

膳食鱼油对运动大鼠骨骼肌耗氧量及运动疲劳的影响

原超, 曹丹丹*

(太原科技大学体育学院, 太原 030024)

摘要: 目的 考察膳食鱼油对运动大鼠骨骼肌耗氧量的影响及抗运动疲劳作用。**方法** 采用膳食鱼油喂食雄性 Wistar 大鼠 8 周, 使用大鼠自体血液灌注后肢, 通过坐骨神经(1 Hz、6~12 V、0.05 ms)刺激骨骼肌, 并测定膜脂肪酸组成、骨骼肌耗氧量、肌肉收缩、收缩间恢复的变化。**结果** 膳食鱼油饮食组(FO)与对照组(CK)相比显著增加了红白骨骼肌膜中二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)、总 n-3 不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)含量, 降低了 n-6:n-3 PUFA 比值($P<0.05$)。CK 组和 FO 组三轮刺激时的初始和最大张力相比均有显著差异($P<0.05$), FO 组第一轮和第二轮的初始张力和最终张力之间存在显著差异, FO 组第一轮和第二轮的最大张力和最终张力相比没有显著降低($P>0.05$)。FO 组的耗氧量与 CK 组相比无显著降低($P>0.05$), O_2 效果指数显著高于对照组($P<0.05$)。FO 组与 CK 组相比恢复时静息耗氧量有所减少。**结论** 通过膳食鱼油喂食大鼠发现膳食鱼油中的多不饱和脂肪酸 DHA 的渗入与增加肌肉氧气消耗效率和促进抵抗肌肉疲劳有关。

关键词: 多不饱和脂肪酸; 耗氧量; 运动疲劳

Effects of dietary fish oil on skeletal muscle oxygen consumption and exercise fatigue in exercise rats

YUAN Chao, CAO Dan-Dan*

(Physical Education Department, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the skeletal muscle oxygen consumption and anti-exercise fatigue effects of dietary fish oil on exercise rats. **Methods** Male Wistar rats were fed dietary fish oil for 8 weeks, the rats *in vivo* autologous perfused hind limb were used to investigate the influences of membrane composition on skeletal muscle function, hind limb skeletal muscle perfused using the animal's own blood was stimulated *via* the sciatic nerve (1 Hz, 6-12 V, 0.05 ms) to contract, and the changes of membrane fatty acid composition, skeletal muscle oxygen consumption, muscle contraction and intersystolic recovery were determined. **Results** The dietary fish oil diet (FO) significantly increased the docosahexaenoic acid (DHA) and total n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFA) content in the red and white skeletal muscle membrane and decreased the n-6:n-3 PUFA ratio ($P<0.05$) compared with control group (CK). There were significant differences between CK and FO group in initial and maximum twitch tension

基金项目: 山西省哲学社会科学规划课题项目(2020YY164)

Fund: Supported by the Shanxi Province Philosophy and Social Science Planning Project (2020YY164)

*通信作者: 曹丹丹, 硕士, 讲师, 主要研究方向为运动人体科学。E-mail: ffkuiaa60039@163.com

*Corresponding author: CAO Dan-Dan, Master, Lecturer, Physical Education Department, Taiyuan University of Science and Technology, No.66, Waliu Road, Wanbolin District, Taiyuan 030024, China. E-mail: ffkuiaa60039@163.com

after three contraction rounds ($P<0.05$), there were significant differences between the initial and final twitch tension of the first and second contraction rounds of the FO group ($P<0.05$), there was no significant difference between maximum tension and final tension of the first and second rounds of FO group ($P>0.05$). Compared with CK, the hind limb oxygen consumption was no significantly reduced in the dietary fish oil group during contraction ($P>0.05$), and the O_2 efficiency index was significantly higher than that of the control group ($P<0.05$). the FO resting oxygen consumption was increased compared with CK. **Conclusion** Feeding rats with dietary fish oil find that the infiltration of polyunsaturated fatty acid DHA in dietary fish oil is related to increasing the efficiency of muscle oxygen consumption and promoting the resistance to muscle fatigue.

KEY WORDS: polyunsaturated fatty acids; oxygen consumption; exercise fatigue

0 引言

随着竞技体育的不断发展,运动员的成绩不断提升,这不仅是严格训练的结果,也是人类生理和现代营养技术综合作用的结果^[1]。膳食中有多种抗运动疲劳的营养物质,且几乎没有副作用,可作为营养补充剂添加到运动员的饮食中,从而改善运动员训练水平^[2-5]。

含有大量 n-3 不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)的膳食鱼油可影响结构膜脂质组成,而结构膜脂质组成又与细胞功能密切相关,特别是心肌细胞功能^[6-10]。组织和饮食的脂肪酸组成类型相似,但结合模式有所不同,特别是心肌膜吸收饮食中大量的 n-3 PUFA 的二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA),其浓度远高于体内循环的浓度^[11-15]。骨骼肌膜脂肪酸组成不仅和运动训练有密切联系,而且对膳食鱼油饮食干预具有敏感性,在骨骼肌细胞中检测到高含量的 n-3 PUFA,推测膜 n-3 PUFA 的渗入可能是特定纤维类型引起的,也可能与 I 型和 IIa 型肌细胞的高氧化能力有关^[16-20]。在膳食中添加 PUFA 可直接影响心脏功能,有研究表明在饲料中添加 n-3 PUFA 可以提高大鼠心脏的功能,稳定细胞膜降低大鼠心律失常的概率,调节大鼠心肌 O_2 消耗量^[21-25]。饮食中添加膳食鱼油可降低运动员氧气消耗量,研究表明运动员高强度运动时骨骼肌的耗氧量处在较低的水平^[26-29]。综上所述,在饮食中添加含有多不饱和脂肪酸的膳食鱼油会减少运动时骨骼肌的耗氧量,从而提高机体抗疲劳能力,但目前对于该方面的机制研究较少。

本研究以大鼠为研究对象,在饲料中添加 n-3 PUFA 含量较高的膳食鱼油进行喂养,改变大鼠骨骼肌膜脂肪酸组成,并研究骨骼肌耗氧量和收缩功能的变化,评价肌肉抗疲劳能力,初步揭示膳食鱼油改善大鼠骨骼肌耗氧量的作用机制,为膳食营养补充剂提高运动员抗运动疲劳能力的研究提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

膳食鱼油(纯度>99%,西安西海生物科技有限公司);橄榄油(纯度>99%,湖北东曹化学科技公司);雄性 Wistar

大鼠(400~500 g/只)(上海雷根生物科技有限公司);戊巴比妥钠(分析纯,上海思域化工科技有限公司);葡聚糖、肝素(分析纯,江苏奥福生物科技有限公司);氯仿、甲醇、硫酸、三氟化硼、乙醚(分析纯,天津科密欧化学试剂有限公司);丁基基甲苯(分析纯,美国 Sigma Aldrich 公司)。

1.2 试验仪器

FinePointe 动物呼吸机(美国 Buxco 公司);BS100-1AQ 蠕动泵(保定融柏恒流泵制造有限公司);AC9503 电解质分析仪器(江苏奥迪康医学科技股份有限公司);TGL-16M 台式高速冷冻离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司);GC-17A 气相色谱仪(日本岛津公司);Silica seppack 柱(55~105 μm , 50/pk)、Florisil Seppack 柱(30 mm \times 4.6 mm, 5 μm) (美国 Waters 公司);supelco vocol 气相色谱柱(30 m \times 0.25 mm, 1.5 μm)(美国 Supelco 公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

使用 12 只雄性 Wistar 大鼠,每次饮食干预 6 只,每个笼子饲养 2 只,饲养温度 23~25 $^{\circ}\text{C}$,每天光照 12 h^[30]。首先给大鼠喂食含有橄榄油的洗脱饲料[商品饲料中加入 10% ($V:m$)橄榄油]14 d 以标准化肌肉膜脂肪酸组成,然后随机分成两组,分别喂食商品饲料(CK)和膳食鱼油饲料(FO)[商品饲料加入 10% ($V:m$)膳食鱼油]8 周,每周第 1 d 和第 4 d 各补充 1 次新鲜饲料,每日摄入量(g)通过剩余饲料称重获得,每周测量一次大鼠体重。

1.3.2 大鼠通气、肌肉灌注和刺激术前准备

自体泵后肢灌注参考 PEOPLES 等^[31]的方法。腹腔注射 60 mg/kg 戊巴比妥钠麻醉大鼠,环境温度为(32 \pm 0.3) $^{\circ}\text{C}$,体温维持在 37 $^{\circ}\text{C}$,然后进行人工通气并在气管和左颈动脉插管记录血压,通气量为 1 mL/100 g 体重,以确保持续的动脉高氧含量。

灌注时在管中加入 6% ($m:V$)葡聚糖和 5000 IU/100 mL 肝素,动脉(含氧)血通过蠕动泵插入右股动脉(未灌注的腿)的套管进入心脏,再连接到密封挠性管,然后动脉血液通过套管插入左股动脉(灌注的腿),并将血液直接输送到膝盖以下的肌肉群。在灌注泵的后肢侧连接一个压力传感器用

于测量后肢灌注压力。静脉(缺氧)血通过将套管插入灌注腿的左股静脉和另一端的右颈静脉返回到心脏和肺。

通过坐骨神经刺激实现后肢肌肉收缩,将电极置于神经下直接刺激腓肠肌-跖肌-比目鱼肌的肌肉束,并破坏神经防止逆行传导,再将腓肠肌-跖肌-比目鱼肌连接到压力传感器,试验过程中用盐水浸湿的纱布覆盖肌肉防止干燥。

1.3.3 大鼠后肢灌注与刺激方案

所有后肢在 1 mL/min 流速下灌注 30 min 至灌注压力达到稳定状态(约 100 mmHg),然后在首次灌注(流量 1 mL/min)无刺激的情况下,抽取动脉和静脉血样本(400 μ L)。进行 10 min 刺激(1 Hz、6~12 V、0.05 ms)传递到坐骨神经,30 min 肌肉恢复,重复 3 次^[32]。收缩期血液流速为 1.5 mL/min,恢复期流速为 1 mL/min。动脉和静脉样本是在每次收缩的 9~10 min 之间,以及每次恢复的 25~30 min 之间收集的样本。

1.3.4 血液样本采集

收集动脉和静脉血样各 400 μ L,其中 240 μ L 血液测量其中的血氧分压(partial pressure of oxygen, PO₂)、血二氧化碳分压(partial pressure of carbon dioxide, PCO₂)、Na⁺、K⁺、pH 和 Hb,剩余血液离心后取出血浆冷冻备用,从血浆收集的红细胞重新悬浮在等量的生理盐水中,并重新灌注在静脉侧^[32]。

1.3.5 肌肉样本采集

在右股动脉插管前取右腿(未灌注)腓肠肌、跖肌和比目鱼肌作为对照组。每次试验结束时,在血液流动的情况下,迅速提取左腿(灌注和收缩)肌肉样本(腓肠肌、跖肌和比目鱼肌),所有肌肉在-80 °C冷冻保藏备用^[32]。比目鱼肌定义为红色/氧化组织,腓肠肌定义为白色/糖酵解组织。从灌注后的后肢收集额外的肌肉(胫骨后深、趾长伸肌和胫前肌),以确定灌注所用肌肉的总重量。

1.3.6 骨骼肌膜脂肪酸分析

膜脂肪酸分析采用 FRANCISCO 等^[33]的方法。取 100~150 mg 骨骼肌组织,并在氯仿-甲醇混合物(2:1, V:V)中均质。采用 1 mol/L 硫酸提取总脂质,过 Silica seppack 柱进行磷脂分析,在 85 °C 加入体积分数为 14% 的三氟化硼甲醇溶液进行磷脂脂肪酸甲酯化 1 h,通过 Florisil Seppack 柱进行纯化,流动相为体积比 5% 的乙酰石油溶液,最后采用 supelco vocol 气相色谱柱(30 m \times 0.25 mm, 1.5 μ m)进行分析。所有溶剂中均含有 0.01% (m:V)的丁基羟基甲苯,并在分析前进行制备。通过与标准品比对确定脂肪酸的种类和含量。

1.4 数据分析

数据分析采用 SPSS 18.0 软件进行,利用单因素方差分析对数据进行差异显著性分析,试验结果采用平均值 \pm 标准偏差表示, $P < 0.05$ 表示数据之间存在显著差异。

2 结果与分析

2.1 膳食鱼油对大鼠进食量和体重的影响

大鼠在 8 周的喂养期内,不同饮食组在前期、中期和

后期的食物摄入量没有显著差异($P > 0.05$),但 FO 组体重较轻。尽管平均体重存在差异,但不同饮食组之间的平均总后肢肌肉和腓肠肌束质量没有显著差异($P > 0.05$),结果如表 1 所示。说明两组不同饮食喂养的大鼠在进行后续试验时样本之间没有差异。

表 1 不同饮食组大鼠食物消耗量和体重($n=6$)
Table 1 Food consumption and body weight of rats in different diet groups ($n=6$)

项目	CK	FO
摄食量/(g/100 g 体重/周)	6.91 \pm 0.12 ^a	6.76 \pm 0.11 ^a
体重/(g/只)	496 \pm 27 ^a	459 \pm 15 ^b
后肢肌肉湿重/(g/只)	4.51 \pm 0.14 ^a	4.45 \pm 0.15 ^a
腓肠肌束湿重/g	2.44 \pm 0.19 ^a	2.27 \pm 0.11 ^a

注:同行中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),相同小写字母表示无显著差异($P > 0.05$),下同。

2.2 膳食鱼油对大鼠骨骼肌膜脂肪酸组成的影响

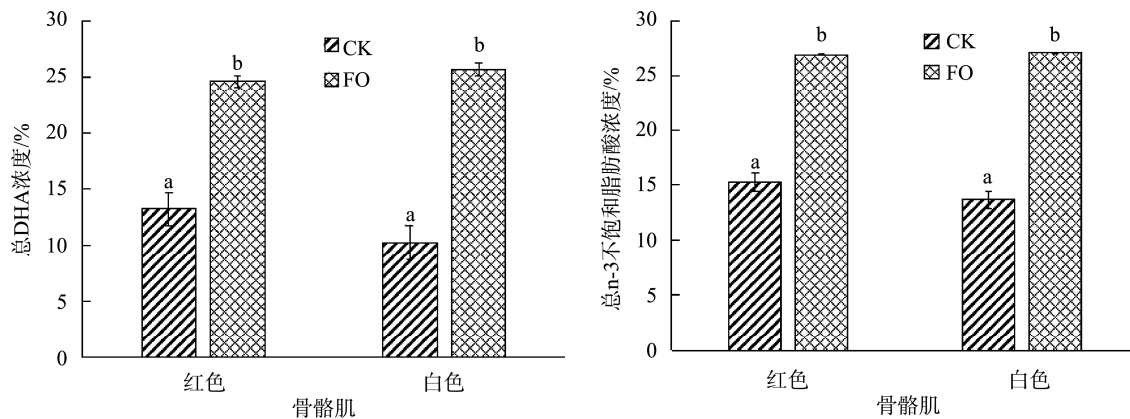
骨骼肌膜脂肪酸的含量和组成如表 2 所示,FO 组与 CK 组的膜脂肪酸含量有显著差异($P < 0.05$),FO 组骨骼肌红色(比目鱼肌)和白色(腓肠肌)部分的 C18:2(亚油酸)、C20:4(花生四烯酸)和总 n-6 PUFA 与 CK 组比较有显著降低($P < 0.05$),C20:5 n-3(二十碳五烯酸, eicosapentaenoic acid EPA)、C22:6 n-3 (DHA)(图 1A)和总 n-3 PUFA(图 1B)与 CK 组相比有显著升高($P < 0.05$),由表 2 中 FO 组肌肉中 n-6:n-3 PUFA 的比例也可证明,这说明 FO 组喂食的大鼠骨骼肌中吸收的脂肪酸主要是 n-3 多不饱和脂肪酸,这种变化与类似饮食干预后心脏中的变化相似,但其他组织如血管平滑肌、血小板或肾脏并没有出现这种变化^[30]。在这两种饮食干预下红色和白色肌肉部分没有显著差异($P > 0.05$)。FO 组与 CK 组比较,红色和白色肌肉的不饱和指数明显升高,但两组间的多不饱和脂肪酸和白色肌肉的总饱和脂肪酸均无显著差异($P > 0.05$)。

2.3 膳食鱼油对大鼠骨骼肌运动耗氧量的影响

在手术过程中检测各饮食组间大鼠体温[CK 组(36.9 \pm 0.9) °C,FO 组(36.5 \pm 0.7) °C]无显著差异($P > 0.05$),但 CK 组后肢灌注压力[(131 \pm 12) mmHg]显著高于 FO 组[(89 \pm 10) mmHg] ($P < 0.05$)。各饮食组间基线动脉血清样本有显著差异(表 3) ($P < 0.05$)。在两组中人工通气及其产生的动脉血氧分压(partial pressure of arterial oxygen, PaO₂)使红细胞氧饱和度达到 98%,并提高了动脉氧供应量(19~20 mL/100 mL)。基线动脉样本 PO₂ 含量显著低于动脉血,并通过静息肌束摄取氧气。FO 组与 CK 组相比表现出更低的(a-v)O₂[(动脉-静脉)的氧气含量]和基础 O₂ 消耗量,说明 FO 组喂食的大鼠骨骼肌在运动时消耗较低的氧,肌肉氧气的使用效率有所提高。

表 2 红色和白色骨骼肌膜脂肪酸含量(n=6)
Table 2 Red and white skeletal muscle membrane fatty acid content (n=6)

指标	CK		FO	
	红色/(g/kg)	白色/(g/kg)	红色/(g/kg)	白色/(g/kg)
C14:0	0.24±0.03 ^a	0.27±0.02 ^a	0.26±0.04 ^a	0.25±0.01 ^a
C16:0	16.58±3.76 ^a	21.63±0.72 ^b	18.95±4.21 ^a	24.03±0.83 ^b
C18:0	12.04±2.34 ^a	11.93±0.36 ^a	12.82±0.68 ^a	11.21±0.45 ^a
C18:1 n-9	8.73±2.17 ^a	9.4±1.25 ^a	8.35±0.55 ^a	7.38±0.32 ^a
C18:2 n-6	14.05±3.04 ^a	14.63±0.32 ^a	10.42±0.67 ^b	9.58±0.71 ^b
C20:4 n-6	16.04±0.86 ^a	17.72±0.68 ^a	10.35±0.96 ^b	9.28±0.84 ^b
C20:5 n-3	0.09±0.04 ^a	0.05±0.03 ^a	1.12±0.06 ^b	1.16±0.06 ^b
C22:5 n-3	1.73±0.25 ^a	2.45±0.21 ^a	1.23±0.22 ^a	1.08±0.11 ^a
C22:6 n-3	12.86±3.21 ^a	9.87±1.12 ^a	23.52±0.72 ^b	26.25±1.36 ^b
饱和脂肪酸	28.86±6.13 ^a	33.83±1.10 ^b	32.03±4.93 ^b	35.49±1.29 ^b
多不饱和脂肪酸	44.77±1.23 ^a	44.72±1.71 ^a	46.64±1.51 ^a	47.35±3.16 ^a
总 n-6 脂肪酸	30.09±2.42 ^a	32.35±1.34 ^a	20.77±1.28 ^b	18.86±1.36 ^b
总 n-3 脂肪酸	14.68±2.52 ^a	12.37±1.18 ^a	25.87±0.64 ^b	28.49±2.15 ^b
n-6:n-3	2.05±0.64 ^a	2.62±0.15 ^a	0.80±0.15 ^b	0.62±0.28 ^b
不饱和指数	177±16 ^a	185±14 ^a	236±15 ^b	248±14 ^b



注：不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，下同。

图 1 CK 组和 FO 组喂食 8 周后骨骼肌总 DHA (A)和总 n-3 PUFA (B)浓度(n=6)

Fig.1 Skeletal muscle total DHA (A) and total n-3 PUFA (B) concentrations for CK and FO after 8 weeks feeding (n=6)

表 3 后肢动脉和静脉样本基线检测(n=6)

Table 3 Baseline measurements of systemic arterial and venous hind limb samples (n=6)

指标	CK	FO
动脉血气和代谢物		
pH	7.43±0.12 ^a	7.74±0.09 ^a
PaO ₂ /mmHg	85±2 ^b	92±3 ^a
PaCO ₂ /mmHg	32±2 ^a	35±2 ^a
Hb/(g/100 mL)	12.6±0.5 ^a	13.1±0.4 ^a
CaO ₂ /(mL/100 mL)	19.02±0.22 ^a	20.15±0.54 ^a
HCO ₃ ⁻ /mm	24.9±1.7 ^b	29.6±1.5 ^a
乳酸/mm	2.98±0.15 ^a	2.82±0.12 ^a
静脉血气和代谢物		
pH	7.35±0.14 ^a	7.35±0.11 ^a
PvO ₂ /mmHg	38±3 ^b	46±2 ^a
PvCO ₂ /mmHg	43±5 ^b	47±3 ^a

表 3(续)

指标	CK	FO
Hb/(g/100 mL)	14.05±0.46 ^a	15.01±0.67 ^a
CvO ₂ /(mL/100 mL)	14.67±1.2 ^a	16.53±0.8 ^a
HCO ₃ ⁻ /mm	25.9±1.3 ^a	28.7±2.4 ^a
乳酸/mm	2.46±0.5 ^a	3.06±0.7 ^a
后肢静息耗氧量		
(a-v)O ₂ /(mL/100 mL)	4.35±0.72 ^a	3.62±0.67 ^a
VO ₂ /[μmol/(g·min)]	0.39±0.12 ^a	0.33±0.14 ^a

注：动脉血二氧化碳分压(partial pressure of arterial carbon dioxide, PaCO₂)；血红蛋白(hemoglobin, Hb)；动脉血氧含量(content of arterial oxygen, CaO₂)；HCO₃⁻：碳酸氢根；静脉血氧分压(partial pressure of vein oxygen, PvO₂)；静脉血二氧化碳分压(partial pressure of vein carbon dioxide, PvCO₂)；静脉血氧含量(content of vein oxygen, CvO₂)；(a-v)O₂：动脉与静脉血氧含量差；耗氧量(oxygen consumption, VO₂)。

2.4 膳食鱼油对大鼠肌肉收缩的影响

结果如图2所示, CK组和FO组三轮刺激时的初始(0 min)和最大张力(1 min)相比均有显著差异($P < 0.05$), CK组各轮、FO组第三轮的初始张力和最终张力(10 min)之间没有显著差异($P > 0.05$), FO组第一轮和第二轮的初始张力和最终张力之间存在显著差异($P < 0.05$)。FO组第一轮和第二轮的最大张力和最终张力相比没有显著降低($P > 0.05$), 说明FO组喂食的大鼠在高强度运动后骨骼肌仍保持有较强的收缩能力, 在重复收缩时不易产生疲劳。

2.5 膳食鱼油对大鼠肌肉收缩间恢复的影响

由图3结果可知, 与CK组的基线相比, CK组大鼠后肢耗氧量在第1和第2个恢复期较其自身基线有所增加, 相比之下, FO组的耗氧量均能够恢复到原始基线水平, 值得注意的是, 在每个恢复期内, FO组的耗氧量显著低于CK组($P < 0.05$)。说明FO组大鼠在高强度运动后肌肉能够迅速恢复, 氧气消耗、二氧化碳产生、通气量和心率都能得到更快的调整, 从而提高机体的抗疲劳能力。

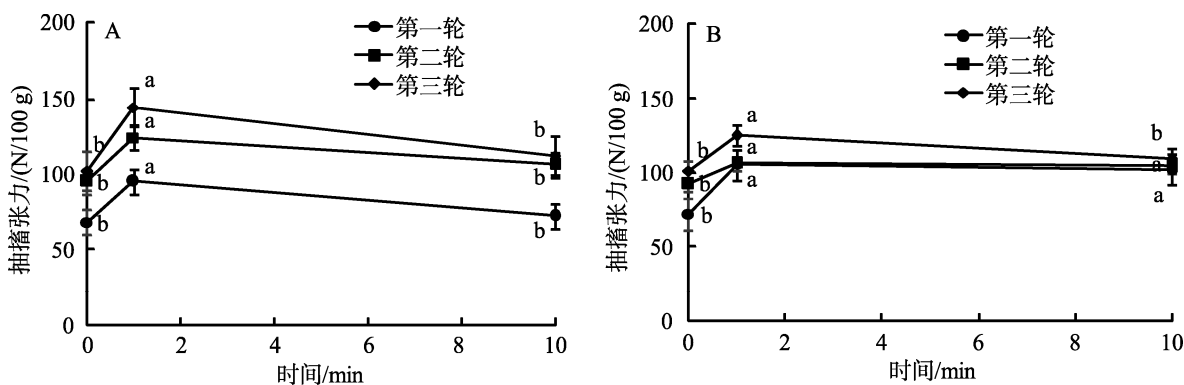
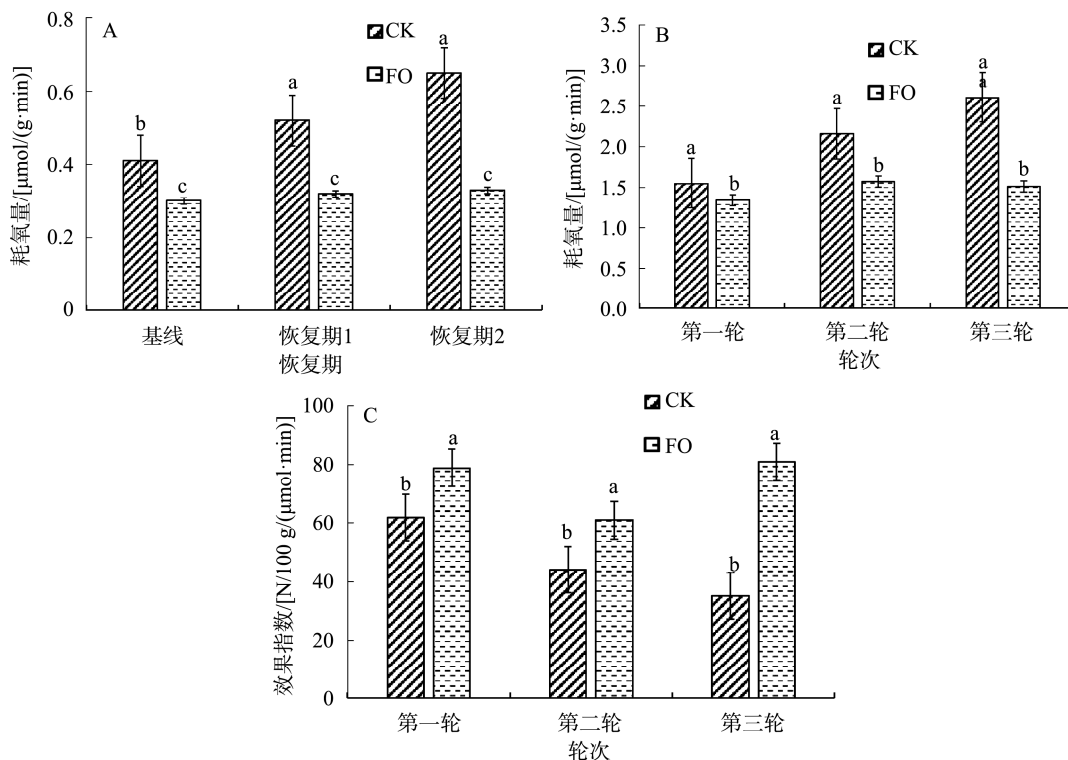


图2 CK (A)和FO (B)组不同轮次抽搐张力($n=6$)
Fig.2 Twitch tension development for different bout for CK (A) and FO (B) ($n=6$)



注: A 基线、恢复期 1 和恢复期 2 耗氧量; B 第一轮、第二轮和第三轮收缩耗氧量; C 第一轮、第二轮和第三轮效率指数。

图3 CK组和FO组收缩间恢复($n=6$)
Fig.3 Contraction recoveries for CK and FO ($n=6$)

3 结论与讨论

本研究探究了富含多不饱和脂肪酸的膳食鱼油对运动大鼠骨骼肌耗氧量及运动疲劳的影响。喂食膳食鱼油大鼠的相关指标测定结果显示骨骼肌在连续肌肉收缩时能够抵抗疲劳,并且在重复的运动中能够更好地恢复收缩力,特别是在收缩期和恢复期,通过减少骨骼肌耗氧量从而改善大鼠的肌肉收缩能力,这与膜脂肪酸组成的变化相关,特别是与膜中多不饱和脂肪酸 DHA 水平的增加相关,这与相关学者在猕猴、大鼠和人体的心脏、骨骼肌进行的膳食鱼油对膜磷脂的影响结果相似^[32]。通过 8 周的饮食控制,喂食膳食鱼油大鼠的骨骼肌膜脂肪酸组成与对照组相比有显著差异,特别是膳食鱼油中的 DHA,这是并入骨骼肌膜的主要脂肪酸,这种变化与类似饮食干预心脏的变化相似^[30]。在喂食含有 n-3 PUFA 饲料的动物中发现腓肠肌-跖肌-比目鱼肌束高强度运动后骨骼肌仍保持有较强的收缩能力,而且在反复收缩时抗疲劳性明显增加,这与鱼油改善心脏收缩功能和改善缺血后心脏功能恢复等研究结果类似^[30]。本研究结果显示灌注后肢低静息耗氧量没有受到饮食的影响,这与 MAKI 等^[8]的研究结果一致,而喂食膳食鱼油大鼠后肢的抽搐收缩耗氧量显著低于对照组,当肌肉需氧量增加时,大鼠耗氧量和利用率会被调节,就像心肌在血压增加或急性心肌缺血时调节的情况一样^[8-9],这表明肌肉中氧气使用效率显著提高。n-3 PUFA 反应的细胞信号传递过程是由二十烷类和自由基产生的变化引起的,但不管细胞内信号传导如何进行,n-3 PUFA 都可以通过渗入细胞膜的磷脂获得,过量的氧气消耗和 n-3 PUFA 的调节也与细胞肌浆网和线粒体 Ca^{2+} 过载相关,骨骼肌可将 Ca^{2+} 从肌浆网释放到细胞质中,而这与肌肉疲劳相关^[11-13],因此,本研究发现 Ca^{2+} 循环过程是膳食鱼油多不饱和脂肪酸作用在骨骼肌细胞功能中的一种潜在作用机制。另外膳食鱼油喂养的大鼠骨骼肌中脂肪酸的不饱和指数较高,所以细胞氧化损伤的风险增加,这与产生疲劳的自由基理论一致,而膳食鱼油中的 n-3 PUFA 可以上调骨骼肌的内源性保护机制,从而产生抗疲劳作用。

综上所述,喂养膳食鱼油大鼠的延迟肌肉疲劳、改善收缩恢复作用与膜磷脂脂肪酸成分的变化相关,尤其是骨骼肌耗氧量与膜 DHA 含量的增加密切相关。这一结果对运动员通过膳食营养补充提高其抗运动疲劳能力的研究提供数据基础,也为开发新型无副作用抗疲劳产品提供理论依据,从而提高运动员的抗疲劳能力和体能储备。

参考文献

- [1] BLAIN MG, HUREAU TJ. Limitation of fatigue and performance during exercise: The brain-muscle interaction [J]. *Exp Physiol*, 2017, 102(1): 3-4.
- [2] 张钱伟. 毛酸浆枸杞液体营养饮料研制及其对运动抗疲劳作用的研究 [J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(9): 141-145.

- ZHANG QW. Development of *Physalis pubescens* l. and wolfberry compound liquid nutrition beverage and its anti-fatigue effect on sports [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(9): 141-145.
- [3] CHO HD, KIM JH, JU HL, *et al.* Anti-fatigue effect of a cucumber vinegar beverage on rats after high-intensity exercise [J]. *Korean J Food Sci Technol*, 2017, 49(2): 209-214.
- [4] 李荣静. 复方中药在抗运动性疲劳的应用研究 [J]. *体育科技文献通报*, 2021, 29(12): 205-208.
- LI RJ. Application of compound Chinese medicine in anti exercise fatigue [J]. *Bull Sports Sci Technol Liter*, 2021, 29(12): 205-208.
- [5] MATTHEW SG, LAWRENCE EA, EVAN CJ, *et al.* Effect of quercetin supplementation on maximal oxygen uptake in men and women [J]. *J Sport Sci*, 2010, 28(2): 201-208.
- [6] MACINTOSH BA, RAMSDEN CE, HONVOH G, *et al.* Methodology for altering omega-3 EPA+DHA and omega-6 linoleic acid as controlled variables in a dietary trial [J]. *Clin Nutr*, 2021, 40(6): 3859-3867.
- [7] JIANG L, WANG J, XIONG K, *et al.* Intake of fish and marine n-3 polyunsaturated fatty acids and risk of cardiovascular disease mortality: A meta-analysis of prospective cohort studies [J]. *Nutrients*, 2021, 13(7): 2342-2358.
- [8] MAKI KC, DICKLIN MR. Omega-3 fatty acid therapy for cardiovascular disease: Justified or not [J]. *Curr Opin Cardiol*, 2020, 35(4): 417-422.
- [9] SAITOH K, YOSHIMURA T, SUN L, *et al.* Effect of dietary fish oil on enhanced inflammation and disturbed lipophagy in white adipose tissue caused by a high fat diet [J]. *Fish Sci*, 2020, 86(1): 187-196.
- [10] MACARTNEY MJ, PEOPLES GE, MCLENNAN PL. Cardiac contractile dysfunction, during and following ischaemia, is attenuated by low-dose dietary fish oil in rats [J]. *Eur J Nutr*, 2021, 60: 4495-4503.
- [11] JALILI M, JIN Y, BONES AM, *et al.* Dietary fatty acid source has little effect on the development of the immune system in the pyloric caeca of Atlantic salmon fry [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 27-43.
- [12] INFANTE M, RICORDI C, PADILLA N, *et al.* The role of vitamin D and omega-3 PUFAs in islet transplantation [J]. *Nutrients*, 2019, 11(12): 2937-2957.
- [13] PAKIET A, JAKUBIAK A, MIERZEJEWSKA P, *et al.* The effect of a high-fat diet on the fatty acid composition in the hearts of mice [J]. *Nutrients*, 2020, 12(3): 824-844.
- [14] LI H, DUAN Y, CHEN B, *et al.* New pharmacological treatments for heart failure with reduced ejection fraction (HFrEF): A Bayesian network meta-analysis [J]. *Medicine*, 2020, 99(5): 18341.
- [15] MESSINA M, SHEARER G, PETERSEN K. Soybean oil lowers circulating cholesterol levels and coronary heart disease risk, and has no effect on markers of inflammation and oxidation [J]. *Nutrition*, 2021, 89(2): 111343.
- [16] LEI H, DONG L, LI Y, *et al.* Stretchable hydrogels with low hysteresis and anti-fatigue fracture based on polyprotein cross-linkers [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 4032.
- [17] BOERKAMP D, ANDERSEN ML, JACOBSEN C, *et al.* Oxygen permeability and oxidative stability of fish oil-loaded electrospayed capsules measured by electron spin resonance: Effect of dextran and glucose syrup as main encapsulating materials [J]. *Food Chem*, 2019, 287: 287-294.
- [18] LIU L, JIN R, HAO J, *et al.* Consumption of the fish oil high-fat diet

- uncouples obesity and mammary tumor growth through induction of reactive oxygen species in protumor macrophages [J]. *Cancer Res*, 2020, 80(12): 3184–3203.
- [19] 彭健, 魏宏途, 江书忠, 等. 日粮 ω -3 多不饱和脂肪酸对猪骨骼肌的营养调控研究进展[J]. *饲料与畜牧*, 2011, (1): 20–23.
PENG J, WEI HK, JIANG SZ, *et al.* Research progress on nutritional regulation of dietary omega-3 polyunsaturated fatty acids in porcine skeletal muscle [J]. *Anim Agric*, 2011, (1): 20–23.
- [20] SHI Y, XU Y, JIANG F, *et al.* On-site marine oil spillage monitoring probes formed by fixing oxygen sensors into hydrophobic/oleophilic porous materials for early-stage spotty pollution warning [J]. *Rsc Adv*, 2021, 35(11): 21279–21290.
- [21] FORTE C, BRANCIARI R, PACETTI D, *et al.* Dietary oregano (*Origanum vulgare* L.) aqueous extract improves oxidative stability and consumer acceptance of meat enriched with CLA and n-3 PUFA in broilers [J]. *Poultry Sci*, 2018, 97(5): 1774–1785.
- [22] LI D, WANG W, LI X, *et al.* Preparation of highly pure n-3 PUFA-enriched triacylglycerols by two-step enzymatic reactions combined with molecular distillation [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2017, 94(2): 1–9.
- [23] JAKOVljeVIC V, VESELINOVIC M, VASILJEVIC D, *et al.* Clinical benefits of n-3-PUFA and γ -linolenic acid in patients with rheumatoid arthritis [J]. *Atherosclerosis*, 2017, 263: 168.
- [24] YANG KM, CHENG MC, CHEN CW, *et al.* Characterization of volatile compounds with HS-SPME from oxidized n-3 pufa rich oils via rancimat tests [J]. *J Oleo Sci*, 2017, 66(2): 113–122.
- [25] 晁红娟, 雷占兰, 刘爱琴, 等. Omega-3 多不饱和脂肪酸性质、功能及主要应用[J]. *中国食品添加剂*, 2019, 30(10): 122–130.
CHAO HJ, LEI ZL, LIU AIQ, *et al.* Properties, functions and main applications of Omega-3 polyunsaturated fatty acids [J]. *China Food Addit*, 2019, 30(10): 122–130.
- [26] GURA KM, PREMKUMAR MH, CALKINS KL, *et al.* Fish oil emulsion reduces liver injury and liver transplantation in children with intestinal failure-associated liver disease: A multicenter integrated study [J]. *J Pediatr*, 2020, 230: 46–54.
- [27] MATTHEW DR, LOUISE JK, SUSIE SY, *et al.* The effect of dietary fish oil and poultry fat replacement with canola oil on swimming performance and metabolic response to hypoxia in stream type spring Chinook salmon parr [J]. *Aquaculture*, 2010, 308: 183–189.
- [28] BOESPFLUG EL, MCNAMARA RK, ELIASSEN JC, *et al.* Fish oil supplementation increases event-related posterior cingulate activation in older adults with subjective memory impairment [J]. *J Nutr Health Aging*, 2016, 20(2): 161–169.
- [29] 刘汝萃, 范书琴, 张健全, 等. 鱼油软胶囊对小鼠抗疲劳作用的实验研究[J]. *粮食与食品工业*, 2018, 25(4): 38–41.
LIU RC, FAN SQ, ZHANG JQ, *et al.* Experimental study on anti-fatigue function of fish oil soft capsule in mice [J]. *Cere Food Ind*, 2018, 25(4): 38–41.
- [30] 王乐山, 左旭冬, 江青艳, 等. 脂肪酸对动物骨骼肌的代谢调控作用[J]. *中国畜牧兽医*, 2017, 44(3): 748–754.
WANG LS, ZUO XD, JIANG QY, *et al.* The metabolic regulatory effect of fatty acids on mammal skeletal muscle [J]. *Chin J Anim Husband Vet Med*, 2017, 44(3): 748–754.
- [31] PEOPLES GE, HOY AJ, HENRY R, *et al.* Autologous pump-perfused rat hind limb preparation for investigating muscle function and metabolism *in vivo* [J]. *Microcirculation*, 2013, 20(6): 511–523.
- [32] GREGORY EP, PETER LM. Dietary fish oil reduces skeletal muscle oxygen consumption, provides fatigue resistance and improves contractile recovery in the rat *in vivo* hindlimb [J]. *Br J Nutr*, 2010, 104: 1771–1779.
- [33] FRANCISCO R, STONE D, CREAMER RE, *et al.* European scale analysis of phospholipid fatty acid composition of soils to establish operating ranges [J]. *Appl Soil Ecol*, 2016, 97: 49–60.

(责任编辑: 张晓寒 郑丽)

作者简介

原超, 硕士, 讲师, 主要研究方向为运动人体体质工程。

E-mail: youyunyu7668@sohu.com

曹丹丹, 硕士, 讲师, 主要研究方向为运动人体科学。

E-mail: ffkuiaa60039@163.com