

# 南极磷虾油对长跑运动员有氧代谢 及抗疲劳能力的影响

杨思梦<sup>1</sup>, 贺庆<sup>2</sup>, 杨吉涛<sup>3</sup>, 黄小平<sup>2</sup>, 石丽君<sup>1</sup>, 吴迎<sup>1</sup>

(1. 北京体育大学运动人体科学学院, 北京 100084; 2. 艾兰得健康控股有限公司, 上海 200120;

3. 北京欧飞基因科技有限公司, 北京 100083)

**摘要:**为了探讨不同剂量南极磷虾油补充对长跑运动员有氧能力及血液代谢相关指标的影响, 选取 36 名男性长跑运动员为研究对象, 随机分为 4 组, 即安慰剂组(PL 组)、低剂量磷虾油组(L 组)、中剂量磷虾油组(M 组)、高剂量磷虾油组(H 组), 采用双盲随机对照进行实验, 其中安慰剂组每天服用 1 g 大豆油, 低、中、高剂量磷虾油组每天分别服用 1、2、3 g 南极磷虾油, 共干预 4 周。采用 Bruce 方案对受试者进行跑台递增负荷实验, 测定最大摄氧量( $VO_{2max}$ )和无氧阈(AT); 检测运动后 0、3、5、7、9 min 的血乳酸, 计算血乳酸消除速率; 采集肘静脉血, 分析血常规、血液流变相关指标, 以及血清氧化/抗氧化指标及炎症相关因子指标。结果表明: 磷虾油组和安慰剂组  $VO_{2max}$ 、AT 和血乳酸消除速率在干预前后均无显著性差异( $p > 0.05$ ); 与安慰剂组相比, 干预 4 周后磷虾油组血常规各项指标均无显著性差异( $p > 0.05$ ), M 组平均血红蛋白浓度(MCHC)干预后较干预前极显著升高( $p < 0.01$ ), H 组 MCHC 干预后较干预前显著升高( $p < 0.05$ ); 与安慰剂组相比, 干预 4 周后 L 组、M 组和 H 组血浆黏度均显著降低( $p < 0.05$ ), L 组、M 组和 H 组血浆黏度干预后较干预前显著降低( $p < 0.05$ ); 与安慰剂组相比, 干预 4 周进行大强度运动后 24 h, M 组、H 组血清抗氧化相关指标活力显著升高( $p < 0.05$ ); 与安慰剂组相比, 干预 4 周进行大强度运动后 24 h, M 组、H 组血清炎症相关因子表达显著降低( $p < 0.05$ )。综上, 补充南极磷虾油虽不能直接提升运动员有氧能力, 但 4 周南极磷虾油干预可以改善有氧动力链中血液运输这一关键环节, 而 4 周中、高剂量南极磷虾油补充可显著改善机体运动后抗氧化/抗炎能力, 促进疲劳恢复。

**关键词:** 南极磷虾油; 有氧能力; 血液流变性; 抗氧化; 抗炎

中图分类号: TS225.4; R151

文献标识码: A

文章编号: 1003-7969(2022)11-0016-10

## Effects of Antarctic krill oil on aerobic metabolism and anti-fatigue ability of long-distance runners

YANG Simeng<sup>1</sup>, HE Qing<sup>2</sup>, YANG Jitao<sup>3</sup>, HUANG Xiaoping<sup>2</sup>, SHI Lijun<sup>1</sup>, WU Ying<sup>1</sup>

(1. School of Sports Human Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. Aland Health Holding Ltd., Shanghai 200120, China; 3. OmicsFit Ltd., Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different doses of Antarctic krill oil supplementation on aerobic capacity and related indexes of blood metabolism in long-distance runners, 36 male long-

收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2022-04-17

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金资助项目(2019PT004, 2020054); 横向联合项目(20191413, 20210056)

作者简介: 杨思梦(1997), 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) yangsimeng97@foxmail.com。

通信作者: 吴迎, 副教授, 硕士研究生导师, 博士(E-mail) wuying@bsu.edu.cn。

distance runners were selected and randomly divided into four groups: placebo group (PL), low-dose krill oil group (L group), medium-dose krill oil group (M group), high-dose krill oil group (H group). A double-blind randomized controlled experiment was conducted. The PL group received 1 g soybean oil daily, and the L group, M group and H group received 1, 2 g and 3 g Antarctic krill oil daily for a total of 4

weeks. The maximum oxygen uptake ( $VO_{2max}$ ) and anaerobic threshold (AT) were measured by increasing load test using Bruce scheme. Blood lactic acid was measured immediately after exercise at 0, 3, 5, 7, 9 min, and the elimination rate of blood lactic acid was calculated. The cubital venous blood was collected, and blood routine, blood rheology-related indexes, serum oxidation/antioxidation indexes and inflammatory-related factors indexes were analyzed. The results showed that there were no significant differences in  $VO_{2max}$ , AT and elimination rate of blood lactic acid between the krill oil groups and PL group before and after the intervention ( $p > 0.05$ ). Compared with PL group, after 4 weeks of intervention, there was no significant differences in the blood routine indexes in the krill oil groups ( $p > 0.05$ ), and the mean erythrocyte hemoglobin concentration (MCHC) in M group very significantly higher after intervention than that before intervention ( $p < 0.01$ ), the MCHC in H group was significantly higher after intervention than that before intervention ( $p < 0.05$ ). Compared with the PL group, after 4 weeks of intervention, the plasma viscosity in L group, M group and H group significantly decreased ( $p < 0.05$ ), and the plasma viscosity of L, M and H groups significantly lower after intervention than that before intervention ( $p < 0.05$ ). Compared with the PL group, after 4 weeks of intervention and 24 h after intensive exercise, the activity of serum antioxidant indexes in groups M and H significantly increased ( $p < 0.05$ ). Compared with the PL group, after 4 weeks of intervention and 24 h after intensive exercise, the expression of serum inflammatory factors in M group and H group significantly decreased ( $p < 0.05$ ). In conclusion, supplementation with Antarctic krill oil can not directly change the athletes' aerobic capacity, but 4-week Antarctic krill oil intervention can improve the key link of blood transport in the aerobic power chain. In addition, the supplementation of medium- and high-dose of Antarctic krill oil for 4 weeks can significantly improve the body's antioxidant/anti-inflammatory ability after exercise and promote fatigue recovery.

**Key words:** Antarctic krill oil; aerobic capacity; blood rheology; antioxidant; anti-inflammatory

近年来, $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸作为运动补充剂在运动营养领域的应用受到越来越多的关注,其有益特性包括促进运动后损伤恢复,如调节炎症代谢<sup>[1]</sup>,缓解肌肉酸痛<sup>[2]</sup>,提高耐力<sup>[3]</sup>以及促进骨骼肌代谢转换等<sup>[4]</sup>。具有5个双键的二十碳五烯酸(EPA)和具有6个双键的二十二碳六烯酸(DHA)是发挥以上功效的重要 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸。南极磷虾油作为一种新型海洋 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸来源,是EPA、DHA丰富的天然来源,其EPA和DHA主要以 $\omega-3$ 磷脂的形式存在<sup>[5]</sup>,而在其他海洋来源的油脂(如鱼油、海藻油)中,大多数 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸主要以甘油三酯的形式存在。研究表明,磷脂型 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸比甘油三酯型 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸具有更佳吸收率和生物利用率<sup>[6]</sup>,因此南极磷虾油作为运动营养补充剂优势明显。

目前,南极磷虾油已被证实具有多种生物学特性,如降血脂<sup>[7]</sup>、抑制肥胖<sup>[8]</sup>、免疫调节<sup>[9]</sup>等。临床研究证实,南极磷虾油可改善血脂代谢,降低低密度脂蛋白胆固醇和甘油三酯<sup>[10]</sup>,但其对运动员血液的影响尚未可知;南极磷虾油还可改善轻度膝骨关节

炎患者的疼痛<sup>[11]</sup>,但其对大强度运动后炎症恢复的影响亦未明了。研究认为,南极磷虾油对运动能力有促进作用,其含有的磷脂(磷脂酰胆碱、磷脂酰丝氨酸和磷脂酸)具有合成代谢特性,可以参与维持肌肉功能,有助于长时间大强度运动中最佳运动表现的维持<sup>[12]</sup>。此外,南极磷虾油中含有的虾青素是一种抗氧化剂,可抑制大强度运动后的氧化应激<sup>[13]</sup>,但并未有研究直接报道南极磷虾油具有该作用。因此,本研究通过探讨不同剂量南极磷虾油补充对长跑运动员有氧能力及血液代谢相关指标的影响,以期揭示南极磷虾油在运动营养领域潜在的应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

南极磷虾油胶囊,由艾兰得健康控股有限公司提供(供应商,Aker阿克海洋生物;产品名称,SUPERBA SC40TM;批号,12959A)。每500 mg南极磷虾油胶囊含有60 mg EPA、35 mg DHA和431.5  $\mu$ g虾青素。南极磷虾油使用剂量在推荐剂量范围内<sup>[10]</sup>。

超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒、总抗氧化能力

(T-AOC)试剂盒、丙二醛(MDA)试剂盒,南京建成公司;谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)试剂盒,碧云天公司;白细胞介素2(IL-2)试剂盒、白细胞介素6(IL-6)试剂盒、肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )试剂盒,江莱生物公司。

### 1.1.2 实验对象

受试者为北京体育大学36名男性长跑运动员,年

表1 受试者基本情况

组别	年龄(岁)	身高/cm	体质量/kg	收缩压/kPa	舒张压/kPa
PL组	20.8 ± 2.0	175.35 ± 6.84	67.42 ± 5.81	15.90 ± 1.90	8.86 ± 0.69
L组	20.0 ± 1.4	178.13 ± 5.70	71.02 ± 5.47	15.94 ± 0.97	8.83 ± 0.62
M组	19.8 ± 1.4	176.64 ± 4.42	69.35 ± 8.60	16.14 ± 0.79	9.14 ± 0.84
H组	20.3 ± 2.5	178.40 ± 3.04	72.52 ± 5.09	15.61 ± 0.91	8.90 ± 0.82

### 1.1.3 仪器与设备

MetaLyzer 3B-R2 气体代谢分析仪, Cortex 公司; Pulsar 跑台(h/p/cosmos); Lactate-Scout 便携式血乳酸分析仪, EKF 公司; KX-21/21N 全自动三分类血球分析仪, Sysmex 公司; LBY-N6C 全自动血流变仪, 普利生公司; Xmark 酶标仪, Bio-Rad 公司。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 实验设计

在初步的问卷筛选分组后,参加该研究的受试者需要参与两次测试,第一次测试为服用安慰剂或磷虾油前的基础测量,即取受试者肘静脉血,3 d 后进行最大摄氧量( $VO_{2max}$ )和无氧阈(AT)测试,并在运动后0、3、5、7、9 min 取指尖血测血乳酸,随后 L 组、M 组和 H 组每天分别摄入1、2、3 g 南极磷虾油,PL 组每天摄入1 g 大豆油,干预4周后,进行第二次测试,再次检测有氧能力相关指标,并在有氧能力测试后24 h 再次取肘静脉血进行相关测试。整个实验过程中受试者不改变饮食习惯,且未服用任何营养补充剂(包括鱼油)及药物。实验设计概述见图1。

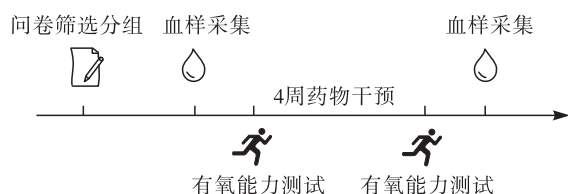


图1 实验设计概述

### 1.2.2 最大摄氧量( $VO_{2max}$ )和无氧阈(AT)测试

采用 Bruce 递增负荷跑台运动方案测试  $VO_{2max}$  和 AT,测试负荷方案见表2。在进行正式实验前进行充分的预实验,使测试方案能够满足测试需求。受试者在正式测试前一天无大强度运动。测试过程中记录受试者的心率、呼吸商、运动强度和运动自觉量表(RPE),以确保受试者安全测试且达到  $VO_{2max}$ 。

龄为18~24岁,训练年限为5~10年。受试者随机分为4组:安慰剂组(PL组)、低剂量磷虾油组(L组)、中剂量磷虾油组(M组)、高剂量磷虾油组(H组)。受试者基本情况见表1。所有受试者均无吸烟史、高血压、海鲜过敏史、心血管及其他代谢性疾病。所有参与者均签署了实验知情同意书,该研究得到了北京体育大学人类伦理审查委员会的批准(编号,2020161H)。

运动过程中满足以下4个条件中的任意3条时,则为达到  $VO_{2max}$ ,即刻停止运动:①随着运动负荷的增加,摄氧量平台出现或摄氧量下降;②随着运动负荷的增加,心率不再继续增加;③呼吸商达到或接近1.15;④RPE已达到力竭,且无力保持当前运动负荷。

表2 Bruce 运动方案负荷标准

负荷等级	时间/min	速度/(km/h)	坡度/%
1	3	2.7	10
2	3	4.0	12
3	3	5.4	14
4	3	6.7	16
5	3	8.0	18
6	3	8.8	20
7	3	9.6	22

### 1.2.3 血乳酸消除速率测试

在  $VO_{2max}$  测试结束后0、3、5、7、9 min 采集受试者指尖血并通过便携式血乳酸分析仪对血样进行分析。指尖血采集过程中需用医疗棉签将第1滴血抹去,在整个采血过程中受试者采取坐姿方式,不允许有慢走、拉伸等动作促进恢复。按下式计算血乳酸消除速率<sup>[14]</sup>。

$$\nu = \frac{L_{max} - L_9}{t_9 - t_{max}} \quad (1)$$

式中: $\nu$ 为血乳酸消除速率; $L_{max}$ 为运动后血乳酸最大值; $L_9$ 为运动后9 min的血乳酸值; $t_{max}$ 为血乳酸最大值的对应时刻; $t_9$ 为运动后第9 min。

### 1.2.4 血液采集及血液相关指标测试

受试者于清晨取肘静脉血5 mL,分别置于含有EDTA-K2抗凝剂的紫色采血管、含有肝素锂抗凝剂绿色采血管和含有促凝剂的黄色采血管中,其中紫色采血管用于血常规测试,绿色采血管用于血液流变学测试,黄色采血管用于分离血清(血清保存于

-80℃)。血常规和血液流变学结果均于采血后4 h内测得,血清抗氧化/抗炎水平通过相应试剂盒测得。

### 1.2.5 数据处理

用SPSS 25.0软件进行数据处理和分析,全部数据采用“平均值±标准差”的形式表示。多组间比较采用单因素方差分析,两两对比采用LSD-t检验。组内干预前后比较采用配对样本t检验。 $p < 0.05$ 为具有显著性差异。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结果

#### 2.1.1 干预前后有氧能力测试结果

不同剂量南极磷虾油干预对受试者有氧能力的影响分别见表3~表5。

表3 不同剂量南极磷虾油干预对 $VO_{2max}$ 的影响

组别	干预前后	相对摄氧量/ (mL/(min·kg))	绝对摄氧量/ (L/min)
PL组	干预前	55.00±6.04	3.50±0.51
	干预后	53.20±5.54	3.36±0.45
L组	干预前	55.75±8.88	3.72±0.77
	干预后	54.76±5.66	3.85±0.34
M组	干预前	55.23±7.97	3.79±0.63
	干预后	54.23±4.94	3.71±0.40
H组	干预前	54.83±2.04	3.84±0.58
	干预后	52.83±2.14	3.87±0.44

表6 不同剂量南极磷虾油干预对血常规的影响

组别	干预前后	RBC/( $10^{12}$ /L)	Hb/(g/L)	MCH/(pg)	MCHC/(g/L)
PL组	干预前	5.10±0.37	155.33±8.82	30.50±1.54	337.60±6.19
	干预后	5.02±0.45	151.83±10.78	30.35±1.35	341.80±7.33
L组	干预前	5.17±0.32	157.25±11.17	30.40±1.08	342.25±3.81
	干预后	5.15±0.37	156.13±13.66	30.28±0.97	344.75±6.04
M组	干预前	5.05±0.50	157.67±13.23	31.38±0.99	341.67±3.04
	干预后	4.87±0.36	153.78±10.07	31.59±0.84	347.78±5.38 <sup>##</sup>
H组	干预前	5.14±0.36	157.70±9.27	30.70±1.07	341.90±3.99
	干预后	5.06±0.38	154.60±9.51	30.62±1.04	344.50±6.24 <sup>#</sup>

注:#表示同组间干预前后有显著性差异( $p < 0.05$ ),##表示同组间干预前后有极显著性差异( $p < 0.01$ )

#### 2.1.3 干预前后血液流变性指标测试结果

本研究检测了南极磷虾油或安慰剂补充4周后宏观血液流变性指标和红细胞流变性指标的变化,结果分别见表7和图2。由表7可见:受试者的全血高切黏度、全血中切黏度、全血低切黏度、血浆黏度、红细胞压积在干预前比较均无显著性

表4 不同剂量南极磷虾油干预对AT的影响 L/min

干预前后	PL组	L组	M组	H组
干预前	2.16±0.40	2.56±0.49	2.46±0.62	2.62±0.58
干预后	2.10±0.41	2.43±0.37	2.55±0.56	2.68±0.55

表5 不同剂量南极磷虾油干预对血乳酸消除速率的影响 mmol/(L/min)

干预前后	PL组	L组	M组	H组
干预前	0.55±0.24	0.39±0.19	0.45±0.26	0.45±0.20
干预后	0.54±0.24	0.43±0.20	0.46±0.15	0.48±0.17

由表3~表5可见,所有受试者 $VO_{2max}$ 、AT和血乳酸消除速率在服用南极磷虾油或安慰剂前后均无显著差异。

#### 2.1.2 干预前后血常规测试结果

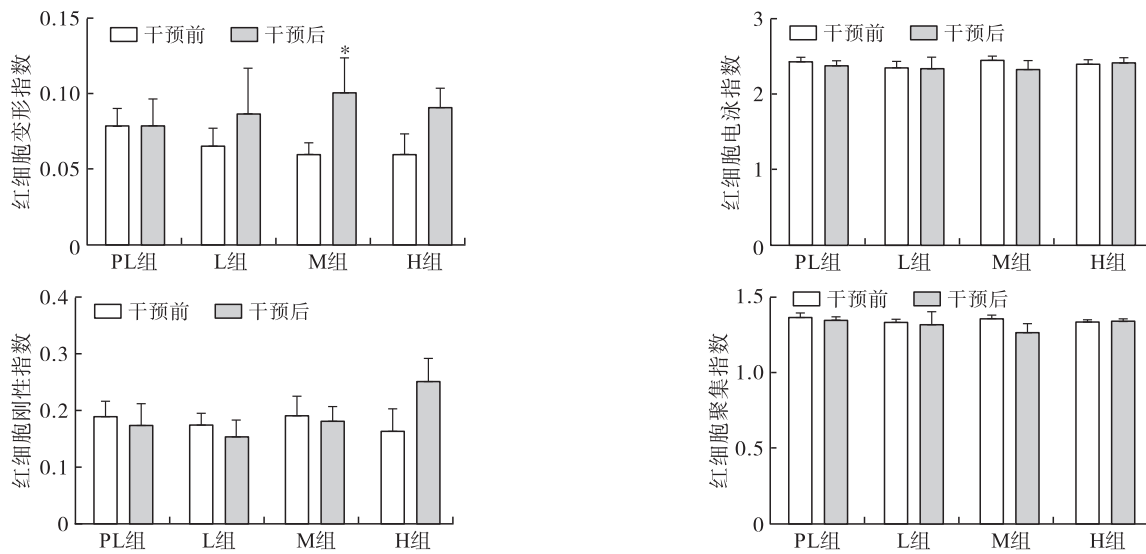
本研究检测了南极磷虾油或安慰剂补充4周后清晨空腹血常规包括红细胞数(RBC)、血红蛋白量(Hb)、红细胞平均血红蛋白值(MCH)、红细胞平均血红蛋白浓度(MCHC)的变化,结果见表6。由表6可见:所有受试者的RBC、Hb、MCH和MCHC在干预前均无显著性差异( $p > 0.05$ );干预4周后,与安慰剂组相比,南极磷虾油组血常规各项指标差异均无统计学意义( $p > 0.05$ ),M组的MCHC干预后较干预前极显著升高( $p < 0.01$ ),H组的MCHC干预后较干预前显著升高( $p < 0.05$ )。

差异( $p > 0.05$ );与安慰剂组相比,干预4周后L组、M组和H组的血浆黏度均显著降低( $p < 0.05$ );干预4周后,L组、M组和H组血浆黏度较干预前均显著降低( $p < 0.05$ )。由图2可见,干预4周后,M组红细胞变形指数较干预前显著升高( $p < 0.05$ )。

表7 不同剂量南极磷虾油干预对宏观血液流变性的影响

组别	干预前后	全血黏度/(mPa·s)			血浆黏度/(mPa·s)	红细胞压积/%
		低切(10 s <sup>-1</sup> )	中切(60 s <sup>-1</sup> )	高切(150 s <sup>-1</sup> )		
PL组	干预前	9.29 ± 0.63	7.93 ± 0.49	6.76 ± 0.45	6.09 ± 0.50	46.27 ± 2.22
	干预后	9.20 ± 0.53	7.92 ± 0.46	6.70 ± 0.32	6.19 ± 0.62	44.60 ± 2.76
L组	干预前	9.24 ± 0.24	7.95 ± 0.46	6.79 ± 0.30	6.23 ± 0.47	45.94 ± 3.12
	干预后	8.80 ± 0.55	7.59 ± 0.98	6.22 ± 0.65	5.60 ± 0.37 <sup>*#</sup>	45.29 ± 3.97
M组	干预前	9.54 ± 0.63	8.02 ± 0.22	6.86 ± 0.25	6.24 ± 0.38	46.14 ± 3.84
	干预后	8.77 ± 0.63	7.59 ± 0.61	6.37 ± 0.47	5.75 ± 0.25 <sup>*#</sup>	43.88 ± 2.95
H组	干预前	9.40 ± 0.67	8.07 ± 0.50	6.90 ± 0.52	6.18 ± 0.65	46.55 ± 2.34
	干预后	8.95 ± 0.32	7.73 ± 0.29	6.61 ± 0.29	5.65 ± 0.35 <sup>*#</sup>	44.84 ± 2.26

注: \*表示与PL组相比有显著性差异( $p < 0.05$ ); #表示同组间干预前后有显著性差异( $p < 0.05$ )



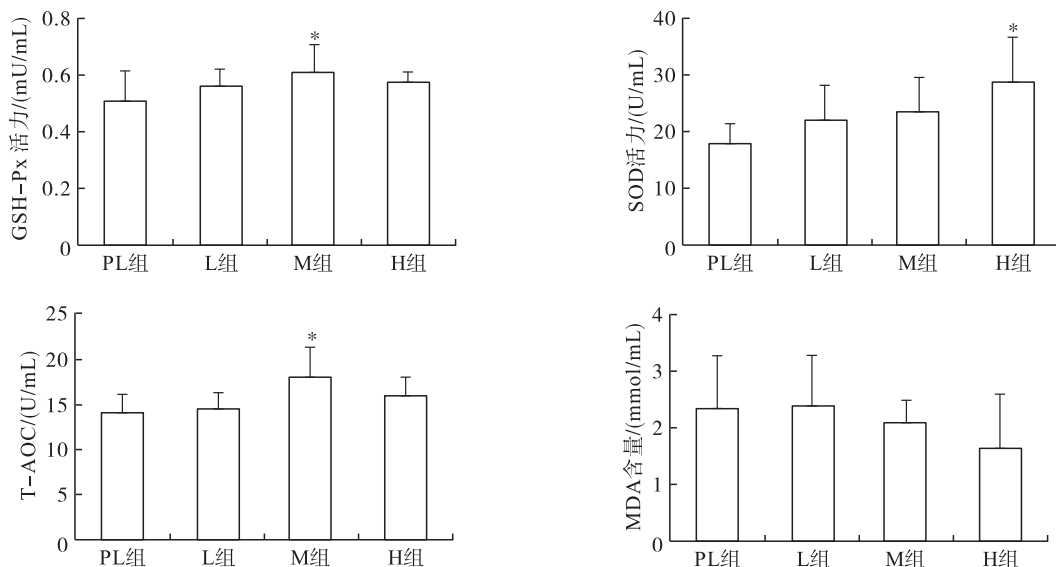
注: \*表示同组间干预前后有显著性差异( $p < 0.05$ )

图2 不同剂量南极磷虾油干预对红细胞流变性的影响

#### 2.1.4 干预后大强度运动后 24 h 各组抗氧化/抗炎指标测试结果

本研究检测了南极磷虾油或安慰剂补充 4 周

后大强度运动后 24 h 血清 GSH-Px 活力、SOD 活力、T-AOC 及 MDA、IL-2、IL-6、TNF- $\alpha$  含量的变化,结果见图 3~图 4。



注: \*表示与PL组相比具有显著性差异( $p < 0.05$ )。下同

图3 不同剂量南极磷虾油干预对大强度运动后 24 h 机体氧化、抗氧化能力的影响

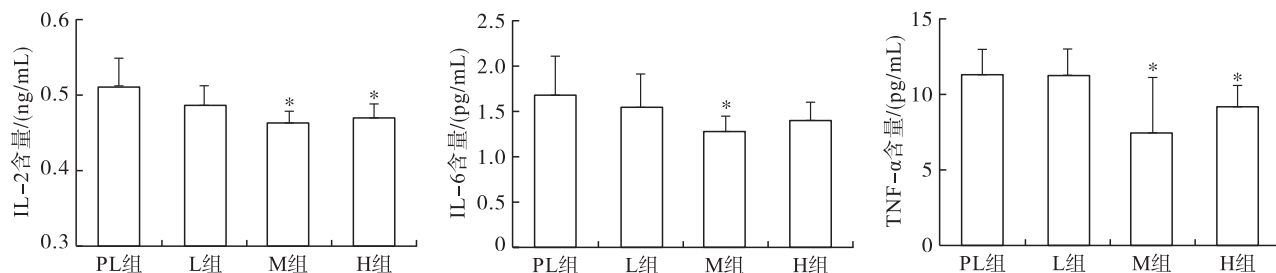


图4 不同剂量南极磷虾油干预对大强度运动后24 h机体炎症因子的影响

由图3可见,与安慰剂组相比,M组GSH-Px活力、T-AOC显著升高( $p < 0.05$ ),H组SOD活力显著升高( $p < 0.05$ )。由图4可见,与安慰剂组相比,M组IL-2、IL-6、TNF- $\alpha$ 含量均显著降低( $p < 0.05$ ),H组IL-2和TNF- $\alpha$ 含量显著降低( $p < 0.05$ )。

## 2.2 讨论

### 2.2.1 南极磷虾油补充与有氧能力

耐力训练是提高运动员有氧能力的重要途径,可引起运动员呼吸系统、心血管系统和骨骼肌系统发生适应性变化<sup>[15]</sup>。除了训练因素,科学、合理的营养干预也在耐力运动员代谢功能改善中发挥了积极作用。膳食补充 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸可能有助于提高运动员有氧能力,但尚未达成共识。最新研究证实,磷脂型DHA、EPA在提升机体有氧能力方面具有优势。磷脂型DHA、EPA可促进骨骼肌糖代谢相关蛋白葡萄糖转运蛋白4(glucose transporter type 4, GLUT4)、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(Glucose-6-phosphate dehydrogenase, G6PDH)基因和脂肪氧化分解关键酶肉碱棕榈酰转移酶I(carnitine palmitoyl transferase I, CPT1)、酰基辅酶A氧化酶(acyl-coenzyme A oxidase, Acox)基因表达增加,还可通过促进线粒体呼吸链复合物I、II、III、IV和三羧酸循环相关酶mRNA的表达,提升骨骼肌产能速率,进而提高小鼠力竭游泳和跑步运动成绩<sup>[16]</sup>。Zebrowska等<sup>[17]</sup>研究发现, $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸与 $VO_{2max}$ 相关,补充 $\omega-3$ (1.1 g/d)3周可增加自行车运动员的 $VO_{2max}$ ,但并非所有补充 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸的研究都观察到这一变化<sup>[18]</sup>。Da Boit等<sup>[19]</sup>研究发现,补充磷虾油(2 g/d)6周,并不能改变 $VO_{2max}$ 和运动时的心率。本研究中,补充磷虾油4周(1、2、3 g/d)均不足以改变男性长跑运动员 $VO_{2max}$ ,这可能与长跑运动员 $VO_{2max}$ 已经处于较高水平有关,抑或南极磷虾油和耐力训练共同干预可能效果更好,还需后续研究加以证实。

无氧阈是人在递增负荷运动中机体由有氧代谢供能向无氧代谢供能转折的临界点,相比 $VO_{2max}$ 等

耐力评价指标,无氧阈与代谢水平联系更为紧密,与训练程度相关性更高。Ávila-Gandía等<sup>[20]</sup>研究发现,补充再酯化DHA(975 mg/d)30 d可以提高男性竞技自行车运动员无氧阈水平。DHA和EPA是神经细胞膜磷脂的重要组成部分,是神经通路的基础,补充DHA和EPA可改善神经传递性<sup>[21]</sup>,进而提升无氧阈。但本研究中并未观察到运动员无氧阈的提升。

运动后血乳酸消除速率可以反映机体的有氧代谢能力,消除速率越快,表示机体有氧代谢能力越强。研究表明,口服EPA和DHA可通过促进氧气供应来增强机体耐力<sup>[22-23]</sup>。Morishima等<sup>[24]</sup>认为,补充 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸(每日补充富含EPA的鱼油,含有600 mg EPA和260 mg DHA)8周并不能改变健康男性大强度耐力运动后血乳酸含量,有必要进一步研究探讨补充剂量或干预时间<sup>[25]</sup>,以明确补充南极磷虾油对血乳酸的影响。本研究通过 $VO_{2max}$ 、无氧阈和运动后血乳酸消除速率的研究证实,补充南极磷虾油不能直接提升运动员有氧能力。

### 2.2.2 南极磷虾油补充与血液代谢

本研究发现,补充南极磷虾油可改善长跑运动员的血浆黏度,这是提升耐力运动员代谢能力的重要体现。服用 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸一方面可能通过降低循环血脂浓度<sup>[26]</sup>,改善血液黏度;另一方面, $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸还可能通过改变红细胞膜磷脂成分改善红细胞功能<sup>[27]</sup>,包括改善红细胞形态和红细胞变形能力等<sup>[28]</sup>,调节血液流变。Ramprasath等<sup>[29]</sup>将24名健康受试者随机分为磷虾油组和鱼油组,磷虾油组和鱼油组补充4周等剂量EPA、DHA(600 mg/d),结果发现,与鱼油组相比,磷虾油组血浆中EPA、DHA水平,血浆总 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸水平,以及红细胞中EPA、DHA浓度之和( $\omega-3$ 指数)升高;Ramprasath等<sup>[30]</sup>的另一项研究发现,与低磷脂磷虾油相比,补充高磷脂磷虾油可增加红细胞中EPA、DHA总量。南极磷虾油中磷脂成分使 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸改善红细胞膜磷脂成分和血浆脂质成分的效率提高,对改善红细胞功能和血液黏度



有积极的作用。运动员血液流变性特征与运动能力密切相关,优秀运动员血液流变性的特点为安静时血液黏度较普通人低<sup>[31]</sup>,血液黏度的增加会使机体循环阻力增加,进而增加心脏负荷,影响机体的运动能力以及疲劳程度。本研究中,南极磷虾油干预4周改善了长跑运动员的血浆黏度,这可能与南极磷虾油改善血液血脂成分和红细胞膜脂质流动性有关<sup>[32]</sup>,而这种改善可促进红细胞通过肌肉组织和毛细血管加快微循环,这将提升骨骼肌的氧气输送能力,继而改善运动能力<sup>[33]</sup>。

红细胞变形能力与机体的有氧能力密切相关<sup>[31]</sup>,红细胞膜成分、细胞膜骨架蛋白结构与功能以及细胞膜各组分之间的相互作用都会影响红细胞变形能力。Berge 等<sup>[34]</sup>研究认为,补充南极磷虾油28 d,可增加血浆及红细胞中 $\omega-3$ 与 $\omega-6$ 多不饱和脂肪酸的比值,增加红细胞膜双键指数以及抗氧化/抗炎指数,进而改变红细胞流动性,影响红细胞变形能力<sup>[35]</sup>。本研究虽没有发现补充南极磷虾油对红细胞流变性有显著性改善,但存在变化趋势,即随着干预时间的延长可能具有提高红细胞流变性的功效。

### 2.2.3 南极磷虾油补充与大强度运动后机体抗氧化能力

机体运动后抗氧化能力是影响运动疲劳恢复的重要因素。大量研究表明,抗氧化能力适度提升可促进人体运动后恢复。Berge 等<sup>[34]</sup>对17名健康志愿者进行为期28 d的南极磷虾油补充(832.5 mg/d EPA + DHA),结果发现,南极磷虾油可显著增加血浆T-AOC;南极磷虾油还可改善小鼠因脂多糖诱导的氧化应激,表现为MDA和活性氧自由基(ROS)水平的降低<sup>[36]</sup>;南极磷虾油可通过减少细胞凋亡反应和氧化损伤来减轻甲基苯丙胺诱导的神经毒性,表现为SOD活力增加,MDA、一氧化氮(NO)和ROS产生减少<sup>[37]</sup>。Skarpańska-Stejnborn 等<sup>[38]</sup>研究发现,补充南极磷虾油6周(1 g/d)可明显改善赛艇运动员大强度运动后24 h 硫代巴比妥酸反应物(TBARS)水平,说明补充南极磷虾油可改善大强度运动引起的氧化应激。

但本研究中,补充低剂量南极磷虾油4周并未发现其改善大强度运动后恢复期间机体抗氧化能力,可能由于低剂量磷虾油所含虾青素较少。虾青素改善大强度运动后机体抗氧化能力已被证实<sup>[39]</sup>,其通过与氧化还原敏感转录因子核因子E2相关因子2(nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2)

相互作用,间接调节内源性抗氧化防御系统<sup>[40]</sup>。

本研究发现,补充中、高剂量南极磷虾油4周,可改善长跑运动员大强度运动后24 h的氧化应激水平,表现为血清抗氧化酶GSH-Px、SOD活力增加,T-AOC增加。从改善运动后氧化应激和促进恢复的角度考虑,中、高剂量磷虾油补充效果更好。Ursoniu 等<sup>[10]</sup>研究发现,补充5周4 g/d的南极磷虾油,可有效提高铁人三项运动员赛前和赛后游离胆碱浓度,改善高强度耐力运动后肌肉损伤和疲劳。本研究进一步证实了补充南极磷虾油可提高大强度运动后恢复期间抗氧化酶活性,未来研究还可继续探讨更高剂量南极磷虾油对肌肉损伤恢复的影响。

### 2.2.4 南极磷虾油补充与大强度运动后机体炎性水平

机体进行大强度运动后常出现运动后免疫抑制现象。本研究发现,4周中、高剂量南极磷虾油的补充可改善长跑运动员大强度运动后24 h免疫抑制水平,表现为血清炎症因子IL-2、IL-6和TNF- $\alpha$ 含量减少,机体炎性水平降低,这对于运动性疲劳恢复十分有利。Laslett 等<sup>[41]</sup>对260名膝关节炎患者进行6个月的南极磷虾油补充(2 g/d),结果发现,南极磷虾油缓解了患者的疼痛和全身炎症;磷虾油可降低角叉菜胶诱导的炎性疼痛小鼠IL-6、TNF- $\alpha$ 的表达<sup>[42]</sup>;磷虾油还可通过抑制Th1和Th17促炎细胞因子的表达<sup>[43]</sup>,改善结肠炎模型小鼠炎症反应。Da Boit 等<sup>[19]</sup>研究发现,补充6周2 g/d南极磷虾油,能明显增加健康青年人群力竭运动后3 h血浆外周血单个核细胞IL-2的产生和NK细胞的活性,而对安静状态下的免疫功能没有影响,说明补充南极磷虾油可促进机体大强度运动后免疫抑制恢复。磷虾油可能通过调节氧化物酶体增殖物激活受体- $\gamma$ (PPAR- $\gamma$ )、转录因子核因子- $\kappa$ B(NF- $\kappa$ B)和Nod样受体(NLR)等信号通路<sup>[44]</sup>,减少炎症因子如IL-2、IL-6和TNF- $\alpha$ 的产生。此外,磷脂型DHA较甘油三酯型DHA在减少炎症因子IL-1 $\beta$ 、IL-10方面有更显著的作用<sup>[45]</sup>。

综合考虑南极磷虾油的干预效果,低、中、高剂量南极磷虾油的补充均可降低血液黏度,而中、高剂量南极磷虾油的补充亦可改善大强度运动后机体抗氧化能力,缓解大强度运动后免疫抑制,从而促进机体恢复。因此,在运动实践中建议采用中、高剂量南极磷虾油进行补充干预。

## 3 结论

补充南极磷虾油虽不能直接提升运动员有氧能力,但4周南极磷虾油的干预可以改善有氧动力链

中血液运输这一关键环节,而4周中、高剂量南极磷虾油的干预可显著改善机体运动后抗氧化/抗炎能力,促进疲劳恢复。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] PHILPOTT J D, WITARD O C, GALLOWAY S. Applications of *omega* - 3 polyunsaturated fatty acid supplementation for sport performance [J]. *Res Sports Med*, 2019, 27(2): 219 - 237.
- [4] HESSVIK N P, BAKKE S S, FREDRIKSSON K, et al. Metabolic switching of human myotubes is improved by *n* - 3 fatty acids[J]. *J Lipid Res*, 2010, 51(8): 2090 - 2104.
- [5] XIE D, JIN J, SUN J, et al. Comparison of solvents for extraction of krill oil from krill meal: lipid yield, phospholipids content, fatty acids composition and minor components[J]. *Food Chem*, 2017, 233: 434 - 441.
- [6] SUNG H H, SINCLAIR A J, LEWANDOWSKI P A, et al. Postprandial long - chain *n* - 3 polyunsaturated fatty acid response to krill oil and fish oil consumption in healthy women; a randomised controlled, single - dose, crossover study[J]. *Asia Pac J Clin Nutr*, 2018, 27(1): 148 - 157.
- [7] KIM M G, YANG I, LEE H S, et al. Lipid - modifying effects of krill oil vs fish oil: a network meta - analysis [J]. *Nutr Rev*, 2020, 78(9): 699 - 708.
- [8] KROUPOVA P, VAN SCHOTHORST E M, KEIJER J, et al. *Omega* - 3 phospholipids from krill oil enhance intestinal fatty acid oxidation more effectively than *omega* - 3 triacylglycerols in high - fat diet - fed obese mice [J/OL]. *Nutrients*, 2020, 12(7): 2037 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.3390/nu12072037>.
- [9] KUMAR N G, CONTAIFER D, MADURANTAKAM P, et al. Dietary bioactive fatty acids as modulators of immune function: implications on human health[J/OL]. *Nutrients*, 2019, 11(12): 2974 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.3390/nu11122974>.
- [10] URSONIU S, SAHEBKAR A, SERBAN M C, et al. Lipid - modifying effects of krill oil in humans: systematic review and meta - analysis of randomized controlled trials[J]. *Nutr Rev*, 2017, 75(5): 361 - 373.
- [11] SUZUKI Y, FUKUSHIMA M, SAKURABA K, et al. Krill oil improves mild knee joint pain: a randomized control trial [J/OL]. *PLoS One*, 2016, 11(10): e162769 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162769>.
- [12] 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 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00133>.
- [13] FLEISCHMANN C, HOROWITZ M, YANOVICH R, et al. Asthaxanthin improves aerobic exercise recovery without affecting heat tolerance in humans[J/OL]. *Front Sports Act Liv*, 2019, 1: 17 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.3389/fspor.2019.00017>.
- [14] 周兴生, 林文骏, 何晓龙, 等. 男子足球运动员 YO - YO 测试与运动后血乳酸、心率变化相关性的分析 [J]. *广州体育学院学报*, 2017, 37(4): 85 - 89.
- [15] KAPILEVICH L V, ZAKHAROVA A N, KABACHKOVA A V, et al. Dynamic and static exercises differentially affect plasma cytokine content in elite endurance - and strength - trained athletes and untrained volunteers [J/OL]. *Front Physiol*, 2017, 8: 35 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00035>.
- [16] WANG C C, DING L, ZHANG L Y, et al. A pilot study on the effects of DHA/EPA - enriched phospholipids on aerobic and anaerobic exercises in mice[J]. *Food Funct*, 2020, 11: 1441 - 1454.
- [17] ŻEBROWSKA A, MIZIA - STEE K, MIZZIA M, et al. *Omega* - 3 fatty acids supplementation improves endothelial function and maximal oxygen uptake in endurance - trained athletes[J]. *Eur J Sport Sci*, 2015, 15(4): 305 - 314.
- [18] KAWABATA F, NEYA M, HAMAZAKU K, et al. Supple - mentation with eicosapentaenoic acid - rich fish oil improves exercise economy and reduces perceived exertion during submaximal steady - state exercise in normal healthy untrained men [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2014, 78(12): 2081 - 2088.
- [19] 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): e139174 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139174>.
- [20] ÁVILA - GANDÍA V, TORREGROSA - GARCÍA A, LUQUE - RUBIA A J, et al. Re - esterified DHA improves ventilatory threshold 2 in competitive amateur cyclists[J/OL]. *J Int Soc Sports Nutr*, 2020, 17(1): 51 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00379-0>.



- [21] PATTEN G S, ABEYWARDENA M Y, MCMURCHIE E J, et al. Dietary fish oil increases acetylcholine – and eicosanoid – induced contractility of isolated rat ileum [J]. *J Nutr*, 2002, 132(9): 2506 – 2513.
- [22] CLARK C M, MONAHAN K D, DREW R C. *Omega* – 3 polyunsaturated fatty acid supplementation attenuates blood pressure increase at onset of isometric handgrip exercise in healthy young and older humans [J/OL]. *Physiol Rep*, 2016, 4(14): e12875 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/10.14814/phy2.12875>.
- [23] LOGAN S L, SPRIET L L. *Omega* – 3 fatty acid supplementation for 12 weeks increases resting and exercise metabolic rate in healthy community – dwelling older females [J/OL]. *PLoS One*, 2015, 10 ( 12 ): e144828 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144828>.
- [24] MORISHIMA T, TSUCHIYA Y, UEDA H, et al. Muscular endurance and muscle metabolic responses to 8 weeks of *omega* – 3 polyunsaturated fatty acids supplementation [J/OL]. *Physiol Rep*, 2020, 8 ( 16 ): e14546 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/10.14814/phy2.14546>.
- [25] OCHI E, YANAGINOTO K, MORISHIMA T, et al. Eicosapentaenoic acid – rich fish oil supplementation inhibits the decrease in concentric work output and muscle swelling of the elbow flexors [J]. *J Am Coll Nutr*, 2019, 38(2): 125 – 131.
- [26] BERGE K, MUSA – VELOSO K, HARWOOD M, et al. Krill oil supplementation lowers serum triglycerides without increasing low – density lipoprotein cholesterol in adults with borderline high or high triglyceride levels [J]. *Nutr Res*, 2014, 34(2): 126 – 133.
- [27] BAKKER N, SCHOORL M, STOUTJESDIJK E, et al. Erythrocyte deformability and aggregability in patients undergoing colon cancer surgery and effects of two infusions with *omega* – 3 fatty acids [J]. *Clin Hemorheol Microcirc*, 2020, 74(3): 287 – 297.
- [28] AUGER C, SAID A, NGUYEN P N, et al. Potential of food and natural products to promote endothelial and vascular health [J]. *J Cardiovasc Pharmacol*, 2016, 68 ( 1 ): 11 – 18.
- [29] 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 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-12-178>.
- [30] RAMPRASATH V R, EYAL I, ZCHUT S, et al. Supplementation of krill oil with high phospholipid content increases sum of EPA and DHA in erythrocytes compared with low phospholipid krill oil [J/OL]. *Lipids Health Dis*, 2015, 14: 142 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/10.1186/s12944-015-0142-y>.
- [31] NADER E, MONEDERO D, ROBERT M, et al. Impact of a 10 km running trial on eryptosis, red blood cell rheology, and electrophysiology in endurance trained athletes; a pilot study [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2020, 120(1): 255 – 266.
- [32] WALKER C G, WEST A L, BROWNING L M, et al. The pattern of fatty acids displaced by EPA and DHA following 12 months supplementation varies between blood cell and plasma fractions [J]. *Nutrients*, 2015, 7(8): 6281 – 6293.
- [33] ANDERSSON A, NÄLSÉN C, TENGBLAD S, et al. Fatty acid composition of skeletal muscle reflects dietary fat composition in humans [J]. *Am J Clin Nutr*, 2002, 76 ( 6 ): 1222 – 1229.
- [34] BERGE R K, RAMSVIK M S, BOHOV P, et al. Krill oil reduces plasma triacylglycerol level and improves related lipoprotein particle concentration, fatty acid composition and redox status in healthy young adults; a pilot study [J/OL]. *Lipids Health Dis*, 2015, 14: 163 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/10.1186/s12944-015-0162-7>.
- [35] MIHALJ M, STUPIN A, KOLOBARIĆ N, et al. Leukocyte activation and antioxidative defense are interrelated and moderately modified by *n* – 3 polyunsaturated fatty acid – enriched eggs consumption; double – blind controlled randomized clinical study [J/OL]. *Nutrients*, 2020, 12(10): 3122 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/110.3390/nu12103122>.
- [36] CHOI J Y, JANG J S, SON D J, et al. Antarctic krill oil diet protects against lipopolysaccharide – induced oxidative stress, neuroinflammation and cognitive impairment [J/OL]. *Int J Mol Sci*, 2017, 18(12): 2554 [2021 – 08 – 19]. <https://doi.org/110.3390/ijms18122554>.
- [37] XIONG Q, RU Q, TIAN X, et al. Krill oil protects PC12 cells against methamphetamine – induced neurotoxicity by inhibiting apoptotic response and oxidative stress [J]. *Nutr Res*, 2018, 58: 84 – 94.
- [38] SKARPAŃSKA – STEJNBORN A, PILACZYŃSKA – SZCZESŃIAK Ł, 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.
- [39] 郭新明, 吴丽君, 赵静, 等. 虾青素补充对人体急性高强度运动前后代谢的影响 [J]. *食品科学*, 2021, 42 ( 17 ): 177 – 185.

- [7] XIAO L, LEE J Y, ZHANG G, et al. HS - SPME GC/MS characterization of volatiles in raw and dry - roasted almonds (*Prunus dulcis*) [J]. Food Chem, 2014, 151: 31 - 39.
- [8] 曹虹虹, 严维花, 郭爽, 等. 基于多成分测定及指纹图谱评价不同产地栀子质量[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(18): 4026 - 4033.
- [9] CHENG H, CHEN J L, CHEN S G, et al. Sensory evaluation, physicochemical properties and aroma - active profiles in a diverse collection of Chinese bayberry (*Myrica rubra*) cultivars [J]. Food Chem, 2016, 212: 374 - 385.
- [10] 孙亚娟, 王进英, 陈选, 等. 杏仁油挥发性成分指纹图谱的构建及掺伪定量检测方法研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(1): 296 - 299.
- [11] 刘晔, 葛丽琴, 王远兴. 3个产地不同等级庐山云雾茶挥发性成分主成分分析[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 206 - 214.
- [12] 周拥军, 郜海燕, 房祥军, 等. SPME - GC - MS分离鉴定山核桃的挥发性风味物质[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(6): 115 - 119.
- [13] 石天磊, 李晓颖, 左波, 等. 8份核桃资源坚果主要香气物质分析[J]. 果树学报, 2020, 37(7): 1016 - 1024.
- [14] FRANKEL E N. Lipid oxidation [J]. Prog Lipid Res, 2005, 19(1): 1 - 22.
- [15] 文志勇, 孙宝国, 梁梦兰, 等. 脂质氧化产生香味物质的影响[J]. 中国油脂, 2004, 29(9): 41 - 44.
- [16] 刘晓毅, 薛文通. 烘烤对核桃仁风味及其油脂氧化的影响[J]. 中国油脂, 2004, 29(4): 50 - 52.
- [17] 赵泽伟, 丁筑红, 顾苑婷, 等. 基于 SPME - GC - MS和电子鼻分析薏苡仁油加速氧化过程挥发性成分变化[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 220 - 226.
- [18] 周晔, 樊玮, 张俊佩, 等. 压榨和精炼核桃油挥发性成分的比较及其电子鼻判别[J]. 中国油脂, 2017, 42(2): 130 - 134, 140.
- [19] 何金鑫, 郜海燕, 穆宏磊, 等. 山核桃氧化过程中品质指标变化的电子鼻快速检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 284 - 291.

(上接第 24 页)

- [40] BROWN D R, GOUGH L A, DEB S K, et al. Astaxanthin in exercise metabolism, performance and recovery: a review [J/OL]. Front Nutr, 2017, 4: 76 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2017.00076>.
- [41] LASLETT L L, ANTONY B, WLUKA A E, et al. KARAOKE: krill oil versus placebo in the treatment of knee osteoarthritis: protocol for a randomised controlled trial [J/OL]. Trials, 2020, 21(1): 79 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.1186/s13063-019-3915-1>.
- [42] ZADEH - ARDABILI P M, RAD S K. Anti - pain and anti - inflammation like effects of Neptune krill oil and fish oil against carrageenan induced inflammation in mice models: current statues and pilot study [J/OL]. Biotechnol Rep (Amst), 2019, 22: e341 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00341>.
- [43] LIU F, SMITH A D, SOLANO - AGUILAR G, et al. Mechanistic insights into the attenuation of intestinal inflammation and modulation of the gut microbiome by krill oil using in vitro and in vivo models [J/OL]. Microbiome, 2020, 8(1): 83 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00843-8>.
- [44] GRIMSTAD T, BJØRNDAL B, CACABELOS D, et al. Dietary supplementation of krill oil attenuates inflammation and oxidative stress in experimental ulcerative colitis in rats [J]. Scand J Gastroenterol, 2012, 47(1): 49 - 58.
- [45] CHE H, LI H, SONG L, et al. Orally administered DHA - enriched phospholipids and DHA - enriched triglyceride relieve oxidative stress, improve intestinal barrier, modulate inflammatory cytokine and gut microbiota, and meliorate inflammatory responses in the brain in dextran sodium sulfate induced colitis in mice [J/OL]. Mol Nutr Food Res, 2021, 65: e2000986 [2021 - 08 - 19]. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202000986>.