

# 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼生长性能、血清生化指标及肝脏脂肪酸组成、脂肪代谢相关指标的影响

吴美焕<sup>1,2</sup> 安文强<sup>1,2</sup> 董晓慧<sup>1,2\*</sup> 谭北平<sup>1,2</sup> 章 双<sup>1,2</sup>

欧光海<sup>1</sup> 苏泳霖<sup>1</sup> 李雨春<sup>1</sup> 梁胜凯<sup>1</sup>

(1.广东海洋大学水产学院,湛江 524088;2.广东海洋大学水产动物营养与饲料实验室,湛江 524088)

**摘 要:** 本试验旨在研究饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼生长性能、血清生化指标及肝脏脂肪酸组成、脂肪代谢相关指标的影响。挑选 450 尾体格健壮、大小均匀、平均体重为(17.67±0.03) g 的珍珠龙胆石斑鱼鱼苗,随机分为 5 组,每组 3 个重复,每个重复 30 尾鱼。各组分别投喂以鱼油(FO)、豆油(SO)、亚麻籽油(LO)、菜籽油(RO)、花生油(PO)为脂肪源配制的 5 种等氮(粗蛋白质约 49%)、等脂(粗脂肪约 11%)试验饲料,试验期 8 周。结果表明:1)FO 组和 LO 组的增重率(WGR)、特定生长率(SGR)显著高于 PO 组( $P<0.05$ )。2)RO 组的肝脏 C18:1 含量最高,显著高于其他各组( $P<0.05$ );SO 组的肝脏 C18:2n-6 含量显著高于除 PO 组外的其他各组( $P<0.05$ );FO 组的肝脏 C20:5n-3、C22:6n-3 含量显著高于其他各组( $P<0.05$ )。3)PO 组的血清甘油三酯(TG)含量显著高于其他各组( $P<0.05$ );FO 组的血清超氧化物酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性最高,显著高于其他各组( $P<0.05$ )。4)LO 组的肝脏谷草转氨酶(AST)活性显著低于 SO 组( $P<0.05$ ),谷丙转氨酶(ALT)活性显著高于 FO 组和 RO 组( $P<0.05$ ),总抗氧化能力(T-AOC)显著低于 FO 组和 PO 组( $P<0.05$ )。FO 组的肝脏脂肪酸合成酶(FAS)活性显著高于除 LO 组外的其他各组( $P<0.05$ ),LO 组的肝脏肉碱脂酰转移酶 1(CPT-1)活性显著高于 PO 组( $P<0.05$ )。综上所述,饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼的生长性能、血清生化指标及肝脏脂肪酸组成、脂肪代谢相关指标均有一定的影响。FO 组和 LO 组的生长性能相对较好,而 SO 组和 RO 组次之,SO、LO、RO 可以作为珍珠龙胆石斑鱼饲料中良好的植物油源。

**关键词:** 珍珠龙胆石斑鱼;脂肪源;生长性能;血清生化指标;脂肪代谢

中图分类号:S963.1

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2020)03-1315-12

脂肪是鱼类所需能量的主要来源,为鱼类提供自身不能合成的必需脂肪酸(EFA),是鱼体细胞膜结构的重要组成部分,可促进鱼类的生长和发育,在吸收、转输和代谢类胡萝卜素及脂溶性维生素等脂溶性营养物质中发挥核心作用<sup>[1-3]</sup>。大

多数动物不能从头合成 n-3 和 n-6 系列多不饱和脂肪酸(PUFA),必需来源于食物或食物中存在的前体物<sup>[4]</sup>。

鱼油(fish oil, FO)是水产动物饲料中主要的脂肪来源,含有大量长链多不饱和脂肪酸(LC-PU-

收稿日期:2019-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目(31972808);广东大学生科技创新培育专项基金(pdjh2019a0228);广东海洋大学“冲一流”省财政专项(231419011);现代农业产业技术体系专项(CARS-47)

作者简介:吴美焕(1997—),女,广东茂名,本科生,研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 873163708@qq.com

\*通信作者:董晓慧,教授,博士生导师,E-mail: dongxiaohui2003@163.com

FA),特别是二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA),可满足海水鱼类对必需脂肪酸的需求,对其正常繁殖、生长、发育、脂肪代谢和机体免疫起着至关重要的作用<sup>[5-6]</sup>。FO能值高,添加FO易配成高能饲料,可起到节约蛋白质作用,并降低饲料成本。但现今过度捕捞导致全球渔业资源枯竭,有限的FO输出无法满足水产饲料工业对FO与日俱增的需求,与其他油源相比,FO较高的价格使得水产饲料成本逐渐增加<sup>[3,7]</sup>,于是寻找适宜的油源替代FO已经成为当前饲料行业和鱼类营养学家最关注的热点之一。植物油是从植物的果实、种子、胚芽中得到的油脂,如豆油(soybean oil, SO)、菜籽油(rapeseed oil, RO)等,其含有饱和脂肪酸(SFA)、单不饱和脂肪酸(MUFA)、亚油酸(LA)和 $\alpha$ -亚麻酸(ALA)等,价格稳定,来源广泛,易于获取和储存,全球的植物油产量约是FO的100倍,供应几乎没有限制,这使得它们成为可持续的FO替代品<sup>[8-9]</sup>。

近年来,人们进行了许多研究以评估用植物油部分或完全替代FO对养殖鱼类的影响。已有报道表明,植物油部分替代FO可减少大西洋鲑鱼(*Salmo salar*)鱼肉中二噁英(dioxin)和多氯联苯(dioxin-like polychlorinated biphenyls)含量<sup>[10]</sup>。植物油混合物完全替代FO不影响虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)的生长,可降低血浆胆固醇和低密度脂蛋白(LDL)含量<sup>[11]</sup>。摄食植物油部分或完全替代FO饲料的大菱鲆(*Psetta maxima*)<sup>[12-13]</sup>、金头鲷(*gilthead seabream*)<sup>[14]</sup>和尖吻鲈(*Lates calcarifer*)<sup>[15]</sup>均取得了较好的特定生长率(SGR)、成活率(SR)和饲料系数(FCR)。但也有研究表明饲料脂肪源可显著影响大菱鲆的增重率(WGR)、SGR和蛋白质效率(PER)<sup>[16]</sup>,影响金头鲷脂代谢关键酶活性及基因表达<sup>[17]</sup>。此外,也有研究发现混合植物油代替60%的FO不影响金头鲷的健康,但单一植物油代替60%的FO则可引起金头鲷免疫抑制或抗应激能力的变化;其中,RO降低了金头鲷头肾巨噬细胞活性,SO降低了血清补体替代途径相关酶活性,亚麻籽油(linseed oil, LO)提高了应激后血浆皮质醇含量<sup>[18]</sup>。

珍珠龙胆石斑鱼是鞍带石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus*, ♂)与棕点石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus*, ♀)杂交培育出来的新品种石斑鱼,具有生长速度快、抗病力强、肉质细嫩等特点,深受

养殖户和消费者的喜爱,拥有巨大的市场前景<sup>[19]</sup>,养殖规模逐年扩大,目前已成为石斑鱼养殖的第一品种。珍珠龙胆石斑鱼在脂肪方面的营养学研究刚刚起步,有研究表明,粗蛋白质含量为50%、粗脂肪含量为14%、蛋能比为23.9 mg/kJ的饲料可促进其快速生长<sup>[20]</sup>。饲料中共轭亚油酸(CLA)添加量为0~3.2%时,其FCR呈降低趋势,CLA添加量为2.4%时达到最低<sup>[21]</sup>。饲料中适宜水平(0.35%~0.66%)的花生四烯酸(ARA)能促进珍珠龙胆石斑鱼的生长,提高抗氧化能力和肝脏健康水平<sup>[22]</sup>。但迄今为止,少有FO和植物油脂的比较研究。因此,本试验拟研究饲料中不同脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼生长性能、肝脏脂肪酸组成、血清生化指标及脂肪代谢相关酶活性的影响,以期为植物油替代FO的可行性、确定植物油替代FO的适宜比例、研制石斑鱼资源节约型和环境友好型精准配合饲料奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验饲料

以白鱼粉、豆粕、小麦谷朊粉为主要蛋白质源,并分别以FO、SO、LO、RO、花生油(peanut oil, PO)为脂肪源,配制成5种等氮(粗蛋白质约49%)、等脂(粗脂肪约11%)的试验饲料,试验饲料组成及营养水平见表1,试验饲料脂肪酸组成见表2。所有原料粉碎后过60目筛,按照配方准确称取并混合均匀,然后分别加入5种脂肪源,手工搓散油脂粒后放入V型立式混合机中混合。缓慢加入所配饲料质量25%~30%的水后再次混匀,用F-26型双螺杆挤条机(华南理工大学)加工成粒径分别为2.0和2.5 mm的颗粒饲料,室温下风干至水分含量约为10%,封口袋分装并于-20℃冰箱储存备用。

### 1.2 试验设计与饲养管理

试验鱼苗购自广东省湛江市东南码头某石斑鱼苗厂,购回后于4.5 m×4.9 m×1.8 m的室外水泥池中暂养至试验规格,分组前1周投喂基础饲料。养殖试验在广东海洋大学海洋生物研究基地室内海水养殖系统中进行。鱼苗禁食24 h后分组,根据试验设计,挑选450尾体格健壮、大小均匀、平均体重为(17.67±0.03) g的鱼苗,随机分为5组,每组3重复,每重复1个0.5 m<sup>3</sup>的玻璃钢桶,每桶放30尾鱼,养殖期8周。每天表观饱食投喂

2次(08:00和17:00),日投喂量约为石斑鱼体重的3%~5%,根据天气和摄食情况调整投喂量。养殖期间不间断充气,每天换水1次,每次50%。养殖期间水温28~30℃,溶氧浓度5~6 mg/L,盐度21~24。

表1 试验饲料组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)

%

项目 Items	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
原料 Ingredients					
白鱼粉 White fish meal	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
豆粕 Soybean meal	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
小麦谷朊粉 Wheat gluten	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
面粉 Wheat flour	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00
大豆卵磷脂 Soybean lecithin	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
鱼油 Fish oil	5.00				
豆油 Soybean oil		5.00			
亚麻籽油 Linseed oil			5.00		
菜籽油 Rapeseed oil				5.00	
花生油 Peanut oil					5.00
维生素预混料 Vitamin premix <sup>1)</sup>	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
矿物质预混料 Mineral premix <sup>2)</sup>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
磷酸二氢钙 Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
乙氧基喹啉 Ethoxyquin	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
诱食剂 Attractant	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
氯化胆碱 Choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels <sup>3)</sup>					
水分 Moisture	9.44	9.03	8.77	9.06	9.42
粗蛋白质 Crude protein	48.97	49.32	49.33	49.04	49.32
粗脂肪 Crude lipid	10.64	10.50	10.79	11.23	10.83
粗灰分 Ash	11.12	11.18	11.02	11.1	10.91

1) 每千克维生素预混料含有 Contained the following per kg of the vitamin premix: VA 10.00 g, VD<sub>3</sub> 50.00 g, VE 99.00 g, VK<sub>3</sub> 5.00 g, VB<sub>1</sub> 25.50 g, VB<sub>2</sub> 25.00 g, VB<sub>6</sub> 50.00 g, VB<sub>12</sub> 0.10 g, 泛酸钙 calcium pantothenate 61.00 g, 烟酸 nicotinic acid 101.00 g, 生物素 biotin 2.50 g, 肌醇 inositol 153.06 g, 叶酸 folic acid 6.25 g, 纤维素 cellulose 411.59 g。

2) 每千克矿物质预混料含有 Contained the following per kg of the mineral premix: KIO<sub>4</sub> 0.03 g, CoCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O 4.07 g, CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O 19.84 g, FeC<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> 13.71 g, ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 28.28 g, MnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.12 g, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 80.00 g, MgSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O 12.43 g, KCl 15.33 g, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 2.00 g, 沸石粉 zeolite power 824.19 g。

3) 实测值 Measured value。

表2 试验饲料脂肪酸组成(占总脂肪酸的百分比)

Table 2 Fatty acid composition of experimental diets (percentage of total fatty acids)

%

脂肪酸 Fatty acids	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
C14:0	1.40	0.85	0.99	0.84	0.75
C16:0	15.10	14.31	13.90	10.69	13.95
C18:0	4.97	4.36	4.03	3.07	3.89

续表 2

脂肪酸 Fatty acids	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
C20:0	0.43	0.33	0.25	0.46	1.03
ΣSFA	21.90	19.85	19.17	15.06	19.62
C16:1	2.91	1.16	1.23	1.22	1.13
C18:1	22.91	20.77	20.51	41.83	35.70
ΣMUFA	25.82	21.93	21.74	43.05	36.82
C18:2n-6 (LNA)	18.21	43.51	30.85	25.93	31.16
C20:4n-6 (ARA)	1.31	0.21	0.20	0.20	0.19
Σn-6 PUFA (LNA+ARA)	19.52	43.72	31.05	26.13	31.35
C18:3n-3 (ALA)	2.86	5.92	20.03	5.41	1.60
C20:5n-3 (EPA)	13.41	3.16	3.10	3.03	3.06
C22:6n-3 (DHA)	10.33	2.85	2.77	2.74	2.62
Σn-3 HUFA (EPA+DHA)	23.74	6.01	5.87	5.77	5.68
Σn-3 PUFA (ALA+EPA+DHA)	26.60	11.93	25.89	11.18	7.27
n-3/n-6 PUFA	1.36	0.27	0.83	0.43	0.23
DHA/EPA	0.77	0.90	0.89	0.90	0.86

SFA:饱和脂肪酸 saturated fatty acids; MUFA:单不饱和脂肪酸 monounsaturated fatty acids; PUFA:多不饱和脂肪酸 polyunsaturated fatty acids; n-3PUFA: n-3 多不饱和脂肪酸 n-3 polyunsaturated fatty acids; n-6PUFA: n-6 多不饱和脂肪酸 n-6 polyunsaturated fatty acids; LNA:亚麻酸 linolenic acid; ARA:花生四烯酸 arachidonic acid; ALA:α-亚麻酸 α-linolenic acid; EPA:二十碳五烯酸 eicosapentaenoic acid; DHA:二十二碳六烯酸 docosahexaenoic acid。表 5 同。The same as Table 5.

### 1.3 样品采集与分析方法

#### 1.3.1 样品采集

养殖试验结束禁食 24 h 后,每桶鱼丁香酚麻醉后称重、记数,以计算生长指标。每桶随机取 3 尾鱼测定体长、体重,以计算肥满度 (CF);然后用封口袋进行分装,置于-20 °C 冰箱保存,用于全鱼常规成分分析。每桶再随机取 3 尾鱼称重后剖取并称量肝脏和内脏团,以计算肝体比 (HSI)、脏体比 (VSI)。将肝脏保存于-80 °C 冰箱中备测脂肪酸含量等指标。每桶随机取 6 尾鱼采血,血液合并于 1.5 mL 离心管中,于 4 °C 冰箱静置过夜后 4 000 r/min 离心 15 min,取上清液置于-80 °C 冰箱,备测血清生化指标。

#### 1.3.2 饲料、全鱼常规营养成分的测定

饲料、全鱼常规营养成分的测定采用 AOAC (1995)<sup>[23]</sup> 方法进行。水分含量采用 105 °C 烘干恒重法测定,粗蛋白质含量采用凯氏定氮法测定,粗脂肪含量采用索氏提取法测定(抽提剂为石油醚),粗灰分含量采用 550 °C 马弗炉灼烧法测定。

#### 1.3.3 饲料及肝脏脂肪酸含量测定

饲料及肝脏脂肪酸含量测定方法参照 Qiu 等<sup>[6]</sup> 方法进行。称取约 100 mg 样品放入带盖的

玻璃管中,加入 3 mL 氢氧化钾甲醇溶液 (1 mol/L),于 72 °C 水浴 20 min,冷却至室温后加入 3 mL 氯化氢甲醇溶液 (2 mol/L),于 72 °C 水浴 20 min,冷却至室温后加入 1 mL 正己烷(色谱级),轻轻震荡并室温放置 8 h,使下层的脂肪酸甲酯充分并萃取到正己烷中。小心吸取上层正己烷和脂肪酸甲酯的混合物,5 000 r/min 离心 2 min 后,用微量进样器吸取 1.1 μg 注入气相色谱仪中,色谱柱为石英毛细管柱,采用火焰电离检测器,柱温首先以 15 °C/min 的速度由 150 °C 升高 200 °C,之后以 2 °C/min 的速度缓慢升至 250 °C。

#### 1.3.4 血清生化指标的测定

血清甘油三酯 (TG)、总胆固醇 (TC)、低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C)、葡萄糖 (GLU) 含量采用试剂盒 (南京建成生物工程研究所) 测定;血清超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px)、溶菌酶 (LZM) 活性及补体 3 (C3) 含量采用酶联免疫吸附测定 (ELISA) 试剂盒 (上海莱生物科技有限公司) 测定。测定方法均参照说明书进行。

### 1.3.5 肝脏脂肪代谢相关指标的测定

肝脏前处理参照 Richard 等<sup>[11]</sup>方法进行。肝脏 TG、丙二醛 (MDA) 含量和谷草转氨酶 (AST)、谷丙转氨酶 (ALT)、SOD、脂肪酸合成酶 (FAS)、肉碱脂酰转移酶 1 (CPT-1)、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶 (G6PD) 及总抗氧化能力 (T-AOC) 采用 ELISA 试剂盒 (上海江莱生物科技有限公司) 测定。测定方法参照说明书进行。

### 1.3.6 计算公式

$$WGR(\%) = 100 \times (\text{终末体重} - \text{初始体重}) / \text{初始体重};$$

$$SGR(\%/d) = 100 \times (\ln \text{终末体重} - \ln \text{初始体重}) / \text{试验天数};$$

$$SR(\%) = 100 \times \text{试验结束时鱼尾数} / \text{试验开始时鱼尾数};$$

$$FCR = \text{摄食干饲料总重} / (\text{终末体重} - \text{初始体重});$$

$$CF(\text{g}/\text{cm}^3) = 100 \times \text{体湿重} / \text{体长}^3;$$

$$HSI(\%) = 100 \times \text{肝脏湿重} / \text{体重};$$

$$VSI(\%) = 100 \times \text{内脏团湿重} / \text{体重}.$$

## 1.4 数据处理

试验数据采用“平均值±标准差”表示。采用 SPSS 24.0 软件对所得数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)。若数据存在显著性差异,则进行 Turkey's 多重比较,  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果

### 2.1 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼生长性能的影响

由表 3 可见, FO 组和 LO 组的 WGR、SGR 显著高于 PO 组 ( $P < 0.05$ ), SO 组与除 FO 组外的其他各组的 WGR 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。PO 组的 HSI 和 VSI 显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ ), 其他各组间无显著差异 ( $P > 0.05$ ); PO 组的 FCR 显著高于 FO 组 ( $P < 0.05$ ), 与其他各组无显著差异 ( $P > 0.05$ )。各组之间的 SR 和 CF 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 3 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼生长性能的影响

Table 3 Effects of dietary lipid sources on growth performance of *Epinephelus lanceolatus* × *Epinephelus fuscoguttatus*

项目 Items	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
初重 Initial weight/g	17.67±0.01	17.67±0.04	17.68±0.02	17.68±0.02	17.64±0.05
末重 Final weight/g	79.96±6.63 <sup>c</sup>	65.06±1.96 <sup>ab</sup>	73.80±2.16 <sup>bc</sup>	68.91±2.46 <sup>ab</sup>	61.60±4.83 <sup>a</sup>
增重率 WGR/%	352.51±37.59 <sup>c</sup>	268.24±11.33 <sup>ab</sup>	317.47±11.89 <sup>bc</sup>	289.75±14.08 <sup>ab</sup>	249.22±26.55 <sup>a</sup>
特定生长率 SGR/(%/d)	2.79±0.15 <sup>c</sup>	2.41±0.06 <sup>ab</sup>	2.65±0.05 <sup>bc</sup>	2.52±0.07 <sup>abc</sup>	2.31±0.14 <sup>a</sup>
成活率 SR/%	99.17±1.67	96.67±2.72	98.33±1.92	98.33±1.92	98.33±1.92
饲料系数 FCR	0.97±0.13 <sup>a</sup>	1.15±0.08 <sup>ab</sup>	1.12±0.04 <sup>ab</sup>	1.15±0.05 <sup>ab</sup>	1.29±0.08 <sup>b</sup>
肥满度 CF/(g/cm <sup>3</sup> )	2.86±0.83	2.33±0.13	2.67±0.20	2.80±0.20	2.68±0.30
肝体比 HSI/%	4.64±0.23 <sup>a</sup>	4.25±0.07 <sup>a</sup>	4.42±0.15 <sup>a</sup>	4.38±0.18 <sup>a</sup>	5.03±0.19 <sup>b</sup>
脏体比 VSI/%	12.29±0.05 <sup>a</sup>	11.51±0.22 <sup>a</sup>	11.72±0.49 <sup>a</sup>	11.92±0.20 <sup>a</sup>	13.23±0.31 <sup>b</sup>

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 相同或无字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ( $P < 0.05$ ), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ( $P > 0.05$ ). The same as below.

### 2.2 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼全鱼常规成分和肝脏脂肪酸组成的影响

由表 4 可见, 各组之间的全鱼水分、粗蛋白质、粗脂肪和粗灰分含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

由表 5 可见, 各组的肝脏总 SFA、C14:0、C16:0 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。RO 组的肝脏 C18:1 含量最高, 显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ ),

LO 组最低。SO 组的肝脏 C18:2n-6 含量显著高于除 PO 组外的其他各组 ( $P < 0.05$ ), 而 PO 组显著高于 FO 组 ( $P < 0.05$ )。LO 组的肝脏 C18:3n-3 含量显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ ), 且 SO 组和 RO 组显著高于 FO 组和 PO 组 ( $P < 0.05$ )。FO 组的肝脏 EPA、DHA 含量显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ ), 且 RO 组和 PO 组的肝脏 DHA 含量显著高于 SO 组和 LO 组 ( $P < 0.05$ )。

表4 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼全鱼常规成分的影响(风干基础)

Table 4 Effects of dietary lipid sources on whole body conventional components of *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus* (air-dry basis)

%

项目 Items	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
水分 Moisture	71.45±1.22	71.84±0.61	70.35±0.12	70.79±0.42	71.91±0.89
粗蛋白质 CP	60.43±2.44	55.89±3.83	56.61±3.19	59.20±0.18	58.80±3.05
粗脂肪 EE	22.92±0.86	23.13±1.19	25.00±2.74	25.18±1.26	23.02±1.07
粗灰分 Ash	15.85±0.34	16.92±1.08	16.42±1.16	16.37±0.24	17.41±0.27

表5 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼肝脏脂肪酸组成的影响(占总脂肪酸的百分比)

Table 5 Effects of dietary lipid sources on liver fatty acid composition of *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus* (percentage of total fatty acids)

%

脂肪酸 Fatty acids	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
C14:0	2.29±0.22	2.34±0.07	2.89±0.45	2.13±0.39	2.16±0.31
C16:0	21.71±1.43	21.66±0.24	23.26±3.67	19.21±2.98	21.55±2.35
C18:0	5.38±0.62 <sup>ab</sup>	4.97±0.15 <sup>ab</sup>	6.37±0.89 <sup>b</sup>	4.42±0.41 <sup>a</sup>	5.01±0.93 <sup>ab</sup>
C20:0	0.25±0.03 <sup>a</sup>	0.22±0.02 <sup>a</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>	0.25±0.04 <sup>a</sup>	0.44±0.05 <sup>b</sup>
ΣSFA	29.62±1.89	29.19±0.44	32.73±4.96	26.02±3.80	29.15±3.29
C16:1	3.83±0.16 <sup>c</sup>	3.25±0.05 <sup>b</sup>	3.02±0.08 <sup>b</sup>	2.35±0.03 <sup>a</sup>	2.37±0.09 <sup>a</sup>
C18:1	23.96±0.16 <sup>b</sup>	23.00±0.37 <sup>ab</sup>	22.05±0.62 <sup>a</sup>	35.06±0.56 <sup>d</sup>	30.56±1.28 <sup>c</sup>
ΣMUFA	27.79±0.32 <sup>b</sup>	26.25±0.36 <sup>ab</sup>	25.06±0.59 <sup>a</sup>	37.41±0.54 <sup>d</sup>	32.93±1.31 <sup>c</sup>
C18:2n-6 (LNA)	15.47±1.20 <sup>a</sup>	29.80±0.78 <sup>c</sup>	21.22±3.56 <sup>ab</sup>	21.55±2.77 <sup>ab</sup>	23.61±3.12 <sup>bc</sup>
C20:4n-6 (ARA)	1.06±0.00 <sup>b</sup>	0.29±0.01 <sup>a</sup>	0.27±0.02 <sup>a</sup>	0.25±0.02 <sup>a</sup>	0.30±0.04 <sup>a</sup>
Σn-6 PUFA (LNA+ARA)	16.53±1.20 <sup>a</sup>	30.09±0.79 <sup>c</sup>	21.49±3.58 <sup>ab</sup>	21.83±2.81 <sup>ab</sup>	23.91±3.14 <sup>bc</sup>
C18:3n-3 (ALA)	1.78±0.23 <sup>a</sup>	3.08±0.19 <sup>b</sup>	10.72±0.23 <sup>c</sup>	3.21±0.44 <sup>b</sup>	1.16±0.22 <sup>a</sup>
C20:5n-3 (EPA)	6.55±0.76 <sup>b</sup>	1.80±0.17 <sup>a</sup>	1.80±0.26 <sup>a</sup>	2.32±0.01 <sup>a</sup>	2.31±0.07 <sup>a</sup>
C22:6n-3 (DHA)	11.23±0.30 <sup>c</sup>	3.37±0.34 <sup>a</sup>	3.29±0.15 <sup>a</sup>	5.18±0.38 <sup>b</sup>	4.93±0.22 <sup>b</sup>
Σn-3 HUFA (EPA+DHA)	17.78±0.94 <sup>c</sup>	5.17±0.37 <sup>a</sup>	5.08±0.41 <sup>a</sup>	7.50±0.39 <sup>b</sup>	7.24±0.29 <sup>b</sup>
Σn-3 PUFA (ALA+EPA+DHA)	19.55±1.04 <sup>c</sup>	8.26±0.35 <sup>a</sup>	15.80±0.52 <sup>b</sup>	10.42±0.84 <sup>b</sup>	8.41±0.29 <sup>a</sup>
n-3/n-6 PUFA	1.19±0.12 <sup>d</sup>	0.27±0.02 <sup>a</sup>	0.75±0.10 <sup>c</sup>	0.48±0.03 <sup>a</sup>	0.36±0.04 <sup>ab</sup>
DHA/EPA	1.73±0.18 <sup>a</sup>	1.89±0.25 <sup>ab</sup>	1.85±0.20 <sup>ab</sup>	2.23±0.16 <sup>b</sup>	2.13±0.04 <sup>ab</sup>

### 2.3 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼血清生化指标的影响

由表6可见,PO组的血清TG含量显著高于其他各组( $P<0.05$ ),SO组、LO组和RO组则显著高于FO组( $P<0.05$ )。SO组和RO组的血清TC含量显著高于其他各组( $P<0.05$ ),FO组显著高于PO组( $P<0.05$ )。FO组的血清LDL-C含量显著高于其他各组( $P<0.05$ )。FO组的血清HDL-C含量显著低于PO组( $P<0.05$ ),但显著高于其他各组( $P<0.05$ )。FO组的血清GLU含量显著高于其他各组( $P<0.05$ ),SO组和LO组显著高于RO组

和PO组( $P<0.05$ ),RO组显著高于PO组( $P<0.05$ )。

血清SOD活性随FO组、SO组、LO组、RO组和PO组的顺序显著降低( $P<0.05$ )。FO组的血清CAT、GSH-Px活性均显著高于其他各组( $P<0.05$ );PO组的血清CAT活性则显著低于RO组( $P<0.05$ ),而血清GSH-Px活性显著高于SO组( $P<0.05$ )。RO组的血清LZM活性显著高于其他各组( $P<0.05$ ),FO组则显著高于除SO组外的其他2组( $P<0.05$ )。FO组和RO组的血清C3含量显著高于其他各组( $P<0.05$ ),其他各组间无显著差异( $P>0.05$ )。

表 6 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼血清生化指标的影响

Table 6 Effects of dietary lipid sources on serum biochemical indexes of *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus*

项目 Items	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
生化指标 Biochemical indexes					
甘油三酯 TG/(mmol/L)	0.75±0.06 <sup>a</sup>	0.91±0.03 <sup>b</sup>	0.94±0.02 <sup>b</sup>	1.01±0.09 <sup>b</sup>	1.25±0.02 <sup>c</sup>
总胆固醇 TC/(mmol/L)	6.50±0.37 <sup>b</sup>	7.46±0.31 <sup>c</sup>	5.86±0.34 <sup>ab</sup>	7.41±0.21 <sup>c</sup>	5.22±0.35 <sup>a</sup>
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/(mmol/L)	3.06±0.22 <sup>b</sup>	2.14±0.29 <sup>a</sup>	1.93±0.09 <sup>a</sup>	1.75±0.25 <sup>a</sup>	2.09±0.10 <sup>a</sup>
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/(mmol/L)	2.19±0.21 <sup>b</sup>	1.57±0.24 <sup>a</sup>	1.67±0.11 <sup>a</sup>	1.51±0.06 <sup>a</sup>	3.35±0.16 <sup>c</sup>
葡萄糖 GLU/(mmol/L)	9.46±0.18 <sup>d</sup>	6.59±0.13 <sup>c</sup>	6.75±0.05 <sup>c</sup>	6.18±0.07 <sup>b</sup>	5.79±0.14 <sup>a</sup>
抗氧化酶 Antioxidant enzymes					
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mL)	462.30±2.17 <sup>c</sup>	437.60±6.04 <sup>d</sup>	419.50±3.40 <sup>c</sup>	388.50±9.71 <sup>b</sup>	344.30±5.01 <sup>a</sup>
过氧化氢酶 CAT/(U/L)	45.71±3.03 <sup>c</sup>	36.75±1.12 <sup>ab</sup>	33.34±3.49 <sup>ab</sup>	38.16±1.58 <sup>b</sup>	30.30±1.99 <sup>a</sup>
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mL)	370.39±10.20 <sup>d</sup>	188.50±11.93 <sup>a</sup>	262.87±8.81 <sup>bc</sup>	298.80±22.82 <sup>bc</sup>	259.13±10.23 <sup>b</sup>
免疫指标 Immunity indexes					
溶菌酶 LZM/(U/L)	5.20±0.67 <sup>c</sup>	4.82±0.56 <sup>bc</sup>	3.55±0.62 <sup>ab</sup>	5.34±0.15 <sup>d</sup>	3.28±0.61 <sup>a</sup>
补体 3 C3/(μg/mL)	85.24±0.78 <sup>b</sup>	53.78±4.45 <sup>a</sup>	62.49±3.66 <sup>a</sup>	76.79±5.95 <sup>b</sup>	52.82±3.92 <sup>a</sup>

## 2.4 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼肝脏脂肪代谢相关指标的影响

由表 7 可见,SO 组的肝脏 TG 含量显著高于 FO 组和 LO 组 ( $P<0.05$ );RO 组和 PO 组之间无显著差异 ( $P>0.05$ ),但均显著高于 FO 组 ( $P<0.05$ )。各组之间的肝脏 MDA 含量、SOD 活性无显著差异 ( $P>0.05$ )。LO 组的肝脏 AST 活性显著低于 SO 组 ( $P<0.05$ ),肝脏 ALT 活性显著高于 FO 组和 RO 组 ( $P<0.05$ )。FO 组的肝脏 T-AOC 显著高于除 PO 组外的其他各组 ( $P<0.05$ ),肝脏 FAS 活性显著高于除 LO 外的其他各组 ( $P<0.05$ )。LO 组的肝脏 CPT-1 活性显著高于 PO 组 ( $P<0.05$ ),而其他各组无显著差异 ( $P>0.05$ )。各组之间的肝脏 G6PD 活性无显著差异 ( $P>0.05$ )。

## 3 讨论

本试验中各组 WGR 和 SR 分别在 200% 和 95% 以上,表明珍珠龙胆石斑鱼对 5 种脂肪源都有着较好的吸收和利用能力,其中 FO 效果最佳,PO 效果最差。研究表明,白鲟 (*Acipenser transmontanus*)<sup>[24]</sup> 和欧洲鳊 (*Huso huso*)<sup>[25]</sup> 饲料中用植物油部分或全部替代 FO,对生长性能无不良影响。PO 替代 FO 不影响点带石斑鱼 (*Epinephelus coioides*)

的 WGR、SGR,但 FO 组的 WGR、SGR 最高<sup>[26]</sup>。本试验中,FO 组和 LO 组的 WGR 和 SGR 无显著差异,PO 组的 WGR 和 SGR 均最低,可能与 PO 组试验饲料中的 n-3HUFA 含量较其他各组低有关。这与点带石斑鱼<sup>[26]</sup>、黑棘鲷 (*Acanthopagrus schlegelii*)<sup>[27]</sup> 的研究结果相同。FO、SO 和 PO 不影响点带石斑鱼的 HSI 和 FCR<sup>[26]</sup>,异育银鲫 (*Carrassius auratus gibelio*) 的 HSI 和 VSI 也不受脂肪源影响<sup>[28]</sup>。本试验中,PO 组的 FCR、HSI 和 VSI 均最高,且 FCR 显著高于 FO 组,HSI 和 VSI 显著高于其他 4 组,这与点带石斑鱼<sup>[26]</sup>、异育银鲫<sup>[28]</sup> 的研究结果不一致,可能与鱼的品种、养殖环境以及基础饲料脂肪源占比不同等有关。

FO、SO、RO 和 LO 不影响军曹鱼 (*Rachycentron canadum*) 幼鱼全鱼粗蛋白质含量<sup>[29]</sup>。用分别含有 FO、SO、RO、LO 和 PO 的饲料投喂大黄鱼 (*Larmichthys crocea*)<sup>[6]</sup>,结果表明 FO 组全鱼粗脂肪含量显著高于其他组。本试验中 FO 组全鱼粗蛋白质含量最高,但与其他组无显著差异,与军曹鱼<sup>[29]</sup> 的研究结果一致;RO 组全鱼粗脂肪含量最高,LO 组、SO 组和 PO 组依序减少,FO 组最低,但组间无显著差异,与大黄鱼<sup>[6]</sup> 的研究结果不同,可能是鱼的种类不同,利用不同油源合成脂肪的能

力不同。此外,鱼体脂肪含量与饲料脂肪酸组成相关性较大,本试验中,各组饲料脂肪酸组成有明显的区别,也会影响试验结果。PO组全鱼粗灰分

含量最高,FO组最低,与双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)<sup>[30]</sup>的研究结果相似。

表7 饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼肝脏脂肪代谢相关指标的影响

Table 7 Effects of dietary lipid sources on liver lipid metabolism related indexes of *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus*

项目 Items	组别 Groups				
	鱼油 FO	豆油 SO	亚麻籽油 LO	菜籽油 RO	花生油 PO
生化指标 Biochemical indexes					
甘油三酯 TG/(nmol/mg prot)	0.95±0.07 <sup>a</sup>	1.32±0.10 <sup>c</sup>	1.05±0.01 <sup>ab</sup>	1.28±0.12 <sup>bc</sup>	1.20±0.08 <sup>bc</sup>
丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	5.53±0.06	5.33±0.38	5.35±0.17	5.45±0.13	5.26±0.32
谷草转氨酶 AST/(U/g prot)	13.45±1.27 <sup>ab</sup>	16.32±1.09 <sup>b</sup>	11.56±0.99 <sup>a</sup>	13.32±1.64 <sup>ab</sup>	12.09±0.78 <sup>a</sup>
谷丙转氨酶 ALT/(U/g prot)	11.57±2.43 <sup>a</sup>	12.76±1.25 <sup>ab</sup>	15.88±1.05 <sup>b</sup>	11.64±0.67 <sup>a</sup>	12.62±1.05 <sup>ab</sup>
总抗氧化能力					
T-AOC/(U/mg prot)	68.36±1.95 <sup>b</sup>	54.91±4.93 <sup>a</sup>	57.82±4.25 <sup>a</sup>	57.63±2.28 <sup>a</sup>	59.89±1.98 <sup>b</sup>
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mL)	61.18±5.42	63.49±3.61	57.74±1.75	62.97±0.56	55.86±3.04
脂肪代谢酶 Lipid metabolism enzymes					
脂肪酸合成酶 FAS/(U/mg prot)	464.30±20.81 <sup>b</sup>	372.70±14.03 <sup>a</sup>	462.90±7.56 <sup>b</sup>	387.10±16.20 <sup>a</sup>	391.73±7.39 <sup>a</sup>
肉碱脂酰转移酶 1 CPT-1/(U/g prot)	92.37±1.67 <sup>ab</sup>	89.89±4.34 <sup>ab</sup>	97.63±1.05 <sup>b</sup>	90.51±2.26 <sup>ab</sup>	88.33±4.91 <sup>a</sup>
葡萄糖-6-磷酸脱氢酶 G6PD/(U/g prot)	5.30±0.57	4.80±0.66	4.55±1.01	4.68±1.01	6.16±0.22

本试验肝脏脂肪酸组成中,SFA以C16:0、C18:0为主,MUFA以C18:1为主,n-6PUFA以C18:2n-6为主,n-3PUFA中,LO组以C18:3n-3为主,FO组以C20:5n-3、C22:6n-3为主。各组肝脏总SFA含量无显著差异;FO组肝脏C20:4n-6、C20:5n-3、C22:6n-3含量均显著高于其他各组,LO组肝脏C18:3n-3含量显著高于其他各组。对比饲料和肝脏脂肪酸组成,发现肝脏中少数脂肪酸组成受饲料脂肪酸组成的影响,这与大西洋白姑鱼(*Argyrosomus regius*)<sup>[31]</sup>的研究结果类似,可能是鱼的种类、饲料脂肪含量、养殖方式等共同作用的结果。

鱼类血液成分与机体的代谢、营养状况及疾病有着密切的关系,当鱼体受到外界因子的影响而发生生理或病理变化时,必定会在血液指标中反映出来<sup>[32]</sup>。鱼类血液的生化指标变化可以反映鱼类对疾病的生理应答<sup>[33]</sup>。高密度脂蛋白(HDL)在血液中携带胆固醇后形成HDL-C,由血液向肝脏运输,是机体组织胆固醇的“清洁剂”,血液中HDL-C含量越高,机体将胆固醇运回肝脏中的能力越强,心血管越健康,LDL则携带胆固醇形

成LDL-C,由肝脏向血液运输<sup>[22,34]</sup>。血清TG含量的下降,提示试验鱼体内氧化反应增强,从而增强脂肪酸氧化供能途径,减少脂肪酸合成TG,导致血清总脂肪含量下降<sup>[35]</sup>,而血清TG含量升高与鱼类脂肪肝关系密切<sup>[36]</sup>。有研究发现,FO与其他脂肪源相比,可以在一定程度上防止异育银鲫脂肪肝的形成<sup>[28]</sup>。FO和SO作为鳃(*Elopichthys bambusa*)幼鱼的饲料脂肪来源时,其血清HDL-C、LDL-C含量无显著差异<sup>[34]</sup>。本试验中,PO组的血清TG、HDL-C含量均显著高于其他各组,但FO组的血清TG含量显著低于其他3组,血清HDL-C含量则呈现相反趋势;此外,FO组的血清LDL-C含量显著高于其他各组,说明FO组珍珠龙胆石斑鱼将胆固醇运回肝脏的能力较强,肝脏分解脂肪能力较好;但FO组的血清HDL-C、LDL-C含量均显著高于SO组,与鳃<sup>[34]</sup>的研究结果不同,推测其原因是不同品种鱼利用SO的能力不同。PO组的血清TG含量显著高于其他各组,SO组、LO组和RO组则显著高于FO组,这与异育银鲫<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

动物具有起防御作用的酶和非酶系统包括

SOD、CAT、GSH-Px 等<sup>[27]</sup>,其中,SOD 具有清除鱼体内自由基的能力,可增强鱼体吞噬细胞的活性,促进免疫相关蛋白质的合成<sup>[37]</sup>,GSH-Px 可以减少所有脂质过氧化物<sup>[27]</sup>。LZM 溶解细胞壁吞噬细菌<sup>[38]</sup>,C3 在对宿主的致病防御及先天免疫和适应性免疫之间的联系中发挥着重要作用<sup>[39]</sup>。饲料植物油完全替代 FO,花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 抗病性和肝脏抗氧化能力显著降低<sup>[40]</sup>。本试验中,FO 组的血清 SOD、CAT 和 GSH-Px 活性均显著高于其他各组,可能是 LC-PUFA 提高了鱼体的抗氧化能力,与花鲈<sup>[40]</sup>的研究结果一致;RO 组的血清 LZM 活性显著高于其他各组,血清 C3 含量则显著高于除 FO 组外其他 3 组,表明 RO 有利于珍珠龙胆石斑鱼的免疫机制的发挥,抗病力较强。

AST 和 ALT 是 2 种重要代谢酶,用于评价鱼类肝脏的功能和损伤水平<sup>[41]</sup>,在动物机体健康受损的情况下,血清中 AST 与 ALT 活性均会明显升高<sup>[42]</sup>。机体的抗氧化能力包括相关酶和衡量受损程度的代谢产物的含量 2 部分,前者主要包括 T-AOC、SOD 等,面对外来刺激时,T-AOC 可反映抗氧化酶和非酶促系统代偿能力,还可反映自由基代谢状态<sup>[22,43]</sup>,后者主要包括 MDA 等,MDA 为一种脂肪酸过氧化反应的终产物,其含量间接反映了动物的损伤程度和抗氧化能力<sup>[22,31,40]</sup>。CPT-1 是肉碱转运系统重要组成酶,也是脂肪酸  $\beta$  氧化中的“限速酶”之一,在体脂沉积、能量代谢中起重要作用<sup>[33,44]</sup>,G6PD 则是脂肪合成相关酶,密切联系着动物脂肪酸合成过程,为磷酸戊糖途径的关键酶,为 FAS 催化合成软脂酸提供底物还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸 (NADPH) 原料<sup>[44]</sup>。本试验中,各组的肝脏 MDA 含量及 SOD、G6PD 活性无显著差异,与大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)<sup>[45]</sup>的研究结果相似。SO 组的肝脏 AST 活性、LO 组的肝脏 ALT 活性显著高于其他各组,表明 SO 组和 LO 组石斑鱼的肝脏发育与功能优于其他各组。LO 组的肝脏 FAS 活性显著高于除 FO 组外的其他各组,肝脏 CPT-1 活性高于其他各组,表明和其他植物油源相比,LO 组石斑鱼有更好的脂肪合成及分解能力。

## 4 结 论

饲料脂肪源对珍珠龙胆石斑鱼的生长性能、血清生化指标及肝脏脂肪酸组成、脂肪代谢相关

指标均有一定的影响。FO 组和 LO 组的生长性能相对较好,而 SO 组和 RO 组次之,SO、LO、RO 可以作为珍珠龙胆石斑鱼饲料中良好的植物油源。

## 参考文献:

- [1] LEE S M, JEON I G, LEE J Y. Effects of digestible protein and lipid levels in practical diets on growth, protein utilization and body composition of juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*) [J]. *Aquaculture*, 2002, 211(1/2/3/4): 227-239.
- [2] WATANABE T. Lipid nutrition in fish [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 1982, 73(1): 3-15.
- [3] LEAVER M J, BAUTISTA J M, BJÖRNSSON B T, et al. Towards fish lipid nutrigenomics: current state and prospects for fin-fish aquaculture [J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2008, 16(Suppl.1): 73-94.
- [4] GLENCROSS B D. Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2009, 1(2): 71-124.
- [5] SARAMEH S P, BAHRI A H, SALARZADEH A, et al. Effects of fish oil replacement with vegetable oil in diet of sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*) broodstock on expression of lipid metabolism related genes in eggs [J]. *Aquaculture*, 2019, 505: 441-449.
- [6] QIU H, JIN M, LI Y, et al. Dietary lipid sources influence fatty acid composition in tissue of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) by regulating triacylglycerol synthesis and catabolism at the transcriptional level [J]. *PLoS One*, 2017, 12(1): e0169985.
- [7] PAULY D, ZELLER D. Comments on FAOs *State of World Fisheries and Aquaculture* (SOFIA 2016) [J]. *Marine Policy*, 2017, 77: 176-181.
- [8] PENG M, XU W, TAN P, et al. Effect of dietary fatty acid composition on growth, fatty acids composition and hepatic lipid metabolism in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) fed diets with required n3 LC-PUFAs [J]. *Aquaculture*, 2017, 479: 591-600.
- [9] CHEN C Y, CHEN J S, WANG S Q, et al. Effects of different dietary ratios of linolenic to linoleic acids or docosahexaenoic to eicosapentaenoic acids on the growth and immune indices in grouper, *Epinephelus coioides* [J]. *Aquaculture*, 2017, 473: 153-160.
- [10] BELL J G, MCGHEE F, DICK J R, et al. Dioxin and dioxin-like polychlorinated biphenyls (PCBs) in Scottish farmed salmon (*Salmo salar*): effects of replacement of dietary marine fish oil with vegetable oils [J].

- Aquaculture, 2004, 243(1/2/3/4):305-314.
- [11] RICHARD N, KAUSHIK S, LARROQUET L, et al. Replacing dietary fish oil by vegetable oils has little effect on lipogenesis, lipid transport and tissue lipid uptake in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. British Journal of Nutrition, 2006, 96(2):299-309.
- [12] REGOST C, ARZEL J, ROBIN J, et al. Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in Turbot (*Psetta maxima*) 1. Growth performance, flesh fatty acid profile, and lipid metabolism [J]. Aquaculture, 2003, 217(1/2/3/4):465-482.
- [13] REGOST C, ARZEL J, CARDINAL M, et al. Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in turbot (*Psetta maxima*) 2. Flesh quality properties [J]. Aquaculture, 2003, 220(1/2/3/4):737-747.
- [14] IZQUIERDO M S, OBACH A, ARANTZAMENDI L, et al. Dietary lipid sources for seabream and seabass: growth performance, tissue composition and flesh quality [J]. Aquaculture Nutrition, 2003, 9(6):397-407.
- [15] RASO S, ANDERSON T A. Effects of dietary fish oil replacement on growth and carcass proximate composition of juvenile barramundi (*Lates calcarifer*) [J]. Aquaculture Research, 2003, 34(10):813-819.
- [16] 谭青, 王际英, 李宝山, 等. n-3/n-6 HUFA 对大菱鲆幼鱼生长性能、全鱼脂肪酸组成和血清生化指标的影响 [J]. 水产学报, 2018, 42(5):754-765.
- [17] CASTRO C, CORRAZE G, FIRMINO-DIÓGENES A, et al. Regulation of glucose and lipid metabolism by dietary carbohydrate levels and lipid sources in gilt-head sea bream juveniles [J]. The British Journal of Nutrition, 2016, 116(1):19-34.
- [18] MONTERO D, KALINOWSKI T, OBACH A, et al. Vegetable lipid sources for gilthead seabream (*Sparus aurata*): effects on fish health [J]. Aquaculture, 2003, 225(1/2/3/4):353-370.
- [19] LI S L, SANG C Y, ZHANG J C, et al. Molecular cloning, expression profiling of adipose triglyceride lipase (ATGL) and forkhead box O1 (FoxO1), and effects of dietary carbohydrate level on their expression in hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂) [J]. Aquaculture, 2018, 492:103-112.
- [20] RAHIMNEJAD S, BANG I C, PARK J Y, et al. Effects of dietary protein and lipid levels on growth performance, feed utilization and body composition of juvenile hybrid grouper, *Epinephelus fuscoguttatus* × *E. lanceolatus* [J]. Aquaculture, 2015, 446:283-289.
- [21] 王明辉, 王际英, 宋志东, 等. 共轭亚油酸对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长、体组成及肝代谢相关酶活力的影响 [J]. 中国水产科学, 2016, 23(6):1300-1310.
- [22] 王成强, 王际英, 黄炳山, 等. 饲料花生四烯酸水平对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长性能、抗氧化能力、血清生化指标以及肝脏和肌肉脂肪酸组成的影响 [J]. 动物营养学报, 2018, 30(9):3567-3580.
- [23] HIRWITZ W, LATIMER G W. Official methods of analysis of AOAC [J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 6(11):382-382.
- [24] XU R P, HUNG S S O, GERMAN J B. White sturgeon tissue fatty acid compositions are affected by dietary lipids [J]. The Journal of Nutrition, 1993, 123(10):1685-1692.
- [25] HOSSEINI S V, KENARI A A, REGENSTEIN J M, et al. Effects of alternative dietary lipid sources on growth performance and fatty acid composition of beluga sturgeon, *Huso huso*, Juveniles [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2010, 41(4):471-489.
- [26] LIN H Z, LIU Y J, HE J G, et al. Alternative vegetable lipid sources in diets for grouper, *Epinephelus coioides* (Hamilton): effects on growth, and muscle and liver fatty acid composition [J]. Aquaculture Research, 2007, 38(15):1605-1611.
- [27] JIN M, LU Y, YUAN Y, et al. Regulation of growth, antioxidant capacity, fatty acid profiles, hematological characteristics and expression of lipid related genes by different dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. Aquaculture, 2017, 471:55-65.
- [28] 於叶兵, 江世贵, 林黑着, 等. 不同脂肪源对异育银鲫形体与血液生化指标的影响 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2012, 38(2):192-197.
- [29] 王骥腾, 韩涛, 田丽霞, 等. 3种植物油源对军曹鱼生长、体组成和脂肪酸组成的影响 [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2007, 26(3):237-245.
- [30] LV F, LIU F, YU Y B, et al. Effects of dietary lipid levels on growth, body composition and antioxidants of clamworm (*Perinereis aibuhitensis*) [J]. Aquaculture Reports, 2017, 6:1-7.
- [31] CHATZIFOTIS S, PANAGIOTIDOU M, PAPAIOANNOU N, et al. Effect of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and serum metabolites of meagre (*Argyrosomus regius*) juveniles [J]. Aquaculture, 2010, 307(1/2):65-70.
- [32] 张媛媛, 刘波, 戈贤平, 等. 不同脂肪源对异育银鲫生

- 长性能、机体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及脂质代谢的影响[J].水产学报,2012,36(7):1111-1118.
- [33] DVM T C H, CARDINALE J L, SMITH S A. Hematology and plasma chemistry reference intervals for cultured Tilapia (*Oreochromis Hybrid*) [J]. Veterinary Clinical Pathology, 2008, 29(1): 7-12.
- [34] 陈海燕, 朱邦科, 樊启学, 等. 不同脂肪源对鳃幼鱼生长、血清生化组成和肝脏的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(2): 116-122.
- [35] 吴永胜, 董国忠, 王立常, 等. 饲料中添加铬-烟酸复合物对肉鸭生产性能、胴体成分及血液生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2000, 12(2): 20-25.
- [36] 李红霞, 刘文斌, 李向飞, 等. 饲料中添加氯化胆碱、甜菜碱和溶血卵磷脂对异育银鲫生长、脂肪代谢和血液指标的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(2): 292-299.
- [37] MCCORD J M, FRIDOVICH I. Superoxide dismutase. An enzymic function for erythrocyte protein (hemocuprein) [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1969, 244(22): 6049-6055.
- [38] 马晶晶, 王际英, 孙建珍, 等. 饲料中 DHA/EPA 值对星斑川鲈幼鱼生长、体组成及血清生理指标的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(2): 244-256.
- [39] DUNKELBERGER J R, SONG W C. Complement and its role in innate and adaptive immune responses [J]. Cell Research volume, 2010, 20(1): 34-50.
- [40] TAN P, DONG X J, XU H L, et al. Dietary vegetable oil suppressed non-specific immunity and liver antioxidant capacity but induced inflammatory response in Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2017, 63: 139-146.
- [41] WU C L, YE J Y, GAO J E, et al. The effects of dietary carbohydrate on the growth, antioxidant capacities, innate immune responses and pathogen resistance of juvenile Black carp *Mylopharyngodon piceus* [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 49: 132-142.
- [42] 陈晨, 黄峰, 舒秋艳, 等. 共轭亚油酸对草鱼生长、肌肉成分、谷草转氨酶及谷丙转氨酶活性的影响[J]. 水生生物学报, 2010, 34(3): 647-651.
- [43] 章倩, 张木子, 黎明, 等. 牛磺酸对急性氨中毒的鲫和草鱼抗氧化及炎症相关基因表达影响的比较研究[J/OL]. 水产学报, 2018, doi: 10.11964/jfc.20181011469.
- [44] 胡伟. 草鱼脂代谢相关酶的分离纯化、分子克隆、酶动力学性质及对铜和锌的响应研究[D]. 博士学位论文. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [45] 朱婷婷, 金敏, 孙蓬, 等. 饲料脂肪水平对大口黑鲈形体指标、组织脂肪酸组成、血清生化指标及肝脏抗氧化性能的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(1): 126-137.

# Effects of Dietary Lipid Sources on Growth Performance, Serum Biochemical Indexes and Liver Fatty Acids Composition, Lipid Metabolism Related Indexes of *Epinephelus lanceolatus*× *Epinephelus fuscoguttatus*

WU Meihuan<sup>1,2</sup> AN Wenqiang<sup>1,2</sup> DONG Xiaohui<sup>1,2\*</sup> TAN Beiping<sup>1,2</sup> ZHANG Shuang<sup>1,2</sup>  
OU Guanghai<sup>1</sup> SU Yonglin<sup>1</sup> LI Yuchun<sup>1</sup> LIANG Shengkai<sup>1</sup>

(1. Fisheries College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Laboratory of Aquatic Animal Nutrition and Feed, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** This experiment was conducted to investigate the effects of dietary lipid sources on growth performance, serum biochemical indexes and liver fatty acids composition, lipid metabolism related indexes of *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus*. A total of 450 athletic, uniform juvenile *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus* with an average body weight of (17.67±0.03) g were randomly divided into 5 groups with 3 replicates per group and 30 fish per replicate. Fish in each group were fed five isonitrogenous (about 49% crude protein) and isolipidic (about 11% crude lipid) experimental diets which were formulated by fish oil (FO), soybean oil (SO), linseed oil (LO), rapeseed oil (RO) and peanut oil (PO) as lipid sources, and the experiment lasted for 8 weeks. The results showed as follows: 1) the weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR) of FO group and LO group were significantly higher than those of PO group ( $P<0.05$ ). 2) The liver C18:1 content of RO group was the highest, and significantly higher than that of the other groups ( $P<0.05$ ); the liver C18:2n-6 content of SO group was significantly higher than that of other groups except PO group ( $P<0.05$ ); and the contents of C20:5n-3 and C22:6n-3 in liver of FO group were significantly higher than those of the other groups ( $P<0.05$ ). 3) The serum triglycerides (TG) content of PO group was significantly higher than that of the other groups ( $P<0.05$ ); the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GSH-Px) in serum of FO group were the highest, and significantly higher than those of the other groups ( $P<0.05$ ). 4) The liver aspartate aminotransferase (AST) activity of LO group was significantly lower than that of SO group ( $P<0.05$ ), and the alanine aminotransferase (ALT) activity was significantly higher than that of FO group and RO group ( $P<0.05$ ), but the total antioxidant capacity (T-AOC) was significantly lower than that of FO group and PO group ( $P<0.05$ ). The liver fatty acid synthase (FAS) activity of FO group was significantly higher than that of the other groups except LO group ( $P<0.05$ ), and the liver carnitine palmitoyltransferase-1 (CPT-1) activity of LO group was significantly higher than that of PO group ( $P<0.05$ ). To sum up, dietary lipid sources have certain influence on growth performance, serum biochemical indexes and liver fatty acids composition, lipid metabolism related indexes of *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus*. The growth performance of FO group and LO group is relatively good, while SO group and RO group take second place, SO, LO and RO can be used as a good vegetable oil source in the diet of *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus*. [Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(3):1315-1326]

**Key words:** *Epinephelus lanceolatus*×*Epinephelus fuscoguttatus*; lipid sources; growth performance; serum biochemical indexes; lipid metabolism