

# 短期南极磷虾油补充对抗阻训练后下肢肌肉运动能力恢复的影响

颀 静<sup>1</sup>, 杨思梦<sup>1</sup>, 吴 迎<sup>1,2</sup>

(1. 北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084; 2. 国家体育总局运动应激适应重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**为探究短期南极磷虾油补充对大强度抗阻训练后人体下肢肌肉运动能力恢复的影响,选取26名男子体能训练专项在校大学生,随机分为安慰剂(PL)组和南极磷虾油(AKO)组,各组分别在抗阻运动前7 d每天服用6 g大豆油或AKO,并在抗阻运动后持续每天服用至实验结束。抗阻运动方案为受试者先采用70% 1次重复最大力量(1RM)的质量完成8次×10组的负重深蹲,之后再以自身质量完成20次×5组的深蹲跳,组间间歇3 min。受试者分别在抗阻运动前和运动后24、48、72 h完成等速肌力、垂直纵跳和20 m冲刺测试。结果表明:下肢力量耐力方面,两组受试者膝关节屈伸肌在240(°)/s等速测试下的总功无显著性差异( $p > 0.05$ );下肢最大力量方面,与PL组相比,AKO组右膝关节屈伸肌在运动后72 h于60(°)/s等速测试下的最大功显著升高( $p < 0.05$ ),左膝关节伸肌在运动后48 h显著升高( $p < 0.05$ ),左膝关节屈肌在运动后48 h和72 h显著升高( $p < 0.05$ );下肢爆发力方面,两组受试者垂直纵跳高度无显著性差异( $p > 0.05$ );速度能力方面,两组受试者20 m冲刺所用时间无显著性差异( $p > 0.05$ )。综上,短期南极磷虾油补充可以促进大强度抗阻训练后下肢肌肉最大力量的恢复,对其他运动能力的恢复无显著影响。

**关键词:**南极磷虾油;抗阻运动;下肢力量;运动能力;骨骼肌

中图分类号:TS225.2;TS201.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)03-0047-07

## Effects of short-term Antarctic krill oil supplementation on the recovery of lower limbs muscle motor ability after resistance exercise

XIE Jing<sup>1</sup>, YANG Simeng<sup>1</sup>, WU Ying<sup>1,2</sup>

(1. School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Exercise Stress and Adapting of General Administration of Sport, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of short-term Antarctic krill oil (AKO) supplementation on the recovery of muscle motor ability of the human lower limbs after high-intensity resistance exercise, twenty-six male college students with special physical training were randomly divided into two groups: placebo (PL) group and AKO group. The PL group took 6 g soybean oil daily and the AKO group took the same dose of AKO for 7 d before the resistance exercise, and continued to take it until the end of the experiment. The resistance exercise scheme was as follows: the subjects were requested to complete 10 sets of 8 squats with 70% 1RM (one-repetition maximum), and the group interval was 3 min. After that, the subjects were requested to complete 5 sets of 20 bodyweight squat jumps, and the group interval

was 3 min. Isokinetic muscle strength of the knee extensors and flexors, height of vertical jump, and 20-metre sprint were measured before resistance exercise and at 24, 48, 72 h after exercise. The results showed that in terms of lower limbs muscle endurance, there was no significant difference in the total work between

收稿日期:2022-10-27;修回日期:2023-10-24

基金项目:中央高校基本科研业务专项资金资助项目(2020054);横向联合项目(20191413,20210056)

作者简介:颀 静(1999),女,硕士研究生,研究方向为运动恢复促进的理论与实践(E-mail) xue@bsu.edu.cn。

通信作者:吴 迎,副教授,博士(E-mail) wuying@bsu.edu.cn。

AKO group and PL group at the speed of  $240(^{\circ})/s$  ( $p > 0.05$ ); in terms of lower limbs muscle maximal strength, at the speed of  $60(^{\circ})/s$ , the maximum work (MW) of the right knee extensors and flexors in AKO group, as well as the left knee flexors, were significantly higher than that in PL group after 72 h of exercise ( $p < 0.05$ ). After 48 h of exercise, the MW of the left knee extensors and flexors in AKO group were significantly higher than that in PL group ( $p < 0.05$ ); in terms of lower limbs muscle power, there was no significant difference in the height of vertical jump between AKO group and PL group ( $p > 0.05$ ); in terms of speed ability, there was no significant difference in 20 - metre sprint time between AKO group and PL group ( $p > 0.05$ ). In conclusion, the short - term AKO supplementation can promote the recovery of muscle maximal strength in the lower limbs after high - intensity resistance exercise, and has no significant effects on the other muscle motor abilities.

**Key words:** Antarctic krill oil; resistance exercise; lower limbs strength; motor ability; skeletal muscle

大强度抗阻训练会造成骨骼肌的损伤和疲劳,常表现为肌肉力量和速度的丢失,进而影响运动人群后续的正常训练和比赛。因此,促进大强度运动后骨骼肌机能的恢复对于提高训练效果,降低运动损伤风险具有积极意义。目前,营养策略作为一种促进疲劳恢复的重要辅助手段已被广泛认可和应用<sup>[1]</sup>,国际奥林匹克委员会在一项关于膳食补充剂与高水平运动员的声明中指出,一水肌酸、维生素D、 $n-3$ 多不饱和脂肪酸( $n-3$  PUFAs)、胶原蛋白、姜黄素和酸樱桃汁等在增强机体的损伤修复能力方面具有极大潜力,有助于帮助运动员更好地预防损伤或促进运动损伤恢复。

不同种类膳食补充剂促进运动损伤恢复效果及原理不尽相同<sup>[3]</sup>,对于不同的运动能力来说,应当有针对性地选择合适的补充策略以实现最佳的作用效果。已有研究报道,长期补充 $n-3$  PUFAs有利于缓解剧烈运动引起的延迟性肌肉酸痛和炎症反应,促进运动后骨骼肌机能的恢复<sup>[4-6]</sup>,鱼类、坚果和亚麻籽是 $n-3$  PUFAs常见的饮食来源。近年来,研究发现,南极磷虾油也是一种富含 $n-3$  PUFAs的营养补充剂,主要包括二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)。南极磷虾油是从南极磷虾中提取的,除了 $n-3$  PUFAs之外,其还含有磷脂、虾青素、维生素和微量元素等多种生物活性物质,在改善脂质代谢<sup>[7]</sup>、提高认知功能<sup>[8]</sup>和预防心血管疾病<sup>[9]</sup>等方面发挥着重要作用。与鱼油不同,南极磷虾油中的脂肪酸与磷脂相结合(而非甘油三酯),具有更高的生物利用度<sup>[10-11]</sup>。同时,在 $n-3$  PUFAs、虾青素和磷脂的协同作用下,南极磷虾油表现出较强的抗炎和抗氧化特性<sup>[12-13]</sup>。与植物油相比,如一级大豆油中维生素E含量为 $804.5 \sim 1\,246.6$  mg/kg,包括

$\alpha-$ 、 $\gamma-$ 、 $\delta-$ 生育酚,其中 $\gamma-$ 生育酚含量最高<sup>[14]</sup>;南极磷虾油中虾青素的含量为 $40 \sim 5\,000$  mg/kg<sup>[15]</sup>,还含有维生素A、维生素E等,其清除氧自由基的能力较强<sup>[16]</sup>,能够更有效地提升脂质的氧化稳定性,因此很有可能在短期补充的情况下产生促进运动损伤恢复的积极效应。

目前已有研究表明,长期补充南极磷虾油可能通过提高胆碱浓度<sup>[17]</sup>、改善运动后免疫抑制<sup>[18]</sup>和增强抗氧化能力<sup>[19]</sup>等途径来促进运动员有氧能力的恢复,但尚无研究证明短期补充南极磷虾油对改善大强度抗阻训练后肌肉功能下降的有效性。本研究通过在运动前7 d和运动后3 d对受试者进行短期南极磷虾油补充,观察抗阻训练后各时间点其下肢肌肉力量耐力、最大力量、爆发力和速度能力的恢复情况,探讨短期补充南极磷虾油对运动损伤机体运动能力的影响,以期南极磷虾油的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 实验原料

大豆油、南极磷虾油(供应商为Aker阿克海洋生物,产品名称为SUPERBA SC40™,批号为12959B),艾兰得健康控股有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

IsoMed2000等速肌力测试系统,德国D&R公司;瑞士Kistler 9281CA三维测力台。

#### 1.1.3 研究对象与分组

选取26名北京体育大学男子体能训练专项在校大学生,随机分为两组,分别为安慰剂(PL)组和南极磷虾油(AKO)组,进行双盲随机对照实验,PL组和AKO组分别在抗阻运动前7 d每天服用6 g大

豆油和南极磷虾油,并在抗阻运动后持续每天服用至实验结束。受试者基本情况见表1,其在身高、体质量和1次重复最大力量(One-repetition maximum,1RM)方面均无显著性差异( $p > 0.05$ )。所有受试者均无吸烟史、海鲜过敏史、高血压及其他代谢性疾病。在实验期间及实验前两周,受试者未饮酒、喝咖啡,未服用其他营养补充剂及药物,且不改变日常饮食习惯。采用24 h膳食回顾法记录受试者连续3 d的膳食摄入情况,以控制其碳水化合物、蛋白质、脂肪酸等的摄入量。受试者被要求于测试(包括1RM测试)前1周及抗阻运动后72 h内不进行任何剧烈运动,且保证充足睡眠。所有受试者均符合自愿参与实验的标准,并签署了知情同意书。

表1 受试者基本情况

组别	人数	身高/cm	体质量/kg	1RM/kg
PL组	14	179.6 ± 4.7	73.5 ± 7.1	138.6 ± 22.5
AKO组	12	180.9 ± 3.9	74.1 ± 4.9	132.9 ± 13.6

注:20 m 冲刺测试 PL 组和 AKO 组分别为 12 人和 7 人

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 抗阻运动方案

受试者采用70% 1RM的质量完成8次×10组的负重深蹲(包括3 s下降阶段和1 s上升阶段),组间间歇3 min,在第10组负重深蹲完成后,受试者以自身体质量完成20次×5组的深蹲跳,组间间歇3 min。在抗阻运动前完成运动前评估,包括等速肌力、垂直纵跳和20 m 冲刺测试,并在运动后24、48 h和72 h重复测试。实验流程见图1。

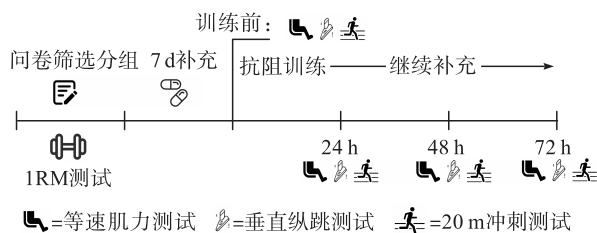


图1 实验流程

### 1.2.2 下肢肌肉运动能力测试方法

#### 1.2.2.1 等速肌力测试

采用等速肌力测试系统检测膝关节60(°)/s和240(°)/s等速向心肌力,测试指标分别为最大功和总功。测试前,受试者先进行15 min的准备活动。在正式测试前,要求受试者在两个测试速度下分别进行动作学习和适应性训练,以亚极限强度运动5次,休息1 min后开始正式测试。正式

测试时,受试者双侧膝关节以60(°)/s角速度最大力收缩5次,以240(°)/s角速度最大力收缩25次,不同速度间休息1 min,测试顺序为先右腿后左腿。

#### 1.2.2.2 垂直纵跳测试

采用三维测力台检测受试者的下肢快速力量。测试时,要求受试者立于测力台上,双手叉腰避免上肢摆动助力,准备就绪后快速下蹲再迅速向上跳跃,腾空时勾脚尖,双腿自然伸直,自然落于测力台中央,缓冲成半蹲状态结束。受试者每次测试有3次试跳机会,每次试跳间歇1 min,取3次试跳成绩的最高值作为该次测试的最终成绩。

#### 1.2.2.3 20 m 冲刺测试

采用红外线技术测试受试者的20 m 冲刺能力。受试者每次测试有2次机会,取最好成绩作为该次测试的最终成绩。

### 1.2.3 数据处理与统计

采用SPSS 25.0 软件进行数据处理与分析,统计结果均以“平均值±标准差”表示。统计方法采用2(PL组和AKO组)×4(运动前,运动后24、48、72 h)的重复测量方差分析,若统计数据符合Mauchly球形检验结果( $p > 0.05$ ),无需校正,若统计数据不符合球形检验结果( $p < 0.05$ ),使用校正系数Greenhouse-Geisser校正自由度。 $p < 0.05$ 表示显著性水平。

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果

#### 2.1.1 南极磷虾油补充对下肢肌肉力量耐力的影响

检测了南极磷虾油或安慰剂补充后双侧膝关节屈伸肌在240(°)/s等速测试下总功的变化情况,结果如图2所示。由图2可知,两组受试者膝关节屈伸肌总功无显著性差异( $p > 0.05$ )。

#### 2.1.2 南极磷虾油补充对下肢肌肉最大力量的影响

检测了南极磷虾油或安慰剂补充后双侧膝关节屈伸肌在60(°)/s等速测试下最大功的变化情况,结果如图3所示。由图3可知:AKO组右膝关节伸肌最大功在运动后72 h显著高于PL组( $p < 0.05$ );AKO组右膝关节屈肌最大功在运动后72 h显著高于PL组( $p < 0.05$ );AKO组左膝关节伸肌最大功在运动后48 h显著高于PL组( $p < 0.05$ );AKO组左膝关节屈肌最大功在运动后48 h和72 h均显著高于PL组( $p < 0.05$ )。

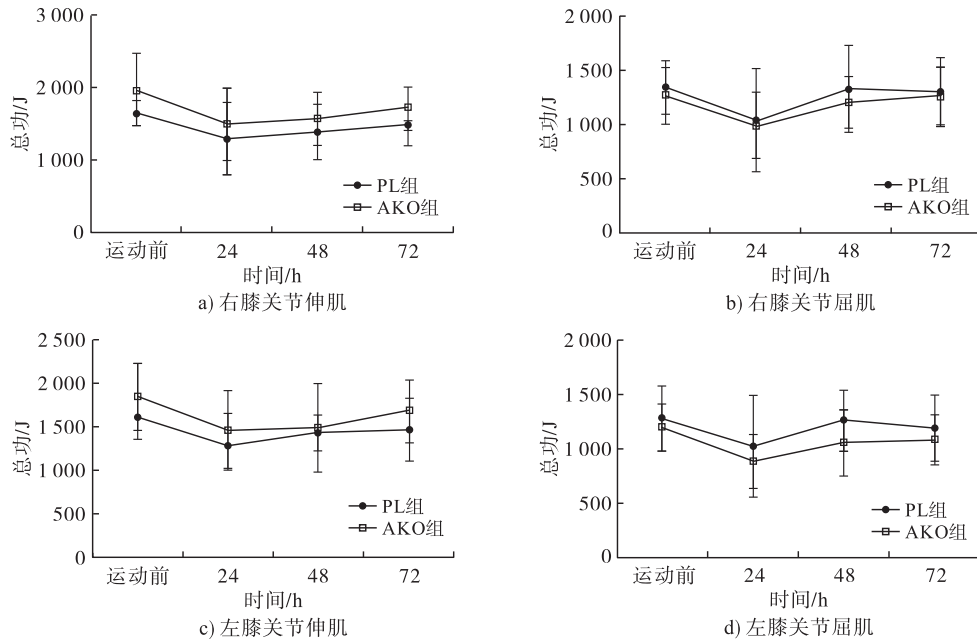
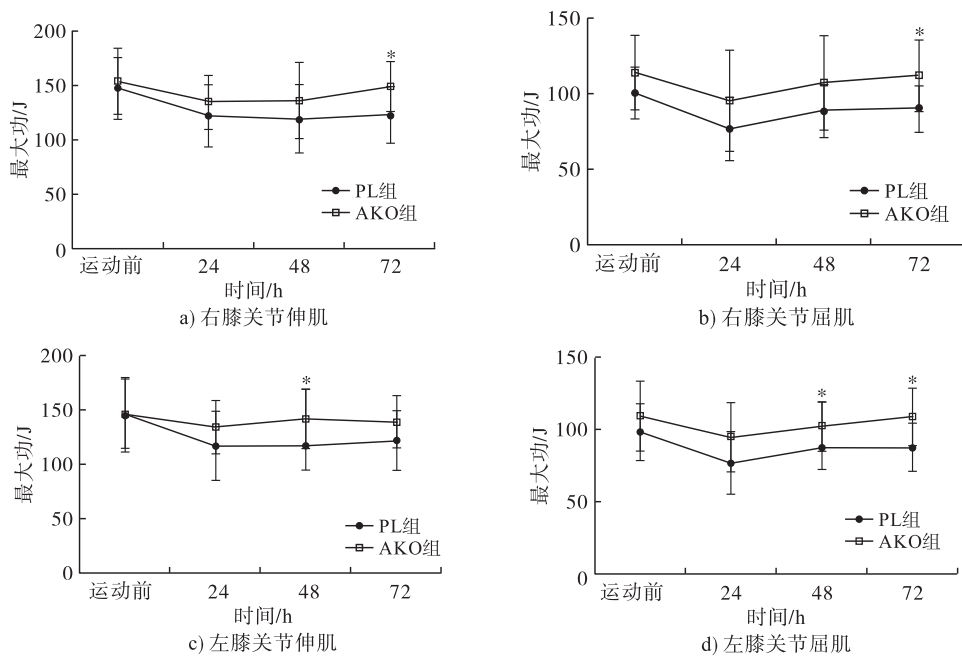


图2 受试者双侧膝关节在240(°)/s等速测试下的总功



注: \*表示AKO组与PL组相比差异显著( $p < 0.05$ )

图3 受试者双侧膝关节在60(°)/s等速测试下的最大功

2.1.3 南极磷虾油补充对下肢爆发力的影响

检测了南极磷虾油或安慰剂补充后垂直纵跳能力的变化情况,结果如图4所示。

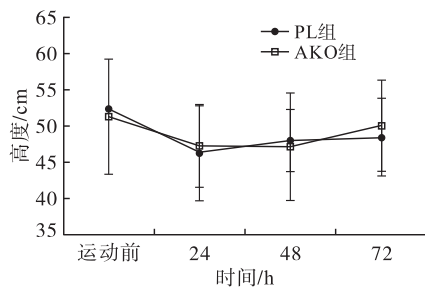


图4 垂直纵跳测试结果

由图4可知,两组受试者垂直纵跳高度无显著差异( $p > 0.05$ )。

2.1.4 南极磷虾油补充对速度能力的影响

检测了南极磷虾油或安慰剂补充后20 m冲刺能力的变化情况,结果如表2所示。

表2 20 m冲刺测试结果

组别	所用时间/s			
	运动前	24 h	48 h	72 h
PL组	3.11 ± 0.13	3.20 ± 0.09	3.24 ± 0.11	3.22 ± 0.12
AKO组	3.13 ± 0.18	3.17 ± 0.13	3.20 ± 0.16	3.15 ± 0.11

由表2可知,两组受试者20 m冲刺所用时间无

显著差异( $p > 0.05$ )。

## 2.2 讨论

高强度力量训练会诱导运动性骨骼肌损伤的发生,引起肌肉功能的下降<sup>[20]</sup>。本研究结果显示,急性大强度抗阻运动后 24 h PL 组受试者双侧膝关节等速肌力出现明显下降(见图 2、图 3),说明本研究的训练方案可以有效降低下肢肌肉功能能力,引起肌肉疲劳。

最大功是指肌肉多次收缩产生的最大做功能力,可反映肌肉在整个运动范围内收缩时的最大肌力<sup>[21]</sup>。本研究发现,经过运动前 7 d 和运动后 3 d 的南极磷虾油补充,受试者双侧膝关节屈伸肌的恢复速度明显加快,其最大功在运动后 48 h 和/或 72 h 明显高于对照组,并且 AKO 组在运动后 72 h 基本恢复到运动前水平(见图 3),说明短期南极磷虾油补充有助于促进大强度抗阻训练后下肢肌肉力量的恢复。此外,受试者左右侧膝关节屈伸肌的结果并不完全一致,这与肌肉优势侧和非优势侧肌力不平衡有关。

长时间或者大强度离心收缩会造成肌纤维的机械损伤,使肌肉的收缩力量下降,而细胞膜的完整性是保障胞内稳态的重要前提。当骨骼肌细胞膜的完整结构在机械应力的作用下被破坏以后,大量涌入的钙离子会通过激活钙蛋白酶和磷脂酶 A2 的水解活性来加剧肌肉损伤,同时,炎症细胞如中性粒细胞、巨噬细胞等的入侵也会对肌肉产生不利影响<sup>[22]</sup>。因此,加强骨骼肌质膜的抗损伤、促修复能力是提高或维持肌肉力量的关键。EPA 和 DHA 是细胞膜的重要组成部分,外源性  $n-3$  PUFAs 可通过增加肌细胞膜中不饱和脂肪酸含量来改变膜功能<sup>[23-24]</sup>,进而减轻肌肉的损伤程度,促进损伤修复。研究表明, $n-3$  PUFAs (尤其是 DHA)是提高细胞膜弹性以应对机械应力的重要因素。由于 PUFAs 中的饱和碳( $\text{CH}_2$ )被两个不饱和碳( $=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{}$ )所包围,所以具有很高的旋转自由度<sup>[25]</sup>,这使得 PUFAs 表现出较强的变形能力以降低膜表面张力。当含有 PUFAs 的磷脂膜承受机械应力时,会形成一种类似于管状内陷的结构,称为空泡状扩张(Vacuole-like dilations, VLDs),这种结构可通过减少膜的破裂来对细胞起到一定的保护作用,而磷脂膜中 PUFAs 的含量很大程度上影响了细胞在机械应力的作用下形成 VLDs 结构的能力,在 DHA 含量丰富的细胞中,VLDs 形成的速度更快<sup>[26]</sup>。除了保护细胞膜的完整性以减轻肌肉的损伤程度之外,外源性  $n-3$  PUFAs 还可以影响质膜流动性以加快损伤修复。质膜修复途径如囊泡融合、内吞、脱落等<sup>[27]</sup>都是以膜脂和膜蛋白的流动性为基础的,因此质膜损伤后脂质流动性的增加

与修复成功密切相关。研究发现,力竭运动会导致骨骼肌质膜流动性显著下降,而补充一定剂量的 EPA 和 DHA 之后质膜流动性明显增加<sup>[28]</sup>,说明膜脂中脂肪酸链的不饱和程度越高,膜的流动性越大,这主要与 PUFAs 的顺式双键结构有关。本课题组前期研究发现,4 周南极磷虾油补充可以降低运动损伤后血清中肌酸激酶和乳酸脱氢酶活性,增加骨骼肌质膜中 PUFAs 含量及其流动性,从而促进骨骼肌质膜修复,对于加快小鼠力竭运动后 2~72 h 四肢抓力的恢复有重要意义<sup>[29]</sup>。另外,富含 DHA 的磷脂膜一方面可能有利于促进膜蛋白的构象变化,另一方面还可能降低脂质双分子层厚度,从而影响膜蛋白的定位和运输<sup>[30]</sup>。不仅如此,南极磷虾油还富含虾青素、维生素 A、维生素 E、钙、磷、镁、铁等多种物质,其中虾青素具有抑制脂质过氧化、保护细胞膜和线粒体免受氧化攻击的作用,在改善机体的氧化应激和炎症反应方面具有积极效应<sup>[31]</sup>。综上所述,南极磷虾油能够更有效地重塑骨骼肌质膜结构,维持质膜的完整性、稳定性和流动性,从而提高细胞膜的抗损伤、促修复能力,而这很有可能是本研究中短期南极磷虾油补充促进大强度抗阻运动后肌肉最大力量恢复的重要原因,未来可进一步开展相关研究。

从总功的结果来看,南极磷虾油的补充对肌肉力量耐力的变化无显著影响,两组受试者都在运动后出现先下降后恢复的变化趋势(见图 2)。同样,南极磷虾油的补充也未能使受试者的垂直纵跳高度和 20 m 冲刺时间出现明显差异(见图 4、表 2),这在一定程度上反映了短期南极磷虾油补充可能无法有效促进大强度抗阻运动后下肢肌肉力量耐力、爆发力和速度能力的恢复。大强度力量训练可引起外周疲劳,包括神经兴奋传递、兴奋收缩耦联、肌肉收缩、能源物质供应和代谢产物堆积等多个方面,其中任何一个或几个方面遭受破坏,都可能会导致肌肉功能的减弱<sup>[32]</sup>。因此,对于不同的运动能力来说,影响其疲劳恢复的生理机制并不完全相同。肌肉力量耐力的影响因素主要与能源物质储备和耐酸能力有关,以无氧糖酵解供能为主的运动方式不仅会导致肌糖原储备和磷酸肌酸减少<sup>[33]</sup>,直接影响运动中肌肉能量的供应,诱发肌肉疲劳;而且还会导致氢离子和无机磷酸盐增多,使肌肉的收缩力下降<sup>[34]</sup>。未被及时缓冲的氢离子会引起肌肉 pH 降低,无机磷酸盐则会通过加剧钙离子沉积和钙离子通道的磷酸化两种途径来引起肌浆网钙离子释放受损<sup>[35]</sup>,进而影响肌肉的兴奋收缩耦联过程。研究表明,外源性肌酸和碳酸氢盐可分别通过改善能量产生<sup>[36]</sup>和减弱肌肉的酸性状态<sup>[37]</sup>来提高大强度抗阻运动中肌肉无氧耐

力表现。对于肌肉爆发力和速度能力来说,除了受到供能系统的影响外,其能力的下降还与神经肌肉的兴奋传递障碍有关,神经肌肉接点前膜的乙酰胆碱释放不足或者接点后膜的乙酰胆碱堆积都会导致运动性疲劳的发生<sup>[38]</sup>。有研究报道,与对照组相比,6 g/d 鱼油补充 52 d 对男子大学生在大强度抗阻运动后的 40 码冲刺成绩和 T 形跑测试无显著影响<sup>[39]</sup>,4 周 3 g/d *n*-3 PUFAs 补充对受试者下坡跑运动后的 10 s Wingate 最大无氧功率无显著影响<sup>[40]</sup>,6 g/d 和 8 g/d *n*-3 PUFAs 补充 33 d 对力量训练者大强度抗阻运动后的垂直纵跳高度和杠铃后蹲至疲劳的次数无显著影响<sup>[41]</sup>,与本研究结果一致。

### 3 结 论

短期南极磷虾油补充可以促进大强度抗阻训练后下肢肌肉最大力量的恢复,对肌肉力量耐力、爆发力和速度能力的恢复无显著影响。

### 参考文献:

- [1] SOUSA M, TEIXEIRA V H, SOARES J. Dietary strategies to recover from exercise-induced muscle damage[J]. Int J Food Sci Nutr, 2014, 65(2): 151-163.
- [2] MAUGHAN R J, BURKE L M, DVORAK J, et al. IOC consensus statement: Dietary supplements and the high-performance athlete[J]. Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2018, 28(2): 104-125.
- [3] RAWSON E S, MILES M P, LARSON-MEYER D E. Dietary supplements for health, adaptation, and recovery in athletes[J]. Int J Sport Nutr Exerc Metab, 2018, 28(2): 188-199.
- [4] TSUCHIYA Y, YANAGIMOTO K, NAKAZATO K, et al. Eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids-rich fish oil supplementation attenuates strength loss and limited joint range of motion after eccentric contractions: A randomized, double-blind, placebo-controlled, parallel-group trial[J]. Eur J Appl Physiol, 2016, 116(6): 1179-1188.
- [5] TARTIBIAN B, MALEKI B H, ABBASI A. Omega-3 fatty acids supplementation attenuates inflammatory markers after eccentric exercise in untrained men[J]. Clin J Sport Med, 2011, 21(2): 131-137.
- [6] OCHI E, TSUCHIYA Y, YANAGIMOTO K. Effect of eicosapentaenoic acids-rich fish oil supplementation on motor nerve function after eccentric contractions[J/OL]. J Int Soc Sports Nutr, 2017, 14: 23 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1186/s12970-017-0176-9>.
- [7] TILLANDER V, BJØRNDAL B, BURRI L, et al. Fish oil and krill oil supplementations differentially regulate lipid catabolic and synthetic pathways in mice[J/OL]. Nutr Metab, 2014, 11: 20 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-11-20>.
- [8] WIBRAND K, BERGE K, MESSAOUDI M, et al. Enhanced cognitive function and antidepressant-like effects after krill oil supplementation in rats[J/OL]. Lipids Health Dis, 2013, 12: 6 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-12-6>.
- [9] HALS P A, WANG X, XIAO Y F. Effects of a purified krill oil phospholipid rich in long-chain omega-3 fatty acids on cardiovascular disease risk factors in non-human primates with naturally occurring diabetes type-2 and dyslipidemia[J/OL]. Lipids Health Dis, 2017, 16(1): 11 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1186/s12944-017-0411-z>.
- [10] KÖHLER A, SARKKINEN E, TAPOLA N, et al. Bioavailability of fatty acids from krill oil, krill meal and fish oil in healthy subjects: A randomized, single-dose, cross-over trial[J/OL]. Lipids Health Dis, 2015, 14: 19 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1186/s12944-015-0015-4>.
- [11] RAMPRASATH V R, EYAL I, ZCHUT S, et al. Enhanced increase of omega-3 index in healthy individuals with response to 4-week n-3 fatty acid supplementation from krill oil versus fish oil[J/OL]. Lipids Health Dis, 2013, 12: 178 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-12-178>.
- [12] WEN C, JIANG M, HUANG W, et al. Antarctic krill oil attenuates oxidative stress via the KEAP1-NRF2 signaling in patients with coronary heart disease[J/OL]. Evid Based Complement Alternat Med, 2020, 2020: 9534137 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1155/2020/9534137>.
- [13] DA BOIT M, MASTALUROVA I, BRAZAITE G, et al. The effect of krill oil supplementation on exercise performance and markers of immune function[J/OL]. PLoS One, 2015, 10(9): e0139174 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139174>.
- [14] 温运启, 刘玉兰, 王璐阳, 等. 不同食用植物油中维生素 E 组分及含量研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(3): 35-39.
- [15] XIE D, GONG M, WEI W, et al. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil: A comprehensive review of chemical composition, extraction technologies, health benefits, and current applications[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2019, 18(2): 514-534.
- [16] 陈晋明, 王世平, 马俪珍, 等. 虾青素抗氧化活性研究[J]. 营养学报, 2007, 29(2): 163-165, 169.
- [17] STORSVE A B, JOHNSEN L, NYBORG C, et al. Effects of krill oil and race distance on serum choline and choline metabolites in triathletes: A field study[J/OL]. Front Nutr, 2020, 7: 133 [2022-10-27]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00133>.
- [18] 杨思梦, 贺庆, 杨吉涛, 等. 南极磷虾油对长跑运动员有氧代谢及抗疲劳能力的影响[J]. 中国油脂, 2022,

- 47(11): 16–24, 50.
- [19] SKARPA ŃSKA – STEJNBORN A, PILACZY ŃSKA – SZCZE Ś, BASTA P, et al. Effects of supplementation with Neptune krill oil (*Euphasia superba*) on selected redox parameters and pro – inflammatory markers in athletes during exhaustive exercise[J]. *J Hum Kinet*, 2015, 47: 7–8.
- [20] BYRNE C, ESTON R. Maximal – intensity isometric and dynamic exercise performance after eccentric muscle actions[J]. *J Sports Sci*, 2002, 20(12): 951–959.
- [21] AMARAL G M, MARINHO H V R, OCARINO J M, et al. Muscular performance characterization in athletes: A new perspective on isokinetic variables[J]. *Braz J Phys Ther*, 2014, 18(6): 521–529.
- [22] TIDBALL J G. Mechanisms of muscle injury, repair, and regeneration[J]. *Compr Physiol*, 2011, 1(4): 2029–2062.
- [23] GERLING C J, MUKAI K, CHABOWSKI A, et al. Incorporation of *omega* – 3 fatty acids into human skeletal muscle sarcolemmal and mitochondrial membranes following 12 weeks of fish oil supplementation [J/OL]. *Front Physiol*, 2019, 10: 348 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00348>.
- [24] DROBNIC F, STORSVE A B, BURRI L, et al. Krill – oil – dependent increases in HS – *omega* – 3 index, plasma choline and antioxidant capacity in well – conditioned power training athletes [J/OL]. *Nutrients*, 2021, 13(12): 4237 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.3390/nu13124237>.
- [25] MANNI M M, TIBERTI M L, PAGNOTTA S, et al. Acyl chain asymmetry and polyunsaturation of brain phospholipids facilitate membrane vesiculation without leakage [J/OL]. *eLife*, 2018, 7: e34394 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.7554/eLife.34394>.
- [26] KADRI L, BACLE A, KHOURY S, et al. Polyunsaturated phospholipids increase cell resilience to mechanical constraints [J/OL]. *Cells*, 2021, 10(4): 937 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.3390/cells10040937>.
- [27] HORN A, JAISWAL J K. Cellular mechanisms and signals that coordinate plasma membrane repair[J]. *Cell Mol Life Sci*, 2018, 75(20): 3751–3770.
- [28] 黄莹仪. 不同剂量及不同类型  $\omega$  – 3 不饱和脂肪酸对小鼠骨骼肌细胞膜流动性的影响研究[J]. *广州体育学院学报*, 2015, 35(4): 80–82.
- [29] 杨思梦, 贺庆, 石丽君, 等. 南极磷虾油对小鼠力竭运动后骨骼肌膜修复的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(5): 112–120.
- [30] HISHIKAWA D, VALENTINE W J, IIZUKA – HISHIKAWA Y, et al. Metabolism and functions of docosahexaenoic acid – containing membrane glycerophospholipids [J]. *FEBS Lett*, 2017, 591(18): 2730–2744.
- [31] DJORDJEVIC B, BARALIC I, KOTUR – STEVULJEVIC J, et al. Effect of astaxanthin supplementation on muscle damage and oxidative stress markers in elite young soccer players[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2012, 52(4): 382–392.
- [32] KATAOKA R, VASENINA E, HAMMERT W B, et al. Is there evidence for the suggestion that fatigue accumulates following resistance exercise? [J]. *Sports Med*, 2022, 52(1): 25–36.
- [33] HOKKEN R, LAUGESEN S, AAGAARD P, et al. Subcellular localization – and fibre type – dependent utilization of muscle glycogen during heavy resistance exercise in elite power and Olympic weightlifters [J/OL]. *Acta Physiol*, 2021, 231(2): e13561 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.1111/apha.13561>.
- [34] AMENT W, VERKERKE G J. Exercise and fatigue[J]. *Sports Med*, 2009, 39(5): 389–422.
- [35] ALLEN D G, WESTERBLAD H. Role of phosphate and calcium stores in muscle fatigue [J]. *J Physiol*, 2001, 536(Pt3): 657–665.
- [36] VOLEK J S, KRAEMER W J, BUSH J A, et al. Creatine supplementation enhances muscular performance during high – intensity resistance exercise [J]. *J Am Diet Assoc*, 1997, 97(7): 765–770.
- [37] CARR B M, WEBSTER M J, BOYD J C, et al. Sodium bicarbonate supplementation improves hypertrophy – type resistance exercise performance [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2013, 113(3): 743–752.
- [38] SIECK G C, PRAKASH Y S. Fatigue at the neuromuscular junction [M]//GANDEVIA S C, ENOKA R M, MCCOMAS A J, et al. *Advances in experimental medicine and biology*. Boston, MA: Springer US, 1995: 83–100.
- [39] VANDUSSELDORP T A, ESCOBAR K A, JOHNSON K E, et al. Impact of varying dosages of fish oil on recovery and soreness following eccentric exercise [J/OL]. *Nutrients*, 2020, 12(8): 2246 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.3390/nu12082246>.
- [40] KYRIAKIDOU Y, WOOD C, FERRIER C, et al. The effect of *omega* – 3 polyunsaturated fatty acid supplementation on exercise – induced muscle damage [J/OL]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2021, 18(1): 9 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00405-1>.
- [41] VISCONTI L M, COTTER J A, SCHICK E E, et al. Impact of varying doses of *omega* – 3 supplementation on muscle damage and recovery after eccentric resistance exercise [J/OL]. *Metabol Open*, 2021, 12: 100133 [2022 – 10 – 27]. <https://doi.org/10.1016/j.metop.2021.100133>.