(6): 630-7.
- [30] TANGCHAISURIYA P, CHUENSIRI N, TANAKA H, et al. Physiological adaptations to high-intensity interval training combined with blood flow restriction in masters road cyclists [J]. Med Sci Sports Exerc, 2022, 54(5): 830-40.
- [31] TÖRPEL A, BRENNICKE M, KUCK M, et al. Effect of blood flow restriction training in combination with a high-intensity interval training on physical performance [J]. Int J Sport Exerc Med, 2018, doi: 10.23937/2469-5718/1510111.
- [32] MITCHELL E A, MARTIN N R W, TURNER M C, et al. The combined effect of sprint interval training and postexercise blood flow restriction on critical power, capillary growth, and mitochondrial proteins in trained cyclists [J]. J Appl Physiol, 2019, 126(1): 51-9.
- [33] CHUA M T, SIM A, BURNS S F. Acute physiological and perceptual responses to three blood flow restricted interval exercise protocols: a randomised controlled trial [J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2025, 50: 1-13.
- [34] AMANI A R, SADEGHI H, AFSHARNEZHAD T. Interval training with blood flow restriction on aerobic performance among young soccer players at transition phase [J]. Monten J Sports Sci Med, 2018, 7(2): 5-10.
- [35] CHEN L X, ZHANG Z M, QU W H, et al. Effects of blood flow restriction moderate intensity interval training on aerobic and anaerobic capabilities and lower extremity performance in male college basketball players [J]. BMC Sports Sci Med Rehabil, 2025, 17(1): 44-55.
- [36] 魏佳, 李博, 冯连世, 等. 血流限制训练的方法学因素及潜在安全性问题[J]. 中国体育科技(WEI J, LI B, FENG L S, et al. Methodological factors and potential safety problems of blood flow restriction training [J]. China Sport Science and Technology), 2019, 55(3): 3-12.
- [37] 唐一丹, 屈成刚. 赛前加压训练结合冲刺间歇训练对公路自行车运动员运动能力的影响[J]. 体育科研(TANG Y D, QU C G. Effect of pre-competition KAATSU training combined with sprint interval training on the performance of road cyclists [J]. Sport Science Research), 2020, 41(4): 82-92.
- [38] 杨梅, 朱欢, 肖杰文, 等. 长期有氧运动对大学生下肢微循环功能及最大摄氧量的影响[J]. 中国学校卫生(YANG M, ZHU H, XIAO J W, et al. Influence of long-term aerobic exercise sports on microcirculation function and maximum oxygen uptake on the lower limbs of college students [J]. Chinese Journal of School Health), 2021, 42(7): 1000-4.
- [39] 文凡, 朱欢, 胡庆华, 等. 8周有氧运动及有氧联合全身振动训练改善肥胖大学生的微循环功能[J]. 中国组织工程研究(WEN F, ZHU H, HU Q H, et al. Eight-week aerobic exercise and aerobic exercise combined with full-body vibration training improve the microcirculation function of obese college students [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research), 2026, 30(34): 8994-9001.
- [40] 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(PENG Y, HU J P, ZHU H. Effects of low-load blood flow restriction exercise and high-intensity resistance exercise on the thigh microcirculation function of athletic young men [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research), 2025, 29(2): 393-401.
- [41] 耿宇. 血流限制训练对中国冬奥高山滑雪国家队站姿运动员力量素质的影响研究[D]. 上海: 上海体育学院, 2022.
- [42] 刘申, 姬卫秀, 唐佳福, 等. 加压训练对心血管系统的作用研究进展[J]. 中国运动医学杂志(LIU S, JI W X, TANG J F, et al. Research progress on effects of blood flow restriction training on cardiovascular system [J]. Chinese Journal of Sports Medicine, 2023, 42(5): 401-6.
- [43] BJØRNSSEN T, WERNBOM M, KIRKETEIG A, et al. Type 1 muscle fiber hypertrophy after blood flow-restricted training in powerlifters [J]. Med Sci Sports Exerc, 2019, 51(2): 288-98.
- [44] 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.
- [45] 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 Sports, 2021, 36(2): e51-8.
- [46] TAYLOR C W, INGHAM S A, FERGUSON R A. Acute and chronic effect of sprint interval training combined with postexercise blood-flow restriction in trained individuals [J]. Exp Physiol, 2016, 101(1): 143-54.
- [47] 张孜怡, 沈俊男, 庞卫军. 线粒体稳态在骨骼肌纤维类型转换中的作用及调控机制[J]. 中国生物化学与分子生物学报(ZHANG Z Y, SHEN J N, PANG W J. The role and regulatory mechanism of mitochondrial homeostasis in fiber type transformation of skeletal muscle [J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology), 2025, 41(2): 190-200.
- [48] MOLMEN K S, ALMQUIST N W, SKATTEBO Ø. Effects of exercise training on mitochondrial and capillary growth in human skeletal muscle: a systematic review and meta-regression [J]. Sports Med, 2025, 55(1): 115-44.
- [49] GROENNEBAEK T, JESPERSEN N R, JAKOBSSGAARD J E, et al. Skeletal muscle mitochondrial protein synthesis and respiration increase with low-load blood flow restricted as well as high-load resistance training [J]. Front Physiol, 2018, 9: 1796-809.
- [50] LI S Q, LI S M, WANG L F, 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: 814965-76.
- [51] PREOBRAZENSKI N, ISLAM H, DROUIN P J, et al. A novel gravity-induced blood flow restriction model augments ACC phosphorylation and PGC-1 $\alpha$  mRNA in human skeletal muscle following aerobic exercise: a randomized crossover study [J]. Appl Physiol Nutr Metab, 2020, 45(6): 641-9.
- [52] LAVIGNE C, MONS V, LEMINEUR C, et al. Physiological mechanisms underlying enhanced performance with blood flow restriction training: neuromuscular, vascular and metabolic adaptations [J]. J Physiol, 2025, doi: 10.1113/JP289806.
- [53] 魏文哲, 孙科, 赵之光, 等. 不同程度的血流限制对递增速度

- 跑运动中心肺功能的影响[J]. 中国体育科技(WEI W Z, SUN K, ZHAO Z G, et al. Effects of different pressure of blood flow-restriction on cardiopulmonary endurance during incremental intensity running [J]. China Sport Science and Technology), 2019, 55(5): 8-13,29.
- [54] TEIXEIRA E L, BARROSO R, SILVA-BATISTA C, et al. Blood flow restriction increases metabolic stress but decreases muscle activation during high-load resistance exercise [J]. Muscle Nerve, 2018, 57(1): 107-11.
- [55] PIGNANELLI C, CHRISTIANSEN D, BURR J F. Blood flow restriction training and the high-performance athlete: science to application [J]. J Appl Physiol, 2021, 130(4): 1163-70.