

饲料中大豆油替代鱼油对银鲳(*Pampus argenteus*)幼鱼血清溶菌酶活性及组织抗氧化能力的影响*

张晨捷 彭士明 高权新 施兆鸿^① 王建钢

(农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室 中国水产科学研究院东海水产研究所 上海 200090)

摘要 银鲳(*Pampus argenteus*)是沿海重要的经济鱼类,本研究针对养殖银鲳幼鱼进行人工配合饲料研发,降低饲料成本、增强鱼体体质、提高存活率等。通过配制以 100%鱼油(FO)、70%鱼油和 30%大豆油(FSO)、30%鱼油和 70%大豆油(SFO)、100%大豆油(SO)为脂肪源的 4 组饲料,检测银鲳幼鱼血清溶菌酶(LZM)和组织抗氧化性能的变化情况,以探究饲料大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼健康的影响。结果显示, SFO 组血清 LZM 水平最高, SO 组最低,但各组间差异不显著($P>0.05$)。FSO 和 SFO 组的肌肉丙二醛(MDA)含量显著高于 FO 和 SO 组($P<0.05$),肝脏 MDA 含量则是 FO 和 FSO 组较高($P<0.05$)。血清和肌肉超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活力最高的均为 SFO 组,而 SO 组活力较低。相对地,肝脏 SOD 和 CAT 活力均是 FO 组最高($P<0.05$)。肌肉和肝脏总抗氧化能力(T-AOC)均是 FO 和 FSO 组较高,而血清 T-AOC 是 SO 组较高。研究表明,豆油替代 30%和 70%鱼油,对银鲳幼鱼免疫和抗氧化能力都略有促进作用,但完全使用豆油会对机体产生负面影响。

关键词 长链多不饱和脂肪酸;银鲳;肝脏;肌肉;抗氧化

中图分类号 Q963 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)03-0115-09

长链多不饱和脂肪酸(LC-PUFA)是动物维持正常生长发育和生理功能的重要营养物质,具有细胞膜磷脂组分、类花生酸前体和调节基因表达等功能(Xie *et al.*, 2015)。根据第 1 个双键距离烃链尾的碳原子数目,可将 LC-PUFA 分为 n-3 和 n-6 系列。其中, n-3 LC-PUFA 主要包括亚麻酸(ALA)、二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA); n-6 系主要包括亚油酸(LA)和花生四烯酸(AA)(左然涛等, 2015)。鱼油中的 n-3 LC-PUFA 含量较高,而大部分植物油中的 n-6 系含量较高, n-3 系含量较低甚至没有(如葵花油、花生油)(Turchini *et al.*, 2009)。不同鱼类 LC-PUFA 合成能

力不同,一般认为,淡水鱼和鲑鳟类具有将 C18 PUFA 转化为 LC-PUFA 的能力,而海水鱼类,除少数种类外,大多从食物中获取 LC-PUFA,特别是养殖种类,故 LC-PUFA 被称为必需脂肪酸(EFA)(Geay *et al.*, 2015)。

海洋鱼类资源有限,导致鱼油原料短缺且价格昂贵,严重制约水产养殖业可持续发展。植物油资源丰富,且价格低廉,是较适宜的鱼油替代品(梅琳等, 2015)。但由于植物油中含有大量的 n-6 LC-PUFA,而相对缺乏 n-3 LC-PUFA,用植物油取代鱼油会导致饲料中的 n-6/n-3 LC-PUFA 比例发生改变(谢帝芝等,

* 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字 2013-2-1)和中央级公益性科研院所基本科研业务费(东 2014Z02)共同资助[This work was supported by the Science and Technology Start Agriculture Plan of Shanghai (Hunongkegongzi 2013-2-1) and the Central Nonprofit Basic Scientific Research Project for the Scientific Research Institutes of China (East 2014Z02)]. 张晨捷, E-mail: zhangchenjie1989@sina.com

^① 通讯作者: 施兆鸿, 研究员, E-mail: shizh@eastfishery.ac.cn

收稿日期: 2016-02-22, 收修改稿日期: 2016-04-07

2015)。配合饲料中利用植物油替代鱼油虽然对生长性能影响不大,但因鱼体自身的 LC-PUFA 合成能力较弱,会导致鱼肉品质显著下降。n-6/n-3 LC-PUFA 摄入比例不均衡,会影响脂类代谢,造成某些脂类大量积累,势必增加鱼体组织中发生脂质过氧化的风险,进而会影响组织的抗氧化水平。细胞膜磷脂结构中的 LC-PUFA 对脂类过氧化反应十分敏感 (Villasante *et al*, 2015), 并且 n-3 LC-PUFA 比 n-6 LC-PUFA 更容易发生脂质过氧化反应(田晶晶等, 2015)。而脂类过氧化产物,如丙二醛(MDA)会损害细胞膜的结构与功能,削弱机体抗氧化与免疫功能。因此,适当的 LC-PUFA 配比既可节约饲料成本,又能提高饲料转化率、促进鱼类健康生长。

银鲳(*Pampus argenteus*)在中国各海域均有分布(刘静等, 2002),以东海北部近海(江苏吕四和浙江舟山渔场)的资源量最高,是沿海重要的经济鱼类,具有较高的养殖开发潜力(孙鹏飞等, 2015)。自 21 世纪初,国内陆续开展针对银鲳人工繁育及养殖技术方面的研究,尽管取得了一定科技成果(施兆鸿等, 2011; 彭士明等, 2010a),但也存在着饲料成本过高、生长速度较慢、发育不均衡等问题(彭士明等, 2010b; Peng

et al, 2013), 尚未实现其稳定且规模化的人工繁育及养殖推广技术。本研究通过在饲料中添加不同比例的鱼油与大豆油,分析大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼血清溶菌酶和组织抗氧化性能的影响,以期对养殖银鲳幼鱼人工配合饲料的研发、降低饲料成本、增强鱼体体质、提高存活率提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验用鱼及饲料制备

实验用鱼为人工培育的银鲳幼鱼(4 月龄),初始规格:体重为(17.2±6.7) g,叉长为(8.5±0.9) cm。饲养时间为 2013 年 7-9 月,整个实验期间水温为 24-29℃,盐度为 24-27。

分别以 100%鱼油(FO)、70%鱼油和 30%大豆油(FSO)、30%鱼油和 70%大豆油(SFO)、100%大豆油(SO)为脂肪源配制等氮、等能、等脂的 4 组饲料,其饲料组成见表 1,脂肪酸组成见表 2。饲料蛋白水平约为 50%,脂肪水平约为 16%。所有饲料原料经过充分混合后,用绞肉机制成 2 mm 的颗粒,于 25℃烘箱中烘干后,于-20℃冰箱中保存备用。

表 1 实验饲料的组成
Tab.1 Ingredients and proximate composition of the experimental diets

原料 Ingredients	饲料 Experimental diets			
	FO	FSO	SFO	SO
组成 Ingredients (g/kg)				
鱼粉 Fish meal ^a	610	610	610	610
豆粕 Soybean meal ^a	160	160	160	160
面粉 Wheat flour ^a	100	100	100	100
鱼油 Anchovy oil	100	70	30	0
大豆油 Soybean oil	0	30	70	100
复合维生素 Vitamin premix ^b	20	20	20	20
复合矿物质 Mineral premix ^c	10	10	10	10
营养成分 Proximate composition (%)				
粗蛋白 Crude protein	49.62	49.95	49.73	50.14
粗脂肪 Crude fat	16.29	16.36	16.46	16.02
灰分 Ash	10.43	9.98	10.12	10.01
n-3 LC-PUFA ^d	5.18	4.01	3.02	2.22

a. 蛋白与脂肪含量(%干物质): 鱼粉, 67%蛋白、10.0%脂肪; 豆粕, 43%蛋白、1.9%脂肪; 面粉, 12%蛋白、1.6%脂肪。b. 每 kg 饲料含: 肌醇 400 mg, 烟酸 150 mg, 泛酸钙 44 mg, 维生素 B₂ 20 mg, 维生素 B₆ 12 mg, 维生素 K₃ 10 mg, 维生素 B₁ 10 mg, 维生素 A 7.3 mg, 叶酸 5 mg, 生物素 1 mg, 维生素 D₃ 0.06 mg, 维生素 B₁₂ 0.02 mg, 维生素 C 400 mg, 维生素 E 500 mg。c. 每 kg 饲料含: KH₂PO₄ 22 g, FeSO₄·7H₂O 1.0 g, ZnSO₄·7H₂O 0.13 g, MnSO₄·4H₂O 52.8 mg, CuSO₄·5H₂O 12 mg, CoSO₄·7H₂O 2 mg, KI 2 mg。d. 依据饲料脂肪含量×总 n-3 LC-PUFA 百分比

a. Proximate composition as % dry weight. Fish meal: 67% crude protein, 10.0% crude lipid; Soybean meal: 43% crude protein, 1.9% crude lipid; Wheat flour: 12% crude protein, 1.6% crude lipid. b. Supplied (/kg diet): Myo-inositol, 400 mg; Nicotinic acid, 150 mg; Calcium pantothenate, 44 mg; Riboflavin, 20 mg; Pyridoxine hydrochloride, 12 mg; Menadione, 10 mg; Thiamine hydrochloride, 10 mg; Retinyl acetate, 7.3 mg; Folic acid, 5 mg; Biotin, 1 mg; Cholecalciferol, 0.06 mg; Cyanocobalamin, 0.02 mg; L-ascorbic acid, 400 mg; DL- α -tocopherol acetate, 500 mg. c. Supplied (/kg diet): KH₂PO₄, 22 g; FeSO₄·7H₂O, 1.0 g; ZnSO₄·7H₂O, 0.13 g; MnSO₄·4H₂O, 52.8 mg; CuSO₄·5H₂O, 12 mg; CoSO₄·7H₂O, 2 mg; KI, 2 mg. d. Calculated from lipid content × Σn-3 LC-PUFA

表2 饲料脂肪酸组成(%，占总脂肪酸比例)
Tab.2 Fatty acid composition of the experimental diets (% of total fatty acids)

脂肪酸 Fatty acids	实验饲料 Experimental diets			
	FO	FSO	SFO	SO
饱和脂肪酸 Saturated Fatty acids	29.10	28.86	27.01	25.06
单不饱和脂肪酸 Σ MUFAs	28.94	28.19	28.08	27.36
C18:2n6	7.41	11.15	20.75	27.71
C18:3n6	0.18	0.24	0.28	0.30
C20:4n6	3.13	1.69	0.71	0.63
n-6 多不饱和脂肪酸 Σ n-6 LC-PUFAs	10.72	13.08	21.74	28.64
C18:3n3	1.23	1.94	2.94	3.62
C20:3n3	0.23	0.20	0.16	0.14
C20:5n3	14.92	12.06	8.65	5.97
C22:5n3	1.81	1.51	1.18	0.92
C22:6n3	12.82	10.75	8.34	6.82
n-3 多不饱和脂肪酸 Σ n-3 LC-PUFAs	31.00	26.45	21.27	17.46
n-3/n-6	2.89	2.02	0.98	0.61
Σ n-3 LC-PUFAs	29.78	24.51	18.33	13.84

1.2 实验设计

挑选 600 条体表无伤、体色正常的银鲳幼鱼，平均分配于 16 m³ 的室内圆形水泥池中，每个饲料组设 3 个重复，共 12 个水泥池。以不添加大豆油饲料预饲 1 周，饲养时间为 2013 年 8–9 月，共计 60 d。饲养期间，24 h 不间断充气，每天饱食投喂 2 次(08:00 和 16:00)，日换水量为 40%。

每个水泥池取 3 尾鱼(样本数为 9)，经 100 mg/L MS-222 麻醉后，用 1 ml 无菌注射器尾静脉采血，置于无菌离心管中，4℃ 静止 12 h，4000 r/min 离心 15 min，取上清液。采血后，在碎冰上解剖，取两侧肌肉、肝脏组织。用生理盐水润洗，并用滤纸片吸干水分，血清、肌肉和肝脏置于 -70℃ 保存备用。

1.3 指标检测

血清溶菌酶(LZM)活力采用比浊法。肌肉和肝脏丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸缩合比色法。超氧化物歧化酶(SOD)活力采用黄嘌呤氧化酶法，酶活单位(U/mg prot 或 U/ml)定义为：每毫克组织蛋白或每毫升血清在 1 ml 反应液中超氧自由基抑制率达 50%时所对应的 SOD 量。过氧化氢酶(CAT)活力采用比色法，酶活单位(U/mg prot 或 U/ml)定义为：每毫克组织蛋白或每毫升血清每秒钟分解 1 μ mol 量的 H₂O₂。总抗氧化能力(T-AOC)包括酶促和非酶促体系，单位 U/mg prot 或 U/ml 表示：每分钟每毫克组织或蛋白每分钟每毫升血清使反应体系吸光度(OD)

增加 0.01。各项指标由南京建成生物工程研究所试剂盒检测，按说明书要求操作并计算。

1.4 数据处理

数据以平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示，采用 SPSS 19.0 软件对银鲳幼鱼各项指标数据进行统计与分析，运用单因素方差分析(One-way ANOVA)，先进行方差齐性检验，不满足方差齐性时，对数据进行自然对数或平方根转换，采用 Duncan's 进行多重比较， $P < 0.05$ 为显著性差异。用 Excel 2007 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 银鲳幼鱼血清 LZM 活力

饲料中，大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼血清 LZM 活力影响见图 1。由图 1 可知，SFO 组(n-3 LC-PUFA, 3.02%) LZM 活力最高[(50.98 \pm 6.79) U/ml]，SO 组(n-3 LC-PUFA, 2.22%)最低[(35.29 \pm 11.77) U/ml]，但各组间差异不显著($P > 0.05$)。

2.2 银鲳幼鱼肌肉和肝脏 MDA 含量

如图 2 所示，银鲳幼鱼肌肉和肝脏 MDA 含量随饲料大豆油替代鱼油水平呈现不同变化趋势。肌肉 MDA 含量最高的是 FSO 组(n-3 LC-PUFA, 4.01%)，为(1.88 \pm 0.28) nmol/mg prot，含量最低的是 SO 组(n-3 LC-PUFA, 2.22%)，为(0.93 \pm 0.20) nmol/mg prot，FSO 和 SFO 组显著高于 FO 和 SO 组($P < 0.05$)。肝脏 MDA 含量最高的是

FO组(n-3 LC-PUFA, 5.18%),为(4.37±0.59) nmol/mg prot, 含量最低的是SFO组(n-3 LC-PUFA, 3.02%),为(1.48±0.28) nmol/mg prot, 各组间均存在显著差异($P<0.05$)。

2.3 银鲳幼鱼血清、肌肉和肝脏 SOD 活力

饲料大豆油替代鱼油水平对银鲳幼鱼血清、肌肉和肝脏 SOD 活力的影响见图 3、图 4。从图 3 可以看出, 血清 SOD 活力最高的是 SFO 组(n-3 LC-PUFA, 3.02%),为(50.32±6.15) U/ml, 活力最低的是 SO 组(n-3 LC-PUFA, 2.22%),为(29.81±6.60) U/ml ($P<0.05$)。从图 4 可以看出, SFO 组肌肉 SOD 活力最高,为(27.14±6.57) U/mg prot, 活力最低的为 SO 组,为(14.67±4.59) U/mg prot, SFO 组显著高于 FO 和 SO 组($P<0.05$)。肝脏 SOD 活力最高的是 FO 组(n-3 LC-PUFA, 5.18%),为(166.06±24.21) U/mg prot, 活力最低的是 SFO 组,为(52.40±4.82) U/mg prot, FO 组显著高于其他 3 组, SFO 组显著低于其他 3 组($P<0.05$)。

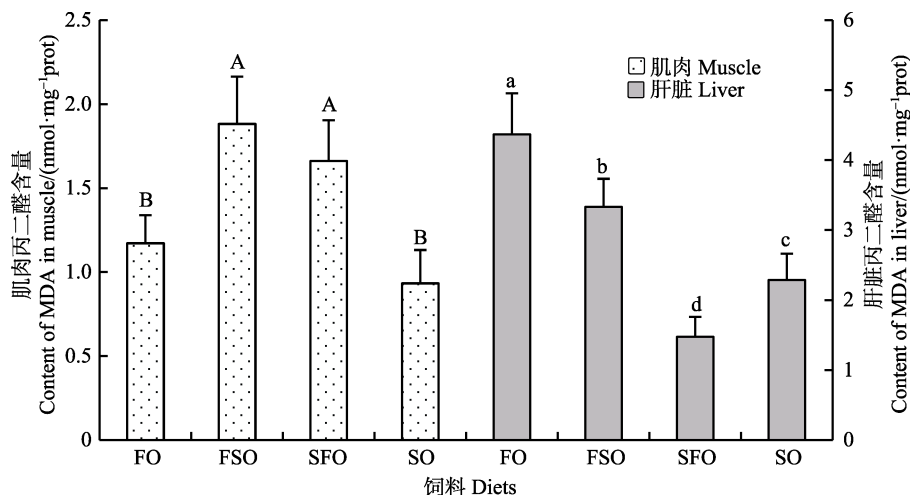


图 2 饲料中大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼肌肉和肝脏丙二醛含量的影响

Fig.2 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on MDA content in muscle and liver of juvenile *P. argenteus*

2.4 银鲳幼鱼血清、肌肉和肝脏 CAT 活力

饲料大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼血清、肌肉和肝脏 CAT 活力的影响见图 5、图 6。从图 5 可以看出, 血清 CAT 活力最高的是 SFO 组(n-3 LC-PUFA, 3.02%),为(1.79±0.25) U/ml, 最低的是 FSO 组(n-3 LC-PUFA, 4.01%),为(1.28±0.09) U/ml, SFO 组显著高于其他组($P<0.05$)。从图 6 可以看出, 肌肉 CAT 活力最高的是 SFO 组,为(0.88±0.23) U/mg prot, 最低的是 FO 组(n-3 LC-PUFA, 5.18%),为(0.36±0.10) U/mg prot, SFO 组 CAT 活力显著高于其他组($P<0.05$)。肝脏 CAT 活力最高的是 FO 组,为(1.57±0.52) U/mg prot, 最低的是 SO 组(n-3 LC-PUFA, 2.22%),为(0.41±0.09) U/mg prot, FO 组 CAT 活力显著高于其他组($P<0.05$)。

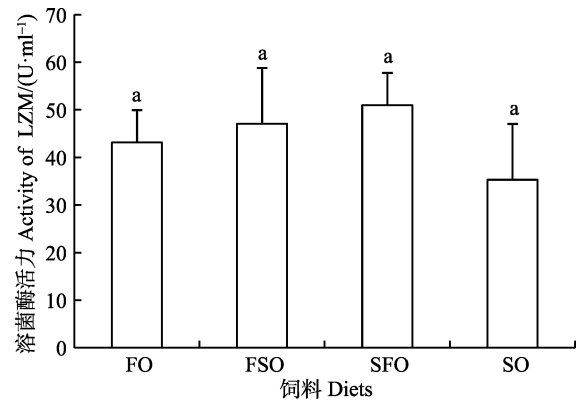


图 1 饲料中大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼血清溶菌酶活力的影响

Fig.1 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on LZM activity in serum of juvenile *P. argenteus*

不同字母表示差异显著($P<0.05$), 下同
Different letters indicated significant difference ($P<0.05$), the same as below

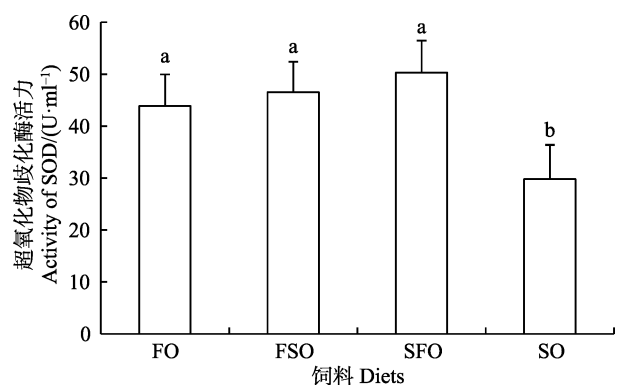


图 3 饲料中大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼血清 SOD 活力的影响

Fig.3 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on SOD activity in serum of juvenile *P. argenteus*

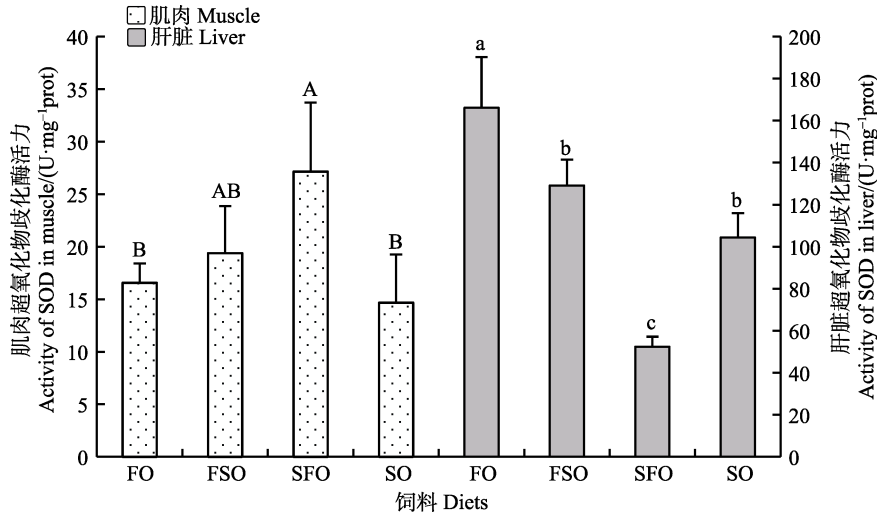


图 4 饲料中大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼肌肉和肝脏 SOD 活力的影响

Fig.4 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on SOD activity in muscle and liver of juvenile *P. argenteus*

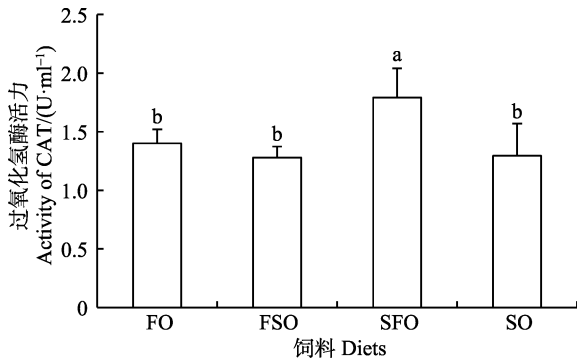


图 5 饲料中大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼血清 CAT 活力的影响

Fig.5 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on CAT activity in serum of juvenile *P. argenteus*

2.5 银鲳幼鱼血清、肌肉和肝脏 T-AOC

饲料大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼血清、肌肉和肝脏 T-AOC 影响情况见图 7、图 8。从图 7 可以看出，

血清 T-AOC 最高的是 SO 组 (n-3 LC-PUFA, 2.22%): (11.22±5.97) U/ml, 最低的是 FO 组 (n-3 LC-PUFA, 5.18%), 为 (3.37±1.17) U/ml, SO 组显著高于 FO 组 ($P < 0.05$)。从图 8 可以看出, 肌肉 T-AOC 最高的是 FSO 组 (n-3 LC-PUFA, 4.01%), 为 (0.78±0.30) U/mg prot, 最低的是 SO 组, 为 (0.41±0.08) U/mg prot, 各组间差异不显著 ($P > 0.05$)。肝脏 T-AOC 最高的是 FO 组, 为 (2.26±0.17) U/mg prot, 最低的是 SFO 组 (n-3 LC-PUFA, 3.02%), 为 (1.18±0.13) U/mg prot, FO 组显著高于 SFO 和 SO 组, SFO 则显著低于其他组 ($P < 0.05$)。

3 讨论

养殖鱼类饲料中的脂肪成分会反映在鱼肉脂肪组成上。近年来, 鱼油资源短缺使相对低廉的植物油部分替代了饲料中的鱼油成分 (Pike, 2015)。但由于大

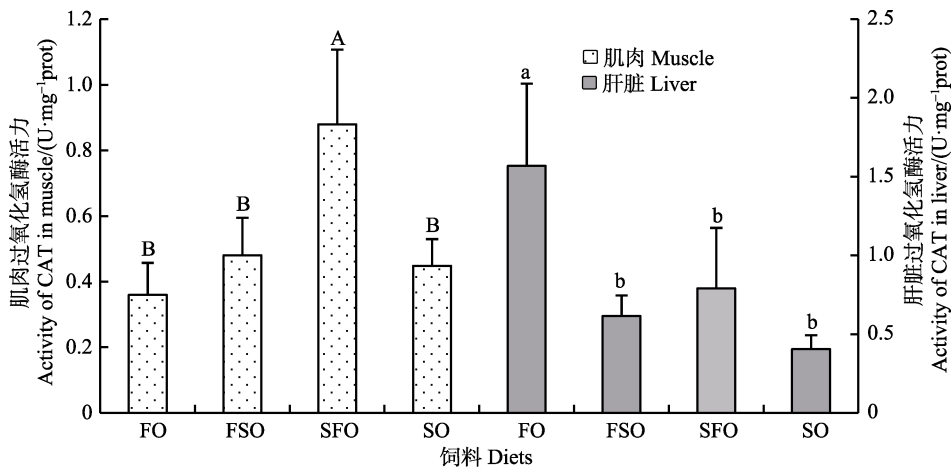


图 6 饲料中大豆油替代鱼油对银鲳幼鱼肌肉和肝脏 CAT 活力的影响

Fig.6 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on CAT activity in muscle and liver of juvenile *P. argenteus*

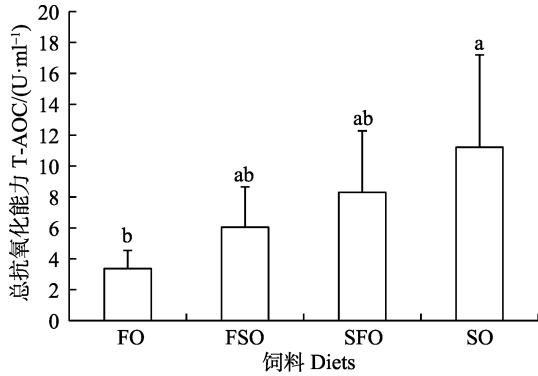


图7 饲料中大豆油替代鱼油对银鲟幼鱼血清 T-AOC 的影响

Fig.7 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on T-AOC in serum of juvenile *P. argenteus*

多数植物油中缺乏 n-3 LC-PUFA, 对一些养殖鱼类健康和鱼肉品质造成了负面影响(Zuo *et al.*, 2015)。本研究利用大豆油和鱼油不同配比作为饲料脂肪源, 通过分析血清溶菌酶、肝脏和肌肉中抗氧化指标的变化, 阐述大豆油替代鱼油对银鲟机体产生的影响。

3.1 饲料大豆油替代鱼油对银鲟幼鱼血清溶菌酶的影响

LZM 是重要的非特异性免疫因子, 主要来源于巨噬细胞, 对外源物有破坏作用, 可以反应鱼类机体对寄生虫、细菌以及病毒的抵抗能力(Reyes-Becerril *et al.*, 2014; 吕云云等, 2015)。适当的饲料营养配比能提高 LZM 水平, 增强免疫能力。梁萌青等(2005)发现, 鳀鱼(*Engraulis japonicus*)油作为脂肪源时, 维生素E的添加能显著提高大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)血清溶菌酶活性, 而大豆油则没出现这个现象, 提高 n-3 LC-PUFA 含量对脂溶性维生素吸收利用有促进

作用。杨鸾劫等(2008)发现, 在黄鳊(*Monopterus albus*)饲料中添加不同比例 PUFA, 血清溶菌酶含量有不同程度的提高。

本研究中, SFO 组的银鲟幼鱼血清 LZM 水平最高, 而 SO 组最低, FSO 和 SFO 组相对较高, 但各组差异并不显著。全鱼油组 LZM 水平不高, 可能是由于过量的 n-3 LC-PUFA 降低了鱼类免疫器官表面病原识别受体及其接头蛋白的表达所致(Zuo *et al.*, 2012)。而豆油部分替代鱼油, 对银鲟幼鱼免疫能力略有促进作用, 完全使用豆油则会对免疫能力产生负面影响。另外, 过量的 n-3 LC-PUFA 易发生过氧化反应, 超氧阴离子会攻击免疫细胞膜, 从而降低免疫性能(Gill *et al.*, 2010)。说明, 饲料维持一定的 n-3 与 n-6 配比, 对增强银鲟免疫性能有促进作用。

3.2 饲料大豆油替代鱼油对银鲟幼鱼抗氧化相关指标的影响

生物体组织中, 脂类营养特别是 PUFA 的大量聚集必然会在一定程度上引发脂质过氧化物的发生。PUFA 等脂类与氧化自由基反应时, 会引发脂质过氧化, 经分子内的环化、裂解等步骤作用, 最终降解产生 MDA, MDA 和体内脂质、蛋白质、核酸等大分子进行交错连结反应, 使鱼体清除自由基的能力降低, 进而对机体造成伤害(王奇等, 2010)。MDA 含量既可判定机体脂质过氧化程度, 也可间接反映自由基产生侵害的程度、生物活性及其抗氧化能力的强弱(Viarengo *et al.*, 1995)。

Mozanzadeh 等(2015)研究发现, 升高 n-3 LC-PUFA 水平会使矛鲷(*Sparidentex hasta*)肝脏和血清中 MDA 含量和 CAT 活力增加。本研究中, FSO

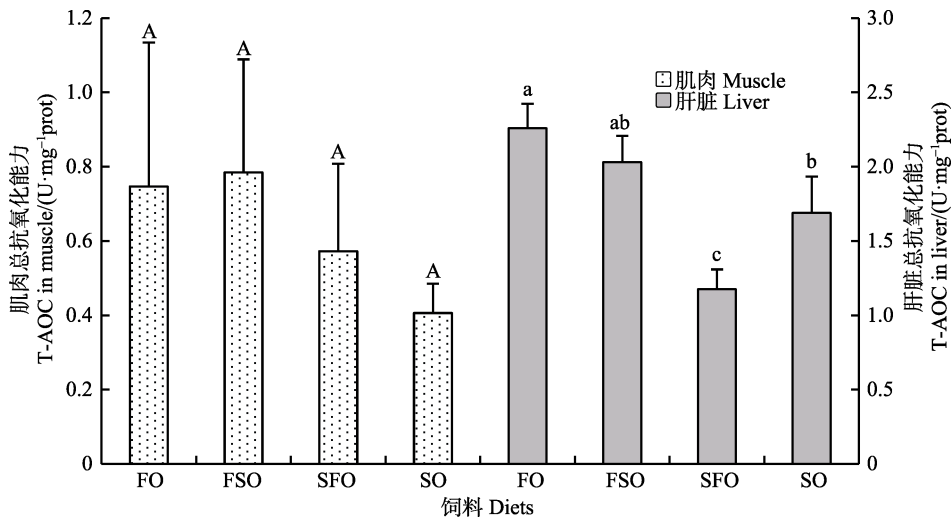


图8 饲料中大豆油替代鱼油对银鲟幼鱼肌肉和肝脏 T-AOC 的影响

Fig.8 The effects of dietary substitution of fish oil by soybean oil on T-AOC in muscle and liver of juvenile *P. argenteus*

和 SFO 组的银鲟肌肉 MDA 含量显著高于 FO 和 SO 组, 肝脏 MDA 含量则是 FO 和 FSO 组显著较高。说明, 较高的饲料 n-3 LC-PUFA 含量会使银鲟不同组织的 MDA 含量上升。

FO 组肌肉 MDA 的含量较低, 且肌肉 MDA 与 SOD、CAT 变化情况类似, 推测其原因与 FO 组肝脏 SOD、CAT 和 T-AOC 较高, 导致转运出的 MDA 量较少有关。另外, 肝脏是鱼类脂类吸收、代谢的主要器官, 营养不良会导致肝脏脂类代谢紊乱, 影响肝脏对脂类的吸收和转运(Mozanzadeh *et al.*, 2015)。Moldal 等(2014)发现, 植物油替代鱼油会对大西洋鲑(*Salmo salar*)的肠道产生不良影响, 使肠壁变薄, 粘膜褶皱变少, 同样会影响脂肪酸的吸收。而饲料脂肪酸被吸收后, 通过一些组织、器官的转运与代谢后, 其脂肪酸组成对鱼类肝脏的影响比对肌肉的影响更显著(Peng *et al.*, 2014)。

鱼类抗氧化防御系统分为酶促与非酶促两大部分, 其中, SOD 和 CAT 是 2 个重要的抗氧化酶, 它们能有效清除体内的超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)、游离氧(O)、羟自由基($-OH$)和 H_2O_2 等活性氧物质(鲁双庆等, 2002; Kanak *et al.*, 2014)。Luo 等(2012)研究发现, 适宜的饲料 LC-PUFA 含量可有效提高矛尾复鰕虎鱼(*Synechogobius hasta*)的 SOD 和 CAT 活力, 但过高含量也会在一定程度上抑制 CAT 活力。Zuo 等(2015)发现, 适宜的 PUFA n-3/n-6 值(0.5)也可以提高大黄鱼(*Pseudosciaena crocea*)肝脏的 SOD 和 CAT 活力, 若该比值高于 0.5, 则酶活力反而有所下降。

本研究中, 银鲟血清和肌肉 SOD 和 CAT 活力最高的组均为 SFO 组, 而 SO 组活力较低。相对地, 肝脏 SOD 和 CAT 活力均是 FO 组最高($P < 0.05$)。说明, 饲料中 n-3/n-6 值过高会代谢更多(如 MDA 等)副产物, 需要肝脏提高抗氧功能予以消除, 同时, 消耗更多能量与营养储备, 而 n-3/n-6 值偏低又会抑制抗氧化酶活力。因此, 饲料中适当的鱼油添加量可以保持适宜的 n-3 和 n-6 配比, 有助于银鲟幼鱼的健康养殖。

T-AOC 表示各种抗氧化大分子、抗氧化小分子和酶促体系的抗氧化能力总和, T-AOC 变化可以反映机体内自由基的代谢情况, 对判断机体的健康状况及抗氧化防御能力具有重要意义(Martinez-Álvarez *et al.*, 2005)。Villasante 等(2015)利用饲料增加虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)肌肉和肝脏 n-3 LC-PUFA 含量, 可以使血清 T-AOC 增强。适宜的饲料 n-3 LC-PUFA 含量可显著提高褐菖鲈(*Sebastes marmoratus*)机体的抗氧化能力(岳彦峰等, 2013)。本研究银鲟幼鱼肌肉和肝脏 T-AOC 均是 FO 和 FSO 组较高, 说明, 较高的饲料

n-3 LC-PUFA 含量可增强抗氧化能力, 而血清 T-AOC 在 SO 组较高, 可能与体内 MDA 含量较低, 非酶体系抗氧化能力消耗较小有关。

本研究中, FO、FSO、SFO 和 SO 组银鲟的终末体重分别为(37.84±3.82) g、(39.95±4.01) g、(34.64±3.75) g 和(26.63±2.97) g, 其他生长和营养数据另文发表。结合本研究中的 LZM 和抗氧化指标, 发现, FSO 和 SFO 组银鲟幼鱼机体状况较好, 尤其是 SFO 组 LZM 水平较高, 肌肉和肝脏 MDA 含量不高, 各项抗氧化能力指标也较强, 品质较好。考虑到鱼粉中含有一定量鱼油, 因此, 鱼油添加量多于 SFO 组(30%)少于 FSO 组(70%)效果可能较好。本研究表明, 用大豆油替代鱼油, 使饲料 n-3 LC-PUFA 含量占总脂肪酸的 18%–24%, 且 n-3 与 n-6 比例相对均衡(n3/n6 值为 1–2)时, 有利于银鲟的健康生长。

参 考 文 献

- Geay F, Wenon D, Mellery J, *et al.* Dietary linseed oil reduces growth while differentially impacting LC-PUFA synthesis and accretion into tissues in Eurasian Perch (*Perca fluviatilis*). *Lipids*, 2015, 50(12): 1219–1232
- Gill R, Tsung A, Billiar T. Linking oxidative stress to inflammation: Toll-like receptors. *Free Radical Biology and Medicine*, 2010, 48(9): 1121–1132
- Kanak EG, Dogan Z, Eroglu A, *et al.* Effects of fish size on the response of antioxidant systems of *Oreochromis niloticus* following metal exposures. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2014, 40(4): 1083–1091
- Liang MQ, Chang Q, Wang YG, *et al.* Influences of vitamin E and lipid sources on non-specific immunity of turbot (*Scophthalmus maximus* Linnaeus). *Marine Fisheries Research*, 2005, 26(5): 15–21 [梁萌青, 常青, 王印庚, 等. 维生素 E 及脂肪源对大菱鲆非特异性免疫的影响. *海洋水产研究*, 2005, 26(5): 15–21]
- Liu J, Li CS, Li XS. Studies on Chinese pomfret fishes of the genus *Pampus* (Pisces: Stromateidae). *Studia Marina Sinica*, 2002(40): 240–252 [刘静, 李春生, 李显森. 中国鲷属鱼类的分类研究. *海洋科学集刊*, 2002(40): 240–252]
- Lu SQ, Liu SJ, Liu HY, *et al.* Effects of Cu^{2+} on activities of protecting enzymes SOD, CAT and GSH-PX in liver tissue of *Monopterus albus*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2002, 9(2): 138–141 [鲁双庆, 刘少军, 刘红玉, 等. Cu^{2+} 对黄鳝肝脏保护酶 SOD、CAT、GSH-PX 活性的影响. *中国水产科学*, 2002, 9(2): 138–141]
- Lü YY, Chen SQ, Yu CL, *et al.* The effects of the ratio of dietary protein to lipid on the growth, digestive enzyme activities and blood biochemical parameters in spotted halibut, *Verasper variegates*. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(2): 118–124 [吕云云, 陈四清, 于朝磊, 等. 饲料蛋白

- 脂肪比对圆斑星鲃(*Verasper variegates*)生长、消化酶及血清生化指标的影响. 渔业科学进展, 2015, 36(2): 118–124]
- Luo Z, Tan XY, Li XD, *et al.* Effect of dietary arachidonic acid levels on growth performance, hepatic fatty acid profile, intermediary metabolism and antioxidant responses for juvenile *Synechogobius hasta*. Aquaculture Nutrition, 2012, 18(3): 340–348
- Martinez-Álvarez RM, Morales AE, Sanz A. Antioxidant defenses in fish: Biotic and abiotic factors. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2005, 15(1): 75–88
- Mei L, Zhou HH, Mai KS, *et al.* Effects of dietary substitution of fishmeal by fermented silkworm pupae on the growth, feed intake, digestion and immunity of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.). Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(3): 85–92 [梅琳, 周慧慧, 麦康森, 等. 蛹肽蛋白替代鱼粉对大菱鲆(*Scophthalmus maximus* L.)幼鱼生长、饲料利用、消化代谢酶及免疫性能的影响. 渔业科学进展, 2015, 36(3): 85–92]
- Moldal T, Løkka G, Wiik-Nielsen J, *et al.* Substitution of dietary fish oil with plant oils is associated with shortened mid intestinal folds in Atlantic salmon (*Salmo salar*). BMC Veterinary Research, 2014(10): 60
- Mozanzadeh MT, Marammazi JG, Yavari V, *et al.* Dietary n-3 LC-PUFA requirements in silvery-black porgy juveniles (*Sparidentex hasta*). Aquaculture, 2015, 448: 151–161
- Peng SM, Shi ZH, Fei Y, *et al.* Effect of high-dose vitamin C supplementation on growth, tissue ascorbic acid concentrations and physiological response to transportation stress in juvenile silver pomfret, *Pampus argenteus*. Journal of Applied Ichthyology, 2013, 29(6): 1337–1341
- Peng SM, Shi ZH, Sun P, *et al.* Effects of breeding density on the growth and tissues biochemical indices of juvenile silver pomfret (*Pampus argenteus*). Chinese Journal of Ecology, 2010a, 29(7): 1371–1376 [彭士明, 施兆鸿, 孙鹏, 等. 养殖密度对银鲳幼鱼生长及组织生化指标的影响. 生态学杂志, 2010a, 29(7): 1371–1376]
- Peng SM, Yin F, Sun P, *et al.* Effects of different diets on weight gain, hepatic lipase and antioxidant enzyme of juvenile silver pomfret (*Pampus argenteus*). Journal of Fisheries of China, 2010b, 34(6): 769–774 [彭士明, 尹飞, 孙鹏, 等. 不同饲料对银鲳幼鱼增重率、肝脏脂酶及抗氧化酶活性的影响. 水产学报, 2010b, 34(6): 769–774]
- Peng SM, Yue YF, Gao QX, *et al.* Influence of dietary n-3 LC-PUFA on growth, nutritional composition and immune function in marine fish *Sebastes marmoratus*. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(5): 1000–1008
- Pike IH. Fish oil: Supply and demand as a source of long-chain n-3 polyunsaturated fatty acids in the human diet. European Journal of Lipid Science and Technology, 2015, 117(6): 747–750
- Reyes-Becerril M, Asencio F, Gracia-Lopez V, *et al.* Single or combined effects of *Lactobacillus sakei* and inulin on growth, non-specific immunity and IgM expression in leopard grouper (*Mycteroperca rosacea*). Fish Physiology and Biochemistry, 2014, 40(4): 1169–1180
- Shi ZH, Peng SM, Wang JG, *et al.* Observation of embryonic, larval and juvenile development in *Pampus argenteus* offspring. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(2): 267–274 [施兆鸿, 彭士明, 王建钢, 等. 人工养殖银鲳子代胚胎发育及仔稚幼鱼形态观察. 中国水产科学, 2011, 18(2): 267–274]
- Sun PF, Dai FQ, Chen YL, *et al.* Seasonal variations in structure of fishery resource in the Yangtze River estuary and its adjacent waters. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(6): 8–16 [孙鹏飞, 戴芳群, 陈云龙, 等. 长江口及其邻近海域渔业资源结构的季节变化. 渔业科学进展, 2015, 36(6): 8–16]
- Tian JJ, Lei CX, Ji H, *et al.* Effects of dietary linoleic acid (18:2n-6) and α -linolenic acid (18:3n-3) ratio on the growth performance and health status of *Cyprinus Carpio* Songpu mirror. Freshwater Fisheries, 2015, 45(5): 76–82 [田晶晶, 雷彩霞, 吉红. 饲料亚油酸/亚麻酸比率对松江鲈生长和健康状况的影响. 淡水渔业, 2015, 45(5): 76–82]
- Turchini GM, Torstensen BE, Wing-Keong N. Fish oil replacement in finfish nutrition. Reviews in Aquaculture, 2009(1): 10–57
- Viarengo A, Canesi L, Garcia Martinez P, *et al.* Pro-oxidant processes and antioxidant defence systems in the tissues of the Antarctic scallop (*Adamussium colbecki*) compared with the Mediterranean scallop (*Pecten jacobaeus*). Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 1995, 111(1): 119–126
- Villasante A, Patro B, Chew B, *et al.* Dietary intake of purple corn extract reduces fat body content and improves antioxidant capacity and n-3 polyunsaturated fatty acid profile in plasma of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. Journal of the World Aquaculture Society, 2015, 46(4): 381–394
- Wang Q, Fan CP, Chen KC, *et al.* Effects of three typical sulfonamides on GST activity and MDA content in liver tissue of *Oreochromis niloticus*. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(5): 1014–1019 [王奇, 范灿鹏, 陈锬慈, 等. 三种磺胺类药物对罗非鱼肝脏组织中谷胱甘肽转移酶(GST)和丙二醛(MDA)的影响. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1014–1019]
- Xie D, Wang S, You C, *et al.* Characteristics of LC-PUFA biosynthesis in marine herbivorous teleost *Siganus canaliculatus* under different ambient salinities. Aquaculture Nutrition, 2015, 21(5): 541–551
- Xie DZ, Chen F, Zhang QH, *et al.* Advance in the regulatory mechanisms of LC-PUFA biosynthetic metabolism of teleost. Journal of Shantou University (Natural Science), 2015, 30(2): 3–19 [谢帝芝, 陈芳, 张庆昊, 等. 鱼类 LC-PUFA 合成代谢调控机制研究进展. 汕头大学学报(自然科学版), 2015, 30(2): 3–19]
- Yang YJ, Bing XW, Xu ZH. Effects of unsaturated fatty acids on the growth and immunity indices of *Monopterus albus*. Journal of Anhui Agricultural University, 2008, 35(2): 224–228 [杨鸢劫, 邴旭文, 徐增洪. 不饱和脂肪酸对黄鳝生长及免疫指标的影响. 安徽农业大学学报, 2008, 35(2): 224–228]
- Yue YF, Peng SM, Shi ZH, *et al.* Effects of dietary n-3 HUFA

levels on serum biochemistry indices, main lipid metabolism enzyme activities and antioxidant ability of *Sebastes marmoratus*. Marine Fisheries, 2013, 35(4): 460–467 [岳彦峰, 彭士明, 施兆鸿, 等. 饲料 n-3 HUFA 水平对褐菖鲉血清生化指标、主要脂代谢酶活力及抗氧化能力的影响. 海洋渔业, 2013, 35(4): 460–467]

Zuo RT, Ai QH, Mai KS, *et al.* Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth, nonspecific immunity, expression of some immune related genes and disease resistance of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) following natural infestation of parasites (*Cryptocaryon irritans*). Fish

and Shellfish Immunology, 2012, 32(2): 249–258

Zuo RT, Mai KS, Xu W, *et al.* Advance of studies on the effects of fatty acids on immune responses and nutritional regulation mechanism in fish species. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(7): 1079–1088 [左然涛, 麦康森, 徐玮, 等. 脂肪酸对鱼类免疫系统的影响及调控机制研究进展. 水产学报, 2015, 39(7): 1079–1088]

Zuo RT, Mai KS, Xu W, *et al.* Dietary ALA, but not LNA, increase growth, reduce inflammatory processes, and increase anti-oxidant capacity in the marine finfish *Larimichthys crocea*. Lipids, 2015, 50(2): 149–163

(编辑 马瑾艳)

Effects of Dietary Substitution of Fish Oil by Soybean Oil on the Serum Lysozyme Activity and Tissue Antioxidant Capacity in Juvenile Silver Pomfret (*Pampus argenteus*)

ZHANG Chenjie, PENG Shiming, GAO Quanxin, SHI Zhaohong^①, WANG Jiangang

(Key Laboratory for East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090)

Abstract Long-chain polyunsaturated fatty acids (LC-PUFA) are essential fatty acids (EFA) and have important roles in growth, development and physiological function of fish. Fish oil is characterized by high content of n-3 LC-PUFA, but harvesting fish oil is controversial due to limited wild fish stock and increased production cost. Silver pomfret (*Pampus argenteus*) is an important economic species in coastal areas of China. There are many problems in the technological development of artificial breeding and aquaculture for silver pomfret. For the purpose of researching and developing artificial feed, reducing feed cost, improving fish health and survival rate, in this study, 4 experimental dietary groups were designed for the feeding trial: 100% fish oil (FO), 70% fish oil and 30% soybean oil (FSO), 30% fish oil and 70% soybean oil (SFO), and 100% soybean oil (SO). To explore the effect of substitution of dietary fish oil by soybean oil on silver pomfret, serum lysozyme (LZM) activity and tissue antioxidant capacity were measured. The results suggested that serum LZM activities were the highest in SFO group, and the lowest in SO group, although no significant difference was detected ($P>0.05$). Muscle malondialdehyde (MDA) contents of FSO and SFO group were significantly higher than that of FO and SO group ($P<0.05$). Liver MDA contents in FO and FSO groups were significantly higher than that of any other groups ($P<0.05$). The highest superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities of serum and muscle were in SFO group. By contrast, SO group had lower SOD and CAT activities than any other groups. The liver SOD and CAT activities were found significantly higher in FO group than other groups ($P<0.05$). T-AOC of muscle and liver in FO and FSO were higher than other groups, and group SO had the highest serum T-AOC. This experiment suggested that replacing dietary fish oil by soybean oil for 30% or 70% can promote immune and antioxidant function of juvenile silver pomfret. But replacing dietary fish oil by 100% soybean oil had negative effect on immunity and growth of silver pomfret.

Key words LC-PUFA; Silver pomfret; Liver; Muscle; Antioxidant

① Corresponding author: SHI Zhaohong, E-mail: shizh@eastfishery.ac.cn