

缺血预处理提升运动表现——方法、应用及机制

王周^{1,2}, 吴迎^{1,2}<https://doi.org/10.12307/2023.595>

投稿日期: 2022-10-11

采用日期: 2022-11-12

修回日期: 2022-12-12

在线日期: 2023-01-19

中图分类号:

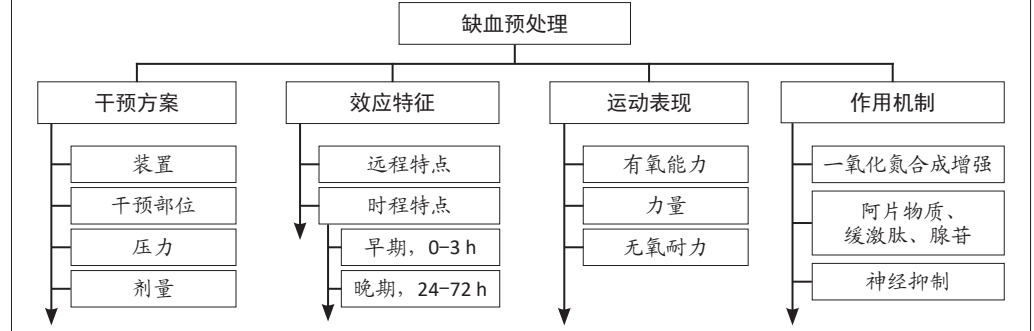
R459.9; R363; R364

文章编号:

2095-4344(2023)30-04869-07

文献标识码: A

文章快速阅读: 缺血预处理的干预方案、效应特征、运动表现及作用机制



文题释义:

缺血预处理: 是指对指定的组织器官进行短暂血流阻断后, 再重新灌注血流以激发器官组织产生的自发性保护作用, 以增强对长时间缺血的抵抗力, 从而减轻缺血-再灌注损伤的方法。

运动表现: 是指人体在运动过程中所具备的基本素质的综合体现, 一般通过运动结果和过程效率两个维度进行评价。

摘要

背景: 缺血预处理的保护效应在医学领域已经得到广泛证实和应用, 但在运动领域的使用方法、干预部位、施加压力和时长尚无统一理论, 对于不同运动类型的运动表现的作用效果在相关研究间也存在一定的差异。

目的: 阐述国内外关于缺血预处理提升运动表现的研究现状, 为缺血预处理在运动领域的应用提供最佳方法和理论支持。

方法: 在中国知网、万方数据、维普、Web of Science、EBSCO、PubMed和Cochrane数据库进行文献检索, 以“缺血预处理、预适应、预处理、血流限制”和“运动、运动表现”为中文检索词, 以“Remote conditioning, Remote ischemic conditioning, transient limb ischemia, muscle ischemia, ischemic preconditioning”“exercise performance, sport, exercise, athletes”为英文检索词, 最终纳入69篇文献进行综述分析。

结果与结论: ①缺血预处理的干预方式分为远程缺血预处理和局部缺血预处理, 常见施加部位为上臂或大腿中下1/3交界处, 双侧同时或交替进行皆可, 压力为220 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa), 干预时长常采用4×5 min。②缺血预处理在运动科学领域的研究集中于自行车、游泳、跑步和抗阻训练等, 该方法对提升有氧耐力、无氧耐力和力量耐力的运动表现效果显著, 但其对爆发力的影响仍存在争议。③缺血预处理的主要作用是在应激条件下激发人体内源性保护机制, 促进阿片、缓激肽及腺苷等物质的释放, 增强线粒体生物合成, 抑制疲劳信号转导, 进而提升运动表现。④目前缺血预处理提升运动表现的机制研究还不够深入, 建议今后进一步探讨其发挥积极效应可能机制的同时, 也应关注其是否有负面效应, 以期为该方法科学合理地应用提供依据。

关键词: 缺血预处理; 远程缺血预处理; 血流限制; 缺血再灌注; 运动表现; 有氧耐力; 无氧耐力; 力量耐力; 爆发力; 抗阻训练

Ischemic preconditioning improves exercise performance: methods, applications and mechanisms

Wang Zhou^{1,2}, Wu Ying^{1,2}

¹Beijing Sport University, Beijing 100084, China; ²Laboratory of Sports Stress and Adaptation of General Administration of Sport, Beijing 100084, China
Wang Zhou, Master, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; Laboratory of Sports Stress and Adaptation of General Administration of Sport, Beijing 100084, China

Corresponding author: Wu Ying, Associate professor, Master's supervisor, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; Laboratory of Sports Stress and Adaptation of General Administration of Sport, Beijing 100084, China

Abstract

BACKGROUND: The protective effect of ischemic preconditioning has been widely confirmed and applied in the medical field. However, there is no unified conclusion on the application method, intervention site, applied pressure, duration and repetition period in the field of sports. There are also some differences in the effect of different types of exercise performance among related studies.

OBJECTIVE: To describe the research progress of ischemic preconditioning in improving exercise performance, and to provide the best method and theoretical support for the application of ischemic preconditioning in the field of sports.

METHODS: Literature retrieval was carried out in CNKI, WanFang Data, VIP, Web of Science, EBSCO, PubMed and Cochrane databases. The keywords included “ischemic preconditioning, preconditioning, preconditioning, blood flow restriction” and “exercise, exercise performance” in Chinese as well as “remote conditioning, remote ischemic conditioning, preconditioning, transient limb ischemia, muscle ischemia, ischemic preconditioning” and “exercise performance, sport, exercise, athletes” in English. Finally, 69 articles were included for review.

¹北京体育大学, 北京市 100084; ²国家体育总局运动应激适应重点实验室, 北京市 100084

第一作者: 王周, 男, 1997年生, 硕士, 主要从事高水平运动员训练监控与机能评定。

通讯作者: 吴迎, 副教授, 硕士生导师, 北京体育大学, 北京市 100084; 国家体育总局运动应激适应重点实验室, 北京市 100084

<https://orcid.org/0000-0002-4801-6437> (王周); <https://orcid.org/0000-0002-3770-0970> (吴迎)

基金资助: 国家体育总局奥运科技攻关项目(2021592, 2019634), 项目负责人: 吴迎

引用本文: 王周, 吴迎. 缺血预处理提升运动表现——方法、应用及机制[J]. 中国组织工程研究, 2023, 27(30):4869-4875.



RESULTS AND CONCLUSION: (1) The intervention methods of ischemic preconditioning are divided into remote ischemic preconditioning and local ischemic preconditioning. The common application site is the upper arm or the junction of the middle and lower third of the thigh. Interventions can be performed on both sides simultaneously or alternately. The pressure is 220 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa), and the duration of intervention is usually set to be 4x5 minutes. (2) Research on ischemic preconditioning in the field of sports science focuses on cycling, swimming, running and resistance training. Ischemic preconditioning significantly improves the performance of aerobic endurance, anaerobic endurance and strength endurance, but its effect on explosive power is still controversial. (3) The main function of ischemic preconditioning is to stimulate the endogenous protective mechanism of human body under stress conditions, promote the release of opioid, bradykinin, and adenosine, enhance mitochondrial biosynthesis, and inhibit fatigue signal transduction, thereby improving athletic performance. (4) At present, the mechanism by which ischemic preconditioning enhances exercise performance has not been thoroughly studied. It is suggested to further explore the possible mechanism of its positive effects and pay attention to whether it has negative effects, so as to provide a basis for the scientific and reasonable application of ischemic preconditioning in the future.

Key words: ischemic preconditioning; remote ischemic preconditioning; blood flow restriction; ischemia/reperfusion; exercise performance; aerobic endurance; anaerobic endurance; strength and endurance; explosive power; resistance training

Funding: Olympic Science and Technology Project of the State General Administration of Sport, Nos. 2021592 and 2019634 (to WY)

How to cite this article: WANG Z, WU Y. Ischemic preconditioning improves exercise performance: methods, applications and mechanisms. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu.* 2023;27(30):4869-4875.

0 引言 Introduction

缺血预处理是指对指定的组织器官进行短暂血流阻断后，再重新灌注血流以激活器官组织产生的自发性保护作用，以增强对长时间缺血的抵抗力，从而减轻缺血-再灌注损伤的方法，最早由 MURRY 等^[1]提出。据报道，在阻断狗的自体心脏冠状动脉之前的 40 min 进行了间歇短暂缺血再灌注，心肌梗死面积减少了 75%。随后，研究人员进行了大量动物实验，证实了缺血预处理在保护心肌、肾脏、肝脏和骨骼肌等器官免受长时间缺血再灌注引起的组织损伤中的重要作用。在 2010 年，GROOT 等^[2]第一次在人体运动模型中进行缺血预处理试验，对 15 名健康成年男性大腿双侧进行缺血预处理干预后，最大摄氧量 (maximal oxygen consumption, VO_{2max}) 提高了 3%，最大功率提高了 1.6%。目前，缺血预处理在运动领域的相关研究包括自行车、跑步、游泳、抗阻训练和潜水等多个运动项目，研究对象涉及了专业运动员、有训练经历的健康人群和无训练经历的健康人群，大量研究已证实缺血预处理可以有效提高有氧能力、肌肉耐力及无氧耐力。

同样作为以血流限制为基础的一种干预方式，缺血预处理与加压训练有所不同。加压训练是通过血流限制和低强度训练同时干预的方法，达到高强度训练带来的肌肉质量和力量的提升。缺血预处理则是在运动前对安静状态下的运动员或运动人群进行干预，利用缺血预处理产生效果的时程特点和人体的预先适应，促进其在不同时段运动中提升运动能力。

作为一种新的非侵入性干预措施，缺血预处理使人体预先处于大负荷运动的环境中，较为真实地还原大负荷运动时引起的人体缺血和缺氧状态，使机体达到提前适应的效果。近年来，缺血预处理越来越受到运动训练领域的关注，较高的实用价值和简单易行的操作方法为其提供了广阔的前景。国外诸多研究已经对缺血预处理在运动训练中的干预部位、压力大小、时长、时程效应、远程效应、急性和重复使用的效果以及对运动表现的影响进行了报道。现阶段，中国有关缺血预处理在运动科学领域的研究较少，且未见相关综述报道，因此，对该领域的系统梳理十分必要。文章对缺血预处理在提升运动表现方面的干预方法和作用效果进行综述，系统整理了运动前缺血预处理的干预部位、适宜压力、干预时长、与开始运动的间隔时间、效应特征、应用效果和内源性机制等问题，旨在为深入研究缺血预处理提升运动表现提供依据，为缺血预处理在运动训练中的应用提供新思路。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 第一作者在 2022 年 9 月进行检索。

1.1.2 检索文献时限 2010 年 1 月至 2022 年 9 月。

1.1.3 检索数据库 中国知网、万方数据、维普、Web of Science、EBSCO、PubMed 和 Cochrane 数据库。

1.1.4 检索词 中文检索词为“缺血预处理、预适应、预处理、血流限制”“运动、运动表现”，英文检索词为“Remote conditioning, transient limb ischemia, muscle ischemia, ischemic preconditioning”“exercise performance, sport, exercise, athletes”。

1.1.5 检索文献类型 研究原著、综述和荟萃分析。

1.1.6 检索策略 以中国知网和 PubMed 数据库检索策略为例，见图 1。

中国知网数据库	PubMed 数据库
#1 “缺血预处理” OR “预处理” OR “预适应” OR “血流限制”	#1 ischemic preconditioning [Title/Abstract] OR Remote conditioning [Title/Abstract] OR transient limb ischemia [Title/Abstract]
#2 “运动” OR “运动表现”	#2 exercise [Title/Abstract] OR sport [Title/Abstract] OR exercise performance [Title/Abstract]
#3 #1 in 篇名	#3 #1 AND #2
#4 #2 in 篇名	
#5 #3 AND #4	
#6 #1 in 关键词	
#7 #2 in 关键词	
#8 #6 AND #7	

图 1 | 中英文数据库检索策略图

1.2 入组标准

1.2.1 纳入标准 ①中文或英文文献；②缺血预处理对运动表现有影响的相关文献；③缺血预处理干预的方法学相关文献。

1.2.2 排除标准 ①文章内容重复或相似的文献；②实验设计不严谨或统计方法不合理的文献；③缺血预处理应用于医学、康复领域和促进运动后恢复的文献；④全文内容不全的文献。

1.3 文献质量评价及数据提取 文献检索工作由第一作者完成，共检索到文献 362 篇，包括中文 169 篇、英文 193 篇。经过阅读标题摘要进行初筛后，排除与研究目的相关性低和文章内容不全的文献，剩余 113 篇，然后进行仔细阅读筛选，最终纳入 69 篇文献，见图 2。

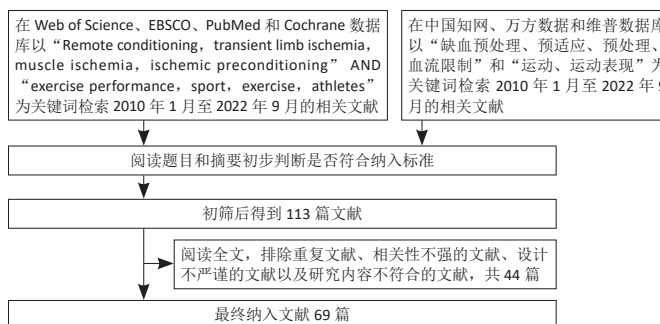


图 2 | 文献筛选流程图

2 结果 Results

2.1 缺血预处理的干预方法及效应特征

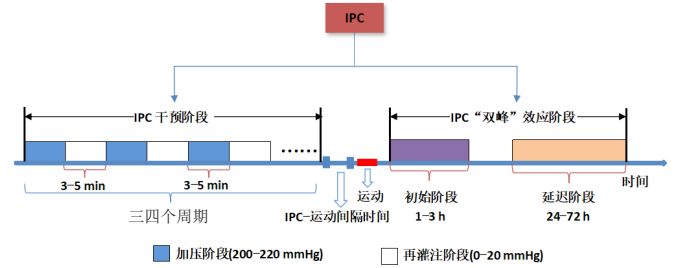
2.1.1 缺血预处理的装置与干预部位 缺血预处理的装置由充气设备和加压载体两部分组成。充气设备包括自动和手动两种类型，压力数值均可量化，加压载体为无弹性尼龙材质充气袖带^[3-4]。缺血预处理主要是通过通过对四肢体近侧端（上臂或大腿）施加压力，从而完全闭塞动脉血流和部分闭塞静脉血流，整个过程中干预对象处于仰卧位。在相关研究中，上下肢使用的袖带宽度存在差异。下肢缺血预处理使用的袖带较窄，宽度为8.0-9.0 cm^[5-6]，下肢使用的袖带较宽，为11.5-21.5 cm^[7-8]，袖带长度为42-96 cm^[9-10]。加压袖带的尺寸在一定程度上决定了受干预的肌肉面积，这可能对干预效果产生一定影响，但并未见不同袖带尺寸对缺血预处理作用效果影响的研究，但是当受缺血预处理干预的肢体面积不相同，袖带对肢体的闭塞效果也可能不同，一定范围内，作用效果可能会随着面积的增大而增加，但还需要具体的实证研究来证实袖带尺寸的大小对缺血预处理效果的影响。

2.1.2 缺血预处理的压力 压力大小是影响缺血预处理效果的重要因素。缺血预处理作用于不同人群和部位的压不存在明显差异，其范围集中在200-240 mmHg (1 mmHg=0.133 kPa)，略高于加压训练使用的压力。相关研究指出，至少180 mmHg的压力才可以有效闭塞健康成年男性上下肢动脉血流，引起血氧饱和度(SaO₂)、氧分压(PO₂)、二氧化碳分压(PCO₂)和血液pH值的明显改变^[11]。但是，由于袖带尺寸的不同、人体自身结构和肌肉形态的差异，相同的绝对压力施加到人体后，也可能产生不同效果，即使在250 mmHg的高压下，某些参与者的动脉血流也不能被完全阻断^[12]。因此，面对不同个体应采用个性化方案有针对性进行干预。未来针对缺血预处理的研究或应用也可使用多普勒超声设备或近红外光谱分析动脉血流是否被完全阻断，以此确定不同个体的适宜压力，以获得最佳干预效果。

2.1.3 缺血预处理的“剂量” 缺血预处理的“剂量”包括干预的时长和重复次数，这对其作用效果至关重要。不同研究中缺血预处理干预的时长有所不同，大部分研究的干预时长在40 min(4个缺血预处理周期)。该综述分析的研究使用最多的是4个缺血再灌注周期。过多的干预周期并不会对作用效果产生更加显著的影响。研究表明，8×5 min，220 mmHg的干预并没有比4×5 min，220 mmHg的方案对运动表现产生更有益的效果，同等负荷下自行车运动员总的运动时间也并没有延长^[13]。因此，过多的干预周期和过长的时间并不会增加缺血预处理的作用效果，反而可能诱导肌肉组织和细胞因长时间缺血发生损伤。现行的缺血预处理方案并未见有对人体产生不适的影响，现有研究中使用最多的是4×5 min，220 mmHg的干预方案。

文章总结了目前各研究中缺血预处理相关研究特征及干预方案^[14-52]，见表1。

2.1.4 缺血预处理的时程效应和远程效应 缺血预处理的作用效果具有时程效应，主要分为两个阶段，见图3，且呈现出“双峰”特点。第一阶段在缺血预处理后数分钟内开始发挥作用，可持续1-3 h，称为早期阶段，与一氧化氮的合成和阿片类物质的释放有关。第二阶段在缺血预处理后24 h作用效果开始显现，可持续至72 h，称为晚期阶段，主要依赖于缓激肽和腺苷^[53]。LISBOA等^[54]研究证明了缺血预处理对游泳运动员50 m自由泳运动成绩的影响具有时程特点，从缺血预处理后2 h开始，其效应可持续至8 h。健康成年男性在低氧状态下应用急性缺血预处理对连续2次5 km跑(间隔1 h)完成时间的影响，尽管缺血预处理没有减少第二次5 km跑的完成时间，但两次5 km跑的成



图注：该图展示了缺血预处理作用效果的“双峰”效应。缺血预处理的作用效果可分为两个阶段，第一阶段在干预后数分钟开始，称为初始阶段；第二阶段在干预后约24 h开始，称为延迟阶段。1 mmHg=0.133 kPa
图3 | 缺血预处理干预的“双峰”效应图

绩未表现出显著差异，表明缺血预处理维持了运动表现，同样证实了缺血预处理产生了积极的延迟效应^[55]。因此，将缺血预处理运用于运动训练时，作用效果的时程效应被重点考虑，教练员、运动员应根据实际情况，合理安排好缺血预处理和训练之间的间隔时间，使训练、比赛的时间与缺血预处理的效应期吻合，从而有效地发挥缺血预处理的作用。

在现有研究中，大部分研究者都选择了直接将袖带放置在受试者的运动肢体上，采用局部缺血预处理干预的方式研究作用效果，但部分研究者也采用了远程缺血预处理的方式对非运动肢体干预后的效果进行了检验。BARBOSA等^[3]对13名健康成年男性进行下肢缺血预处理干预后，发现缺血预处理延缓了45%1RM上肢握力运动过程中疲劳的发展速度，运动表现提高了11.2%。与此相同，COCKING等^[13]发现，12名自行车运动员进行上肢缺血预处理后，完成恒定负荷功率自行车运动的时间显著提升，和直接进行下肢干预相比没有显著差异，这表明缺血预处理在提升运动表现上的作用效果具有远程效应，不受干预部位的影响。

通讯作者的观点评述：

此部分对缺血预处理的装置类型、干预部位、施加压力、干预“剂量”和效应特征做了详细的阐述，同时以表格的形式整理汇总了缺血预处理相关研究的运动类型、研究人群、干预方案和作用效果，总结了缺血预处理的最佳干预方法，为缺血预处理在运动领域的应用提供有价值的参考。

2.2 缺血预处理对运动表现的影响

2.2.1 缺血预处理对有氧能力的影响 有氧能力对长时间(运动时长>100 s)运动项目的运动表现至关重要，缺血预处理与有氧运动成绩密切相关，可有效提高有氧能力。缺血预处理对有氧能力的积极作用在自行车、长跑等项目中被普遍报道。研究表明，急性缺血预处理后，自行车和长跑运动员最大摄氧量增加0.3%-3.6%，力竭运动的总时间延长1.1%-2.6%^[2]，主观疲劳感觉显著降低。急性缺血预处理后，人体对随后运动缺血的耐受能力提高，糖原消耗减少，线粒体生物合成功能增强^[10]，这是急性缺血预处理后有氧能力提升的主要原因。重复使用缺血预处理可以显著增加骨骼肌氧合能力和毛细血管氧合血流量^[4, 56]，对有氧能力的提升效果优于急性使用。JEFFRIES等^[56]报告称，20名健康成年人连续7 d双侧下肢缺血预处理后，静息状态骨骼肌新陈代谢下降，骨骼肌氧化功能提高了13%，毛细血管氧合血流量增多，且干预后72 h的运动表现提升9%。LINDSAY等^[4]也证明了重复使用缺血预处理对有氧能力的积极影响，对健康成年人进行7 d下肢缺血预处理后，48 h和7 d后的最大摄氧量相对于基线水平分别提高9.5%和12.8%。

以上研究表明，缺血预处理不仅可以有效提升有氧运动能力，而且其在提升有氧耐力表现时具有时程效应和一定的“剂量”依赖性。单次缺血预处理更多地是通过对人体一次性干预

表 1 | 缺血预处理相关研究特征及干预方案

运动类型	第一作者 / 发表年份	研究对象	周期 × 时长 (min)	压力 (mmHg)	预处理部位	与运动开始的间隔时间 (min)	研究的主要结果	
自行车	GROOT ^[2] , 2010	健康成年男性	3×5	220	双侧大腿	5	最大摄氧量 (3%)↑	
	CRISAFULLI ^[14] , 2011	健康成年男性	3×5	50 > 收缩压	单侧大腿	5	最大功率 (3.7%)↑	
	PAIXAO ^[15] , 2014	业余自行车运动员	4×5	250	双侧大腿	12	-	
	LALONDE ^[16] , 2015	健康成年男性和女性	4×5	50 > 收缩压	右侧上臂	10	力竭时间 (1%)↑	
	GIBSON ^[17] , 2015	运动队队员	4×5	220	双侧大腿	11	峰值功率 (2.1%)↓ 平均功率 (2.5%)↓	
	PATTERSON ^[18] , 2015	健康成年男性	4×5	220	双侧大腿	45	峰值功率 (2.5%)↑	
	KRAUS ^[19] , 2015	健康成年男性和女性	4×5	-	双侧上臂	15	峰值功率 (3.2%)↑ 平均功率 (2.7%)↑	
	HITTINGER ^[20] , 2015	自行车和铁人三项运动员	4×5	10-20 > 收缩压	双侧大腿	10	最大功率 (4.7%)↑	
	BIRKELUND ^[21] , 2015	健康成年男性	4×5	200	单侧上臂	3d	-	
	CRUZ ^[22] , 2015	休闲自行车运动员	4×5	220	双侧大腿	33	最大摄氧量 (2%)↑	
	CARU ^[23] , 2016	男性和女性业余运动员	4×5	50 > 收缩压	右侧上臂	5	-	
	GRIFFIN ^[24] , 2018	业余男子运动员	4×5	220	双侧大腿	即刻	临界功率 (3%)↑ 总耗氧量 (1.1%)↑	
	PARADIS-DESCHENS ^[25] , 2018	男子自行车运动员	3×5	220	双侧大腿	25.6±0.7	运动完成时间 (1.1%)↓	
	TANAKA ^[26] , 2021	健康成年男性	3×5	> 300	双侧大腿	5	-	
游泳	JEAN-ST-MICHEL ^[27] , 2011	游泳运动员	4×5	15 > 收缩压	双侧上臂	45	运动完成时间 (1.1%)↓	
	MRAOCOLO ^[28] , 2015	游泳运动员	4×5	220	双侧上臂交替	5	运动完成时间 (1.6%)↓	
	FERREIRA ^[29] , 2016	大学生游泳运动员	3×5	220	双侧大腿	30	运动完成时间 (1.2%)↓	
	FOSTER ^[30] , 2011	健康成年男性和女性	5 d, 4×5	220	双侧大腿	第五次后即刻	力竭时间 (7%)↑	
跑步	BAILEY ^[31] , 2012	受过训练的成年男性	4×5	220	双侧大腿	20	最大速度 (1%)↑	
	BAILEY ^[32] , 2012	受过训练的成年男性	4×5	200	双侧大腿	90	力竭时间 (2.5%)↑	
	TOCCO ^[33] , 2014	长跑运动员	3×5	50 > 收缩压	双侧大腿	5	力竭时间 (0.4%)↓	
	JAMES ^[34] , 2016	业余男子跑步运动员	4×5	220	双侧大腿交替	10	运动时长 (9.2%)↑ 最大摄氧量 (2.3%)↑	
	SABION-CARVALHO ^[35] , 2017	健康成年男性和女性	4×5	220	双侧大腿交替	10	主观疲劳等级 (4.3%)↓	
	SEEGER ^[36] , 2017	健康成年男性和女性	4×5	220	双侧大腿	60	运动完成时间 (1.3%)↑	
	SLYSZ ^[7] , 2020	有氧锻炼的成年男性和女性	3×5	50 > 收缩压	双侧大腿	15	运动完成时间 (3.5%)↓	
	GRIFFIN ^[37] , 2018	运动队队员	4×5	220	双侧大腿、手臂	15	-	
	CHEN ^[38] , 2022	400 米运动员	4×5	220	双侧大腿、手臂交替	30	力竭时间 ↑ 最大累积氧亏 ↑	
	抗阻	FOSTER ^[39] , 2014	健康成年男性	3×5	200	右侧大腿	240/480	-
		BARBOSA ^[3] , 2015	健康成年男性	3×5	220	双侧大腿	25	力竭时间 (10.6%)↑
		MAROCOLO ^[40] , 2016a	健康成年男性	4×5	220	单侧大腿、上臂交替	4	最大重复次数 ↑
		MAROCOLO ^[41] , 2016b	健康成年男性	4×5	220	双侧大腿交替	8	重复次数 (53%)↓ 疲劳指数 (20.2%)↓
		TANAKA ^[42] , 2016	健康成年男性	3×5	> 300	单侧大腿	5	力竭时间 (17.7%)↑
PARADIS-DESCHENS ^[43] , 2016		有力量训练的健康成年男性	3×5	200	右侧大腿	18±2	峰值力矩 (8.5%)↑ 总力矩 (12.9%)↑ 平均力矩 (13.3%)↑	
INCOGNITO ^[44] , 2017		健康成年男性	3×5	200	左侧上臂	3	-	
COCKING ^[45] , 2018		健康成年男性	4×5	220	双侧上臂、大腿	20	-	
其他	LEONAFDO ^[46] , 2019	有力量训练经历的成年人	4×5	250	双侧大腿交替	30	最大重复次数 (20%)↑	
	BEHRENS ^[47] , 2020	健康成年男性	3×5	210±20	单侧大腿	20	-	
	PETHICK ^[48] , 2021	健康成年男性和女性	3×5	225	双侧大腿	20	力竭时间 (43%)↑ 最大自主收缩	
	GIBSON ^[49] , 2013	皮划艇和潜水运动员	4×5	40 > 收缩压	单侧上臂	30	力竭时间 (4%)↑	
	GARCIA ^[50] , 2017	橄榄球运动员	3×5	220	双侧大腿交替	1	-	
	RICHARD ^[51] , 2018	速滑运动员	3×5	20 > 收缩压	双侧上臂交替	90	-	
	TUMES ^[52] , 2018	男子皮划艇运动员	3×5, 3×10	220	双侧大腿交替	30	-	

表注：“↑”表示升高；“↓”表示降低；“-”表示无变化；“a, b”代表同一作者在同一年发表的两篇文章；1 mmHg=0.133 kPa

后的应激性发挥作用，而重复缺血预处理更多地是通过对人体较长时间干预后，引起心血管系统和循环系统对长时间缺血、缺氧状态的适应，做出积极性改变，从而提升运动表现。但是，重复缺血预处理和单次缺血预处理在除有氧运动外的其他运动上会表现出怎样的效果，重复次数上的差异是否会引起作用效果和时程效应上的不同，仍需进一步证实。

2.2.2 缺血预处理对力量的影响

力量耐力：缺血预处理不仅对有氧能力产生积极效果，对运动员和健康人群的力量耐力也有明显的促进作用。缺血预处理后，健康成年人 80%1RM 卧推、深蹲和仰卧 45° 腿部蹬伸的最大重复次数显著增加，45%1RM 握力运动时间延长^[5, 57-58]，表明缺血预处理增强了相关运动肌肉的肌肉耐力，提高了力量耐力的运动表现。游泳运动中，缺血预处理同样具有积极效果。在 6 次连续 50 m(3 min 间隔)自由泳冲刺前 48 h、24 h 和 30 min 进行 3 次缺血预处理干预，缺血预处理组的成绩改善 (1.17%) 明显高于对照组 (0.2%)^[29]，这可能是缺血预处理后骨骼肌抗疲劳能力增加，保持了较高的划水和打腿频率所引起的。

除了作为一种独立的干预方式，缺血预处理和力量、速

度训练的协同使用同样对耐力提升表现出积极影响。PARADIS-DESCHENS 等^[59]报道，连续 4 周 (2 d/周) 的缺血预处理与短跑间歇训练相结合后，耐力运动员在 5 km 计时跑 (完成时间) 和 30 s 的 Wingate 测试期间的力量耐力表现有更大程度的改善。缺血预处理干预后，全身性运动过程中肌红蛋白浓度明显升高，肌肉氧合能力增强，保证了运动时氧气的供应和利用率，进而改善运动表现。CARVALHO 等^[60]研究表明，缺血预处理结合膝关节伸肌阻力训练持续 6 周 (2 d/周)，膝关节最大力量伸膝重复次数显著超过了对照组。为了验证机体不同部位与缺血预处理结合干预的作用效果，研究者对健康成年男性进行持续 2 周 (3 d/周) 的缺血预处理结合腕伸肌阻力训练，最大重复次数比对照组显著增加^[60]。上述研究结果表明，与单纯的缺血预处理干预相比，缺血预处理和运动训练的联合干预可更有效地提高力量耐力，且此种方法具有一定的普适性，在全身性运动、局部关节运动等多种模式中均有良好效果。

与目前传统的力量训练相比，缺血预处理是一种提高力量耐力的非运动性干预手段，如果将缺血预处理与运动干预手段相结合，是否会对力量耐力的提升产生“1+1>2”的效果值得深入探讨。

爆发力：缺血预处理对爆发力的影响效果仍存在争议，仅有两项研究证明了缺血预处理对爆发力的积极效果，大部分研究表明缺血预处理对爆发力没有影响。在进行连续7 d缺血预处理后，自行车运动员下肢Wingate峰值功率增加11%，平均功率增加了4.3%^[4]。单次使用缺血预处理干预后，健康成年人在最大强度离心运动后的0-24 h，肌肉性能也得到快速恢复，纵跳高度提升4.1%。游泳运动中，运动员进行缺血预处理后，划水频率显著增加，同时50 m自由泳的成绩也得到提升^[54]。然而，LALONDE等^[16]并未发现缺血预处理后Wingate测试的峰值功率、平均功率和达到峰值功率的时间与对照组有显著差异，30 m冲刺运动的表现未得到提升。同样的结果也被PATTERSON等^[18]证明，急性缺血预处理效应的早期阶段，在重复的短跑冲刺中，肌肉氧合的虽然维持得到了改善，但并未提升运动表现，表明缺血预处理对爆发力并没有积极效应，这与之前的研究结果具有一致性。此外，GARCIA等^[50]对8名男子橄榄球运动员进行缺血预处理后，运动员T型测试、垂直纵跳及30 s持续跳远等运动表现也均有所提升。与耐力运动相比，爆发力项目一般持续时间极短，供能方式存在本质区别。通过对上述研究归纳分析发现，缺血预处理和运动起始间隔时间对以爆发力为基础的短时间(< 10 s)运动表现影响较大。有学者认为，缺血预处理对爆发力的影响存在一定的时间依赖性，呈现出正相关趋势，即一定范围内(40-50 min)，缺血预处理干预和开始运动之间的间隔越长，效果越明显，如果间隔很短，可能效果甚微或产生负面的影响^[16]，但仍需进一步证实。

不仅仅是爆发力项目，缺血预处理后ATP、磷酸肌酸和总腺苷核苷酸的含量立即降低，CO₂浓度升高，缺血预处理和运动之间的必要间隔可以用能源底物浓度恢复到正常水平所需的时间来解释。这些较低的能源底物浓度会对运动表现产生负面影响，尤其是在更依赖于代谢状态的无氧运动。此外，缺血预处理介导的信号转导到达相关组织所需的最短时间是需要关注的，这也是影响缺血预处理作用效果的关键因素。根据现有研究，建议缺血预处理和开始运动之间应留有至少20 min间隔，爆发力项目应有至少40 min间隔，以保证缺血预处理发挥最大效应。

2.2.3 缺血预处理对无氧耐力的影响 大部分研究表明，缺血预处理对提升无氧耐力有积极作用，主要表现为明显提高下肢Wingate测试的平均输出功率和运动时间的延长。在篮球运动员身上同样发现在热身前进行缺血预处理干预，可以有效提高Wingate下肢无氧功率测试的总输出功率和第三、四次Wingate下肢无氧功率测试的平均功率^[62]。除了通过不同形式的冲刺类项目来评价缺血预处理对无氧耐力的影响外，也有研究者采用最大累积氧亏(maximal accumulated oxygen deficit, MAOD)测试来评价缺血预处理对无氧耐力的影响。跑台运动前，对运动员进行缺血预处理干预后，缺血预处理组超最大强度运动(110%VO_{2max})的力竭时间显著增加，缺血预处理可能通过提高糖酵解系统代谢效率达到提升无氧耐力的目的。与该研究一致，CHEN等^[38]同样发现缺血预处理可提升400 m跑运动员的最大累积氧亏，且该研究比较了远程缺血预处理与局部缺血预处理在提升无氧耐力方面的作用效果，结果表明远程缺血预处理与局部缺血预处理均可提升最大累积氧亏，延长运动力竭时间，两者的作用效果无显著差异，这与CHENG等^[62]的研究结果一致。

通讯作者的观点评述：

该部分对缺血预处理的作用效果进行了探讨，其能有效提升有氧能力、无氧耐力和力量耐力，但对爆发力的作用效果仍具争议。此部分内容除对现有的研究结果进行归纳总结外，还结合项目特征、与运动干预手段相结合等实际问题，就缺血预处理的未来应用问题阐述自己的观点，为缺血预处理在具体项目上的应用提供较高的参考价值，也为未来缺血预处理的科学研究点明了方向。

2.3 缺血预处理的作用机制 研究表明，缺血预处理主要是通过改善肌肉氧合、增强线粒体生物合成以及调节神经信号传导提升运动表现，一定量的内源性物质的积累如一氧化氮、阿片类药物、缓激肽(bradykinin, BK)和腺苷，对启动缺血预处理相关的内在反应也是至关重要的。INCOGNITO等^[44]认为，当人体因缺血而产生的内源性物质通过血液运输到达中枢神经系统的某个器官时，会作用于它们的特定受体(如腺苷A₁R受体)，激活细胞保护通路，在提升运动表现中发挥作用。

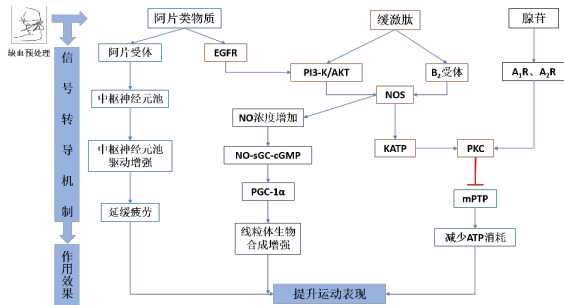
2.3.1 一氧化氮合成增强 相关研究已经证实补充一氧化氮化合物(如精氨酸和硝酸盐)可增加循环血液中一氧化氮的浓度，提高骨骼肌的氧化能力和耐力运动表现^[64]。中等强度运动前对肢体施加缺血预处理刺激，会使运动过程中功能性抗交感作用增强，即运动骨骼肌中血管收缩减弱、血流速度加快、血流量增加。机械刺激(如血管张力、切应力、内皮细胞变形及血液脉冲流动)可引起血管内一氧化氮的释放。同时，缺血预处理过程中肢体的连续缺血引起细胞内cGMP/cAMP比值下降，促使心肌细胞和内皮细胞分泌缓激肽，作用于缓激肽受体B₂，增强了一氧化碳化合物的活性，加速了一氧化氮的合成速率^[65]。一氧化氮是提高全身运动能力和骨骼肌氧化能力(即线粒体功能)的媒介，通过NO-sGC-cGMP信号转导通路调控过氧化物酶体增殖物激活受体γ辅激活因子1α(peroxisome proliferator-activated receptor-γ coactivator-1α, PGC-1α)转录，进而促进线粒体数目的增加和生物合成的增强^[66]。

2.3.2 阿片类药物、缓激肽和腺苷 蛋白激酶C是阿片类药物、缓激肽和腺苷发挥保护作用的共同靶点，蛋白激酶C被阻断后明显抑制保护效果。尽管如此，但这3种物质仍可能通过不同的信号通路发挥作用。缺血预处理刺激机体分泌的内源性物质作用于受体，引起线粒体ATP敏感性钾通道开放，产生氧基自由基，进而激活蛋白激酶C。事实上，仅有阿片类药物和缓激肽的作用机制与此相同。缺血预处理过程中连续的缺血和再灌注刺激阿片类药物、缓激肽和腺苷的分泌，阿片类药物依赖于表皮生长因子(epidermal growth factor receptor, EGFR)增强磷脂酰肌醇-3-激酶(phosphatidylinositol-3-kinase, PI3-K)和蛋白激酶B(protein kinase B, Akt)活性，促使ATP敏感性钾通道开放，进而激活蛋白激酶C^[67]。但是，缓激肽却绕过了表皮生长因子，直接刺激磷脂酰肌醇-3-激酶和蛋白激酶B发挥作用。相比于阿片类药物和缓激肽，腺苷的作用机制截然不同，它既不依赖于表皮生长因子，也不依赖于磷脂酰肌醇-3-激酶和蛋白激酶B，完全绕过了ATP敏感性钾通道，直接作用于腺苷A₁R和A₃R受体，激活它们的共同靶点蛋白激酶C，从而调节线粒体膜通透性转换孔(mitochondrial permeability transition pore, mPTP)的开放，减少ATP的消耗^[67]。

2.3.3 神经疲劳抑制 缺血预处理可通过降低Ⅲ类和Ⅳ类传入纤维的兴奋性来推迟疲劳感，从而延长受试者的运动时间^[22]。Ⅲ类和Ⅳ类传入纤维依靠肌肉至大脑的感觉信息来影响运动性疲劳。运动中肌肉的传入反馈对中枢运动驱动具有抑制性作用，并将外周疲劳的发展限制在个体的临界阈值内。缺血预处理效应的神经调节通路包括脊髓、自主神经系统和体感神经系统，是由内源性阿片类药物激活的，阻断阿片类药物介导的肌肉传入反馈，可增强中枢运动驱动，从而使中枢神经系统对运动引起的外周肌肉疲劳阈值增加。AMANN等^[68]研究发现，运动后股四头肌肌电反应增加，表明脊髓运动神经元池有更高的自主神经驱动，这可能是由于运动神经元放电率增加引起的。此外，在接受坐骨神经电刺激的猫后肢上已经观察到缺血预处理后更高的肌电反应，以及在人体耐力运动模型中主观运动感觉(rating of Perceived Exertion, RPE)增长率较低，因此CRISAFULLI等^[14]

认为缺血预处理提高了身体对疲劳信号感知的阈值，从而延长了受试者的运动时间。

事实上，这种反应发生在缺血预处理的早期阶段，与循环的内源性阿片类药物激活横纹肌组织中的阿片受体引起的肌肉传入电信号减少有关，且阿片是已知的调节耐力表现的物质。研究表明，缺血预处理后机体分泌的内源性阿片物质可以在运动期间激活位于III/IV组肌肉神经组织传入末端的阿片受体^[69]，抑制传入神经的信号传导，增强了中枢运动神经元的驱动，降低中枢疲劳的发展速度，这将延缓肌肉神经疲劳的过早发生，提高运动中骨骼肌纤维募集比例，从而维持运动能力，见图4。



图注：该图展示了缺血预处理提升运动表现的主要调节机制。缺血预处理促使阿片类药物、缓激肽和腺苷的释放，这3种物质分别作用于其特定的受体，激活相关信号转导通路，达到延缓疲劳、增强线粒体生物合成和减少ATP消耗的目的，进而提升运动表现。EGFR为表皮生长因子；PI3-K为磷脂酰肌醇-3-激酶；NO-sGC-cGMP为一氧化氮-可溶性鸟苷酸环化酶-环磷酸鸟苷细胞信号转导通路；PGC-1 α 为 γ 辅激活因子1 α ；NOS为一氧化氮合酶；KATP为ATP敏感性钾通道；PKC为蛋白激酶C；AKT为蛋白激酶B；mPTP为线粒体膜通透性转换孔

图4 | 缺血预处理提升运动表现的作用机制

通讯作者的观点评述：

此部分对缺血预处理提升运动表现的作用机制进行了归纳总结，主要包括体液调节和神经调节两个途径。体液调节与一氧化氮、阿片类药物、缓激肽和腺苷等特定的内源性物质释放有关，神经调节则与运动过程中传入神经兴奋性下调引起的疲劳感降低有关。除文字表述外，此部分还通过机制图对两种调节途径进行梳理，以便读者理解缺血预处理提升运动表现的内在机制。

3 讨论 Discussion

3.1 缺血预处理研究现状 目前，缺血预处理在运动领域的报道较多，其对有氧耐力、无氧耐力和力量耐力的提升效果明显。缺血预处理使用的最佳“剂量”是4x5 min、220 mmHg，但不同个体在应用时也需考虑个体差异及项目特点。干预部位为上臂或大腿中下1/3的部位，考虑到缺血预处理作用效果的时程效应，干预结束后和运动开始之间应根据不同项目的比赛特点留出至少20-40 min的间隔，这也是在实际应用时需要注意的。

值得注意的是，缺血预处理的研究要特别注意对试验质量的把控。首先，部分研究者未能充分考虑到准备活动对缺血预处理干预效果的影响，准备活动和缺血预处理干预如何进行安排，不同安排会产生怎样的效果并无相关研究证实。GIBSON等^[17]推测，热身活动会掩盖缺血预处理对短跑这类爆发力项目运动成绩的提升效果，因此缺血预处理和热身活动的交互效应是不不得不考虑的问题。其次，现有的研究大部分使用了10-20 mmHg或低于舒张压的低压作为对照条件，但部分研究并未设置低压对照组，忽视了“安慰剂”条件对研究结果的影响。为了防止先入为主的想法影响试验结果，研究人员应设置低压对照组。再次，不同压力下肢体的闭塞程度是影响缺血预处理效果的关键，在相关研究中，极少有研究者对不同个体施压的闭塞效果进行监控，因此无法保证施压效果的一致性，这其中主要和不同个体成分差异有关。因此，后续研究需要更多关注准备活动、心理作用（即对照组）及闭塞压力的普适性等因素对缺血预处理作用效果的影响。

3.2 综述的特点 目前，缺血预处理提升运动表现的积极作用已逐渐受到国内学者的关注，但未见相关综述研究。因此，文章从缺血预处理的装置、干预部位、施加压力、干预方案、对不同项目的作用效果和内在机制等方面进行研究，归纳总结出缺血预处理最适宜的压力和干预方案，为其合理的运用到不同项目中提供理论依据和参考。

3.3 综述的局限性 首先，缺血预处理的作用效果存在一定的性别差异。PARADIS-DESCHEMS等^[43]对不同性别健康人群双侧下肢进行缺血预处理后发现，男性的肌肉力量和氧气摄入量显著增加，但女性的氧气摄入量却相应的减少。GIBSON等^[17]的报告称，在对不同性别运动员双侧下肢进行缺血预处理后，未能提升男性运动员连续5次短跑冲刺的运动表现，但对女性运动员却表现出积极效果。缺血预处理的相关研究中，女性参与者较少，出于对不同性别人群生理特征、代谢水平和人体活动能力等诸多因素的考量，缺血预处理施加于不同性别的研究对象的作用效果不可同一而论。但现有研究针对不同性别间干预效果的直接比较极少且结果差异较大，因此文章未能对此进行综述，缺血预处理对不同性别受试者作用效果的差异仍有待深入研究。其次，运动领域缺血预处理相关的研究多停留在现场层面，对缺血预处理提升运动表现的内在机制研究不足，因此文章未能深入探讨其发挥作用的生理学机制。

3.4 综述的意义 研究表明，缺血预处理对有氧能力、无氧耐力和力量耐力表现出积极作用，对爆发力的影响仍无统一结论。教练员和运动员应当根据实际情况来安排缺血预处理干预，以期达到最佳效果。缺血预处理干预后，机体通过血液循环系统发挥作用。临床医学研究表明，缺血预处理可减轻心肌缺血再灌注损伤标志物达到保护心肌的目的，而缺血预处理在运动实践中应用时是否可通过提升心脏功能提升运动表现也值得关注，例如，缺血预处理作用后心脏后负荷是否会增大，前负荷是否会减小？这也为缺血预处理未来的相关研究指明了方向。

3.5 课题专家组对未来的建议 第一、缺血预处理提升运动表现的积极效应已十分明确，但其作用机制仍不完全清晰，现有研究中极少有涉及到缺血预处理提升运动表现相关机制的探讨，因此今后的研究应更加注重其发挥作用的生理机制，提高缺血预处理应用的科学依据。第二，缺血预处理在生理学和运动医学领域的应用是不可相提并论的，和运动预处理也是有本质的区别，其的作用机制和干预方法完全不同，相关学者在未来的研究中应加以区分。

致谢：感谢北京体育大学、国家体育总局运动应激重点实验室的吴迎副教授在文章设计及撰写过程给予的指导和帮助。

作者贡献：王周负责资料收集和撰写论文，吴迎负责文章设计和审核。

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。

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：文章撰写遵守了《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA声明)。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

- MURRY CE, JENNINGS RB, REIMER KA. Preconditioning with ischemia: a delay of lethal cell injury in ischemic myocardium. *Circulation*. 1986;74(5):1124-1136.
- GROOT P, THIJSEN D, SANCHEZ M, et al. Ischemic preconditioning improves maximal performance in humans. *Eur J Appl Physiol*. 2010;108(1):141-146.
- BARBOSA TC, MACHADO AC, BRAZ ID, et al. Remote ischemic preconditioning delays fatigue development during handgrip exercise. *Scand J Med Sci Sports*. 2015;25(3):356-364.

- [4] LINDSAY A, PETERSEN C, BLACKWELL G, et al. The effect of 1 week of repeated ischaemic leg preconditioning on simulated Keirin cycling performance: a randomised trial. *BMJ Open Sport Exerc Med*. 2017;3(1):e000229.
- [5] GUILHERME L, CARELLI L, BRAZ J, et al. Effects of ischemic preconditioning as a warm-up on leg press and bench press performance. *J Hum Kinet*. 2020;75(1):267-277.
- [6] FRANZ A, BEHRINGER M, HARMSEN JF, et al. Ischemic preconditioning blunts muscle damage responses induced by eccentric exercise. *Med Sci Sports Exerc*. 2018;50(1):109-115.
- [7] SLYSZ JT, PETRICK HL, MARROW JP, et al. An examination of individual responses to ischemic preconditioning and the effect of repeated ischemic preconditioning on cycling performance. *Eur J Sport Sci*. 2020;20(5):633-640.
- [8] SOUZA H, ARRIEL RA, HOHL R, et al. Is ischemic preconditioning intervention occlusion-dependent to enhance resistance exercise performance? *J Strength Cond Res*. 2021;35(10):2706-2712.
- [9] SOUZA H, ARRIEL RA, MOTA GR, et al. Does ischemic preconditioning really improve performance or it is just a placebo effect? *PLoS One*. 2021;16(5):e0250572.
- [10] MANSOUR Z, BOUITBIR J, CHARLES AL, et al. Remote and local ischemic preconditioning equivalently protects rat skeletal muscle mitochondrial function during experimental aortic cross-clamping. *J Vasc Surg*. 2012;55(2):497-505.
- [11] SHARMA V, CUNNIFFE B, VERMA AP, et al. Characterization of acute ischemia-related physiological responses associated with remote ischemic preconditioning: a randomized controlled, crossover human study. *Physiol Rep*. 2014;2(11):e12200.
- [12] 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*. 2012;112(8):2903-2912.
- [13] COCKING S, WILSON MG, NICHOLS D, et al. Is there an optimal ischaemic preconditioning dose to improve cycling performance? *Int J Sports Physiol Perform*. 2018;13(3):274-282.
- [14] CRISAFULLI A, TANGIANU F, TOCCO F, et al. Ischemic preconditioning of the muscle improves maximal exercise performance but not maximal oxygen uptake in humans. *J Appl Physiol* (1985). 2011;111(2):530-536.
- [15] PAIXAO RC, MOTA GR, MAROCOLO M. Acute effect of ischemic preconditioning is detrimental to anaerobic performance in cyclists. *Int J Sports Med*. 2014;35(11):912-915.
- [16] LALONDE F, CURNIER DY. Can anaerobic performance be improved by remote ischemic preconditioning? *J Strength Cond Res*. 2015;29(1):80-85.
- [17] GIBSON N, MAHONY B, TRACEY C, et al. Effect of ischemic preconditioning on repeated sprint ability in team sport athletes. *J Sports Sci*. 2015;33:1182-1188.
- [18] PATTERSON SD, BEZODIS NE, GLAISTER M, et al. The effect of ischemic preconditioning on repeated sprint cycling performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2015;47(8):1652-1658.
- [19] KRAUS AS, PASHA EP, MACHIN DR, et al. Bilateral upper limb remote ischemic preconditioning improves anaerobic power. *Open Sports Med*. 2015;9:1-6.
- [20] HITTINGER EA, MAHER JL, NASH MS, et al. Ischemic preconditioning does not improve peak exercise capacity at sea level or simulated high altitude in trained male cyclists. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2015;40(1):65-71.
- [21] BIRKELUND T, OBAD DS, MATEJEC R, et al. Remote ischemic preconditioning does not increase circulating or effector organ concentrations of proopiomelanocortin derivatives. *Scand Cardiovasc J*. 2015;49:257-263.
- [22] CRUZ RS, AGUIAR RA, TURNES T, et al. Effects of ischemic preconditioning on maximal constant-load cycling performance. *J Appl Physiol* (1985). 2015;119:961-967.
- [23] CARU M, LALONDE F, GRAVEL H, et al. Remote ischaemic preconditioning shortens QT intervals during exercise in healthy subjects. *Eur J Sport Sci*. 2016;16(8):1005-1013.
- [24] GRIFFIN PJ, FERGUSON RA, GISSANE C, et al. Ischemic preconditioning enhances critical power during a 3 minute all-out cycling test. *J Sports Sci*. 2018;36(9):1038-1043.
- [25] PARADIS-DESCHENES P, JOANISSE DR, BILLAUT F. Ischemic preconditioning improves time trial performance at moderate altitude. *Med Sci Sports Exerc*. 2018;50(3):533-541.
- [26] TANAKA D, SUGA T, SHIMOHO K, et al. Effect of 2-weeks ischemic preconditioning on exercise performance: a pilot study. *Front Sports Act Living*. 2021;3:646369.
- [27] JEAN-ST-MICHEL E, MANLIHOT C, LI J, et al. Remote preconditioning improves maximal performance in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(7):1280-1286.
- [28] MAROCOLO M, MOTA GR, PELEGRINI V, et al. Are the beneficial effects of ischemic preconditioning on performance partly a placebo effect? *Int J Sports Med*. 2015;36:822-825.
- [29] FERRIRA TN, SABINO-CARVALHO J, LOPES TR, et al. Ischemic preconditioning and repeated sprint swimming: a placebo and nocebo study. *Med Sci Sports Exerc*. 2016;48(10):1967-1975.
- [30] FOSTER GP, WESTERDAHL DE, FOSTER LA, et al. Ischemic preconditioning of the lower extremity attenuates the normal hypoxic increase in pulmonary artery systolic pressure. *Respir Physiol Neurobiol*. 2011;179(2-3):248-253.
- [31] BAILEY TG, JONES H, GREGSON W, et al. Effect of ischemic preconditioning on lactate accumulation and running performance. *Med Sci Sports Exerc*. 2012;44(11):2084-2089.
- [32] BAILEY TG, BIRK GK, CABLE NT, et al. Remote ischemic preconditioning prevents reduction in brachial artery flow-mediated dilation after strenuous exercise. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2012;303(5):H533-H538.
- [33] TOCCO F, MARONGIU E, GHIANI G, et al. Muscle ischemic preconditioning does not improve performance during self-paced exercise. *Int J Sports Med*. 2014;36(1):9-15.
- [34] JAMES CA, WILLMOTT A, RICHARDSON AJ, et al. Ischaemic preconditioning does not alter the determinants of endurance running performance in the heat. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116(9):1-11.
- [35] SABINO-CRAVALHO J, LOPES TR, OBEID-FREITAS T, et al. Effect of ischemic preconditioning on endurance performance does not surpass placebo. *Med Sci Sports Exerc*. 2017;49(1):124-132.
- [36] SEGER JPH, TIMMERS S, PLOEGMAKERS D, et al. Is delayed ischemic preconditioning as effective on running performance during a 5km time trial as acute IPC? *J Sci Med Sport*. 2017;20(2):208-212.
- [37] GRIFFIN PJ, HUGHES L, GISSANE C, et al. Effects of local versus remote ischemic preconditioning on repeated sprint running performance. *J Sports Med Phys Fitness*. 2018;59(2):187-194.
- [38] CHEN Y, YANG J, MURADOV O, et al. Effect of ischemic preconditioning on maximum accumulated oxygen deficit in 400-meter runners. *Eur J Sport Sci*. 2022. doi: 10.1080/17461391.2022.2064769.
- [39] FOSTER GP, GIRI PC, ROGERS DM, et al. Ischemic preconditioning improves oxygen saturation and attenuates hypoxic pulmonary vasoconstriction at high altitude. *High Alt Med Biol*. 2014;15(2):155-161.
- [40] MAROCOLO M, DA MOTA GR, SIMIM MA, et al. Myths and facts about the effects of ischemic preconditioning on performance. *International Sports Med*. 2016a;37:87-96.
- [41] MAROCOLO M, WILLARDSON JM, MAROCOLO IC, et al. Ischemic preconditioning and placebo intervention improves resistance exercise performance. *J Strength Cond Res*. 2016b;30:1462-1469.
- [42] TANAKA D, SUGA T, TANAKA T, et al. Ischemic preconditioning enhances muscle endurance during sustained isometric exercise. *Int J Sports Med*. 2016;37(8):614-618.
- [43] PARADIS-DESCHENES, JOANISSE DR, BILLAUT F. Ischemic preconditioning increases muscle perfusion, oxygen uptake, and force in strength-trained athletes. *Appl Physiol Nutr Metab*. 2016;41(9):938-944.
- [44] INCOGNITO AV, BURR JF, MILLAR PJ. The effects of ischemic preconditioning on human exercise performance. *Sports Med*. 2017;46(4):531-544.
- [45] COCKING S, CABLE NT, WILSON MG, et al. Conduit artery diameter during exercise is enhanced after local, but not remote, ischemic preconditioning. *Front Physiol*. 2018;9:435.
- [46] LEONRADO, CARVAIHO, RENATO, et al. Ischemic preconditioning improves strength endurance performance. *J Strength Cond Res*. 2019;33(12):3332-3337.
- [47] BEHRENS M, ZSCHORLICH V, MITTLMEIER T, et al. Ischemic preconditioning did not affect central and peripheral factors of performance fatigability after submaximal isometric exercise. *Front Physiol*. 2020;11:371.
- [48] PETHICK J, CASSELTON C, WINTER SL, et al. Ischemic preconditioning blunts loss of knee extensor torque complexity with fatigue. *Med Sci Sports Exerc*. 2021;53(2):306-315.
- [49] GIBSON N, WHITE J, NEISH M, et al. Effect of ischemic preconditioning on land-based sprinting in team-sport athletes. *Int J Sports Physiol Perform*. 2013;8(6):671-676.
- [50] GARCIA C, MOTA GD, LEICHT A, et al. Ischemic preconditioning and acute recovery of performance in rugby union players. *Sports Med Int Open*. 2017;1(3):E107-E112.
- [51] RICHARD P, BILLAUT F. Time-trial performance in elite speed skaters after remote ischemic preconditioning. *Int J Sports Physiol Perform*. 2018;16:1-9.
- [52] TURNES T, AGUIAR RA, DE OLIVEIRA CRUZ RS, et al. Impact of ischaemia-reperfusion cycles during ischaemic preconditioning on 2000-m rowing ergometer performance. *Eur J Appl Physiol*. 2018;118:1599-1607.
- [53] HAUSENLOY DJ, YELLON DM. The Second Window of Preconditioning (SWOP) where are we now? *Cardiovasc Drugs Ther*. 2010;24(3):235-254.
- [54] LISBOA FD, TURNES T, CRUZ R, et al. The time dependence of the effect of ischemic preconditioning on successive sprint swimming performance. *J Sci Med Sport*. 2016;20(5):507-511.
- [55] MOTA G, WILLIS SJ, SANTOS N, et al. Ischemic preconditioning maintains performance on two 5-km time trials in hypoxia. *Med Sci Sports Exerc*. 2019;51(11):2309-2317.
- [56] JEFFRIES O, WALDRON M, PATTISON JR, et al. Enhanced local skeletal muscle oxidative capacity and microvascular blood flow following 7-day ischemic preconditioning in healthy humans. *Front Physiol*. 2018;9:463.
- [57] MAROCOLO M, MAROCOLO IC, MOTA GR. Beneficial effects of ischemic preconditioning in resistance exercise fade over time. *Int J Sports Med*. 2016;37(10):819-824.
- [58] CARVALHO L, BARROSO R. Ischemic preconditioning improves strength endurance performance. *J Strength Cond Res*. 2019;33(12):3332-3337.
- [59] PARADIS-DESCHENES, JOANISSE DR, MAURIEGE P, et al. Ischemic preconditioning enhances aerobic adaptations to sprint interval training in athletes without altering systemic hypoxic signaling and immune function. *Front Sports Act Living*. 2020;2:41.
- [60] CARVALHO L, CONCON V, MELONI M, et al. Effects of resistance training combined with ischemic preconditioning on muscle size and strength in resistance-trained individuals. *J Sports Med Phys Fitness*. 2020;60(11):1431-1436.
- [61] SURKAR SM, BLAND MD, MATTLAG AE, et al. Effects of remote limb ischemic preconditioning on muscle strength in healthy young adults: a randomized controlled trial. *PLoS One*. 2020;15(2):1-19.
- [62] CHENG CF, KUO YH, HSU WC, et al. Local and remote ischemic preconditioning improves sprint interval exercise performance in team sport athletes. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(20):10653.
- [63] INCOGNITO AV, BURR JF, MILLAR PJ. The effects of ischemic preconditioning on human exercise performance. *Sports Med*. 2017;46(4):531-544.
- [64] LARSEN FJ, SCHIFFER TA, BORNIQUEL S, et al. Dietary inorganic nitrate improves mitochondrial efficiency in humans. *Cell Metab*. 2011;13(2):149-159.
- [65] RASSAF T, TOTEACK M, HENDGEN-COTTA UB, et al. Circulating nitrite contributes to cardio protection by remote ischemic preconditioning. *Circ Res*. 2014;114(10):1601-1610.
- [66] 余克威, 吴毅. 一氧化氮对线粒体生物功能的影响 [J]. 神经损伤与功能重建, 2012,7(5):373-376.
- [67] DOWNEY JM, DAVIS AM, COHEN MV. Signaling pathways in ischemic preconditioning. *Heart Fail Rev*. 2007;12(3-4):181-188.
- [68] AMANN M, DEMPSEY JA. Locomotor muscle fatigue modifies central motor drive in healthy humans and imposes a limitation to exercise performance. *J Physiol*. 2008;586(1):161-173.
- [69] LEAL AK, YAMAUCHI K, KIM J, et al. Peripheral δ -opioid receptors attenuate the exercise pressor reflex. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2013;305(8):H1246-H1255.

(责任编辑: WJ, ZN, ZJP)