

文章编号: 1000-0615(2019)02-0505-18

DOI: 10.11964/jfc.20180111144

## 育肥饲料中混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹育肥性能、生理代谢指标和生化组成的影响

吴仁福<sup>1</sup>, 龙晓文<sup>1,2,3</sup>, 侯文杰<sup>4</sup>, 潘桂平<sup>4</sup>,  
董志国<sup>5</sup>, 成永旭<sup>1,2,3</sup>, 吴旭干<sup>1,2,3\*</sup>

1. 上海海洋大学, 农业农村部鱼类营养和环境生态研究中心, 上海 201306;
2. 上海海洋大学, 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306;
3. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;
4. 上海市水产研究所, 上海市水产技术推广站, 上海 200433;
5. 淮海工学院, 江苏海洋生物技术重点实验室, 江苏 连云港 222005)

**摘要:** 为研究饲料中植物油替代鱼油对三疣梭子蟹育肥性能、生理代谢和生化组成的影响, 采用混合植物油(大豆油: 菜籽油=1:1)分别替代饲料中0%、25%、50%、75%和100%的鱼油, 制成5种等氮等脂育肥饲料(分别记为饲料Diet 1~Diet 5)对生殖蜕壳后的三疣梭子蟹雌体[初始体质量为(150±25)g]进行45 d的育肥养殖。结果显示:①饲料中鱼油替代对雌体成活率(SR)、增重率(WGR)、性腺指数(GSI)、肝胰脏指数(HSI)、出肉率(MY)和总可食率(TEY)均无显著影响。②各组雌蟹肝胰脏中的甘油三酯(TG)含量, 苹果酸脱氢酶(MDH)、脂肪酶(LPS)和脂蛋白酯酶(LPL)活性均存在显著性差异, 其中TG和LPS水平均在Diet 5最高, MDH活性在Diet 1组最高, 而LPL活性在Diet 2组最高; 血清中甘油三酯(TG)和总胆固醇(TC)分别在Diet 3和Diet 4组最高。③Diet 1组肝胰脏中的过氧化物酶(POD)活性显著高于Diet 2和Diet 3组, 而肝胰脏中碱性磷酸酶(ALP)和酸性磷酸酶(ACP)均在Diet 4组最高; 血清中总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性在Diet 1组最低, Diet 2组最高, 而ALP活性在Diet 1组最高。④不同饲料组肌肉中粗蛋白和总碳水化合物含量差异显著, 均以Diet 3组最高; Diet 3和Diet 4组肝胰脏中的粗脂肪和总碳水化合物均相对较高; 此外, 卵巢中的粗蛋白含量在Diet 3组最高。⑤饲料中鱼油替代水平对三疣梭子蟹肌肉、卵巢和肝胰脏的脂肪酸组成产生显著影响, n-6多不饱和脂肪酸(n-6 PUFA)随鱼油替代水平的升高而升高, 而n-3 PUFA和高度不饱和脂肪酸(HUFA)随饲料鱼油替代水平的升高而降低。研究表明, 育肥饲料中植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体成活和卵巢发育等无显著影响, 但可提高肝胰脏中甘油三酯、粗脂肪、n-6 PUFA含量、部分抗氧化和免疫指标; 50%的鱼油替代水平可提高卵巢和肌肉中粗蛋白含量。因此, 混合植物油可以替代三疣梭子蟹育肥中50%的鱼油。

**关键词:** 三疣梭子蟹; 育肥性能; 育肥饲料; 鱼油替代; 生理代谢; 生化组成

**中图分类号:** S 963.7

**文献标志码:** A

鱼油是一种重要的饲料原料, 因其脂肪酸组成相对均衡、富含n-3高度不饱和脂肪酸和诱

食性较好等优点而被广泛应用于水产饲料中, 但随着水产养殖业的快速发展, 全球鱼油产量

收稿日期: 2018-01-16 修回日期: 2018-03-17

资助项目: 上海市科技兴农重点推广项目[沪农科攻字(2016)第1-1-8号]; 江苏省科技厅苏北科技专项(SZ-LYG2017019); 上海市科委工程技术中心能力提升项目(16DZ2281200); 上海高校水产学高峰学科建设项目(2015-62-0908)

通信作者: 吴旭干, E-mail: xgwu@shou.edu.cn

已经不能满足水产养殖业的需求, 寻求合适的鱼油替代源已成为当今水产养殖业中亟待解决的重要问题<sup>[1-2]</sup>。植物油具有来源广、产量大、价格相对低廉等优点, 因此其被认为是鱼油替代的首选<sup>[3]</sup>。豆油和菜籽油是目前水产饲料中最常用的2种植物油, 其脂肪酸和脂溶性维生素组成具有一定互补性, 将二者混合替代水产饲料中的鱼油具有较好的效果<sup>[1, 4]</sup>。

三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)是我国重要的海水经济蟹类之一<sup>[5]</sup>, 通常卵巢发育良好的雌蟹(膏蟹)营养价值较高、风味独特, 深受消费者喜爱, 市场经济价值较高, 因此在三疣梭子蟹育肥阶段需提供优质饵料来促进其卵巢发育和提高其营养价值<sup>[6-8]</sup>。研究表明, 蟹类的风味和营养价值与其可食组织中富含高不饱和脂肪酸(HUFA)密切相关<sup>[7, 9]</sup>, 通常需在其育肥饲料(性腺发育期间的饲料)中添加高比例鱼油<sup>[10-11]</sup>。然而, 由于鱼油资源的紧缺和价格持续上涨, 目前水产饲料中已普遍采用植物油替代鱼油<sup>[12-13]</sup>。

以往的研究表明, 饲料中适合的鱼油替代水平对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)育肥性能无负面影响, 同时还可提高机体的抗氧化能力、免疫性能, 促进组织脂类的沉积和改善其营养品质<sup>[12, 14-15]</sup>, 但尚未见三疣梭子蟹育肥阶段的相关报道。卵巢、肝胰腺和肌肉是蟹类的三大可食组织, 因此其占比和生化组成对蟹类的食用价值具有重要影响<sup>[7, 16]</sup>。此外, 水生动物的脂质代谢、抗氧化能力和免疫性能等指标通常可在一定程度上反映其生理代谢和健康状况<sup>[12, 17-18]</sup>。因此, 本研究采用混合植物油(豆油: 菜籽油=1:1)替代三疣梭子蟹育肥饲料中0%、25%、50%、75%和100%的鱼油, 探讨其对三疣梭子蟹雌蟹育肥性能、生理代谢和生化组成的影响, 以期三疣梭子蟹配合饲料的配制及鱼油替代源的开发利用提供一定的理论依据和实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

本实验以豆粕、菜籽粕和鱼粉作为主要蛋白源配制基础饲料, 分别在基础饲料中添加8%、6%、4%、2%、0%的鱼油和0%、2%、

4%、6%、8%的混合植物油(豆油: 菜籽油=1:1), 配制成鱼油替代水平分别为0%、25%、50%、75%和100%的5种等氮等脂饲料, 分别记为饲料Diet1~Diet 5, 实验饲料配方详见赵磊等<sup>[12]</sup>(表1), 饲料常规营养成分和脂肪酸组成如表2所示。

### 1.2 实验用蟹及养殖管理

实验用三疣梭子蟹均取自上海市水产研究所启东科研基地的室外水泥养殖池塘。在池塘养殖过程中, 早期主要投喂麻虾、小麦粉和配合饲料等饵料, 在中后期主要投喂配合饲料和冰鲜杂鱼, 所有三疣梭子蟹均具有相似的养殖条件。于2016年9月底, 参考宣富君等<sup>[19]</sup>的方法, 挑选出150只体质量为(150±25)g且已完成生殖蜕壳的雌蟹(平均卵巢指数约为0.83%)进行养殖实验。养殖在室内循环水水泥池(5.8 m×2.4 m×1.8 m)中进行, 每个实验饲料组重复3个平行, 每个平行10只蟹, 因此每组共30只蟹, 每只蟹单独养殖于单体塑料养殖框中(33 cm×27.5 cm×35 cm); 为了便于水体流通, 在每个养殖框四周开有小孔。养殖水体24 h连续充氧, 水体盐度为25; 光周期为12 D: 12 L。实验蟹在养殖框内暂养1周, 暂养期间投喂Diet1饲料, 待适应养殖环境后于2016年10月10日开始正式实验。

实验期间, 每日下午18:00投喂各组对应的实验饲料。投喂量根据水温和残饵情况进行调整, 养殖期间水体温度为18~25℃, 当平均水温高于20℃时饲料投喂量为体质量的3%左右, 当水温为18~20℃时按体质量的1.5%左右投喂。每次投喂2~3 h后检查摄食情况, 并于次日9:00左右检查所有养殖框内的残饵, 并清除残饵和检查实验蟹死亡情况。养殖期间, 每隔3天检测1次水质指标, 根据水质情况每2周适当加水和换水, pH为7.0~9.0, 溶解氧浓度>4 mg/L, 氨氮浓度<0.5 mg/L, 亚硝酸盐浓度<0.15 mg/L。

### 1.3 样品采集

正式实验45 d后停食1 d, 每个饲料组随机采样8只蟹。用干毛巾擦干梭子蟹体表和附肢上的水分后, 用电子天平称重(精确度=0.01 g), 用游标卡尺测量头胸甲长和宽(精度=0.02 mm)。将实验蟹置于冰上麻醉5~8 min后, 用1.0 mL无菌注射器从第四步足基部抽取血淋巴后分别注入到

表 1 实验饲料配方  
Tab. 1 Formulations of five experimental diets

原料 ingredients	Diet1	Diet2	Diet3	Diet4	Diet5	%
豆粕 soybean meal	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	
菜籽粕 rapeseed meal	14.54	14.54	14.54	14.54	14.54	
谷朊粉 wheat gluten	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
鱼粉 fish meal	18.00	18.00	18.00	18.00	18.00	
面粉 wheat flour	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00	
啤酒酵母粉 brewer's yeast	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
乌贼粉 squid meal	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	
虾粉 shrimp meal	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	
维生素预混料 vitamin premix <sup>1</sup>	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	
矿物质预混料 mineral premix <sup>2</sup>	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	
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	
氯化胆碱 choline chloride (50%)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
肌醇 inositol	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	
鱼油 fish oil	8.00	6.00	4.00	2.00		
豆油 soybean oil		1.00	2.00	3.00	4.00	
菜籽油 rapeseed oil		1.00	2.00	3.00	4.00	
卵磷脂 lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
食盐 NaCl	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	

注: 1. 维生素预混料为每千克饲料提供: V<sub>A</sub> 62 500 IU, V<sub>D3</sub> 15 000 IU, V<sub>E</sub> 1.05 g, V<sub>K3</sub> 35.4 mg, V<sub>B1</sub> 100 mg, V<sub>B2</sub> 150 mg, V<sub>B6</sub> 150 mg, V<sub>B12</sub> 0.2 mg, V<sub>C</sub> 700 mg, 生物素 4 mg, D-泛酸钙 250 mg, 叶酸 25 mg, 烟酰胺 300 mg。2. 矿物质预混料为每千克饲料提供: FeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 200 mg, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 96 mg, ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 360 mg, MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 120 mg, MgSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 240 mg, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 4.2 g, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.5 g, KI 5.4 mg, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 2.1 mg, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 3 mg

Notes: 1. the vitamin premix provided the following per kg of diets: V<sub>A</sub> 62 500 IU, V<sub>D3</sub> 15 000 IU, V<sub>E</sub> 1.05 g, V<sub>K3</sub> 35.4 mg, V<sub>B1</sub> 100 mg, V<sub>B2</sub> 150 mg, V<sub>B6</sub> 150 mg, V<sub>B12</sub> 0.2 mg, V<sub>C</sub> 700 mg, biotin 4 mg, D-calcium pantothenate 250 mg, folic acid 25 mg, nicotinamide 300 mg. 2. the mineral premix provided the following per kg of diets: FeSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 200 mg, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 96 mg, ZnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 360 mg, MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 120 mg, MgSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 240 mg, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 4.2 g, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.5 g, KI 5.4 mg, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 2.1 mg, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 3 mg

2支2 mL无菌离心管中, 于-40 °C保存用于后续分析。沿三疣梭子蟹身体一侧打开头胸甲, 分离出全部卵巢和肝胰腺并准确称重; 精刮出每只蟹全部肌肉并准确称重; 卵巢、肝胰腺和肌肉组织装入自封袋中于-40 °C保存备用。计算每组雌蟹的成活率、增重率、性腺指数和肝胰腺指数、出肉率和总可食率, 计算公式:

$$\text{成活率 (survival rate, SR)} = 100\% \times N_t / N_0$$

$$\text{增重率 (weight gain rate, WGR)} = 100\% \times (W_t - W_0) / W_0$$

$$\text{性腺指数 (gonadosomatic index, GSI)} = 100\% \times W_g / W$$

$$\text{肝胰腺指数 (hepatosomatic index, HSI)} = 100\% \times W_h / W$$

$$\text{出肉率 (meat yeild, MY)} = 100\% \times W_m / W$$

$$\text{总可食率 (total edible yeild, TEY)} = \text{GSI} + \text{HSI} + \text{MY}$$

式中,  $N_t$ 为终末梭子蟹数量,  $N_0$ 为初始梭子蟹数量,  $W_t$ 为终末体质量,  $W_0$ 为初始体质量,  $W_g$ 为终末性腺质量,  $W_h$ 为终末肝胰腺质量,  $W_m$ 为终末肌肉质量,  $W$ 为梭子蟹体质量。

#### 1.4 样品制备和脂质代谢指标测定

准确称取0.1 g肝胰腺冻干样, 按照Folch等<sup>[20]</sup>的方法提取总脂, 所得总脂用甲醇定容至2 mL, 用于甘油三酯(TG)和总胆固醇(TC)含量的测定。称取0.2 g左右肝胰腺鲜样, 加入1 mL预冷的生理盐水, 采用IKA匀浆器匀浆30 s后, 取200 μL匀

表 2 五种实验饲料的常规营养成分和脂肪酸组成  
 Tab. 2 Proximate nutritional composition and fatty acid profile of five experimental diets %

项目 items	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet5
<b>常规营养成分(干重) proximate nutritional composition (dry diet)</b>					
水分 moisture	11.81	11.45	11.85	12.34	11.18
粗蛋白 crude protein	39.55	39.22	39.38	39.59	39.55
粗脂肪 crude lipid	13.84	14.75	14.18	13.23	14.03
灰分 ash	9.21	9.15	9.14	9.24	9.40
<b>脂肪酸组成(总脂肪酸) fatty acids profile (total fatty acids)</b>					
C14:0	4.08	3.63	2.69	1.85	0.92
C15:0	0.59	0.54	0.40	0.25	0.12
C16:0	20.73	19.39	17.09	15.02	12.61
C17:0	0.54	0.49	0.39	0.27	0.15
C18:0	4.52	4.43	4.20	3.89	3.69
C20:0	0.51	0.53	0.46	0.39	0.48
∑SFA	31.49	29.51	25.47	22.17	18.07
C16:1	4.14	3.89	2.96	1.96	1.04
C18:1n9	15.22	18.77	24.32	28.85	31.91
C18:1n7	3.17	3.38	3.16	3.12	3.13
C20:1	0.90	0.92	0.85	0.75	0.68
∑MUFA	24.21	27.72	31.96	34.24	37.22
C18:2n6	18.67	18.51	23.83	28.79	33.06
C20:2n6	1.26	1.20	0.87	0.61	0.37
C22:2n6	0.38	0.35	0.26	0.18	0.09
C18:3n3	2.42	2.68	3.44	4.20	5.22
C20:4n6	0.80	0.75	0.52	0.33	0.19
C20:5n3	6.26	5.80	4.25	2.90	1.56
C22:6n3	9.92	9.39	6.62	4.37	2.15
∑PUFA	39.76	38.68	39.79	41.56	42.78
n-3PUFA	18.66	17.87	14.32	11.47	8.96
n-6PUFA	21.11	20.81	25.48	30.09	33.81
∑HUFA	17.03	15.94	11.39	7.60	3.87
n-3/n-6	0.88	0.86	0.56	0.38	0.27

注: 脂肪酸百分含量小于0.3%的表中未列出; ∑SFA. 总饱和脂肪酸; ∑MUFA. 总单不饱和脂肪酸; ∑PUFA. 总多不饱和脂肪酸; ∑HUFA. 总高度不饱和脂肪酸, 下同

Notes: the fatty acids with less than 0.3% were not presented in the table; ∑SFA. total saturated fatty acids; ∑MUFA. total mono-unsaturated fatty acid; ∑PUFA. total poly-unsaturated fatty acid; ∑HUFA. total highly-unsaturated fatty acid, the same below

浆液直接用于脂肪酶(LPS)、脂蛋白酯酶(LPL)和肝脂酶(HL)活性测定, 剩余部分立即在4 °C、

12 000 r/min条件下离心20 min, 并取中层清液再次离心后, 取中间清液用于其他生理指标分析。



血淋巴样品在常温下解冻后, 用IKA匀浆器匀浆30 s, 于4 °C、12 000 r/min条件下离心20 min, 取上清液(血清)备用。

肝胰腺和血清中的TC、TG含量、肝胰腺中的可溶性蛋白浓度、LPL、HL活性及血清中的高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定。血清游离胆固醇(FC)以及肝胰腺苹果酸脱氢酶(MDH)和LPS活性采用苏州科铭生物科技有限公司生产的试剂盒测定, 血清胆固醇酯(CE)含量为TC含量与FC含量的差值。

### 1.5 抗氧化能力及免疫性能指标分析

利用以上“样品制备和脂质代谢指标测定”中已制备好的肝胰腺和血清样品, 采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定总超氧化物歧化酶(T-SOD)、总抗氧化能力(T-AOC)、过氧化物酶(POD)、酸性磷酸酶(ACP)活性, 以及丙二醛(MDA)含量。 $\gamma$ -谷氨酰转肽酶( $\gamma$ -GT)和碱性磷酸酶(ALP)活性采用苏州科铭生物科技有限公司生产的试剂盒测定。血清中血蓝蛋白(Hc)含量根据Nickerson等<sup>[21]</sup>的方法测定。

### 1.6 常规生化成分及脂肪酸组成分析

实验饲料的水分含量采用105 °C烘干法进行测定<sup>[22]</sup>, 而梭子蟹样品的水分含量采用冷冻干燥法进行测定。实验饲料和梭子蟹样品中的粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定, 总碳水化合物含量采用苯酚—硫酸法测定<sup>[23]</sup>。参考Folch等<sup>[20]</sup>的方法, 使用氯仿: 甲醇(V/V=2:1)提取实验饲料和梭子蟹样品中的总脂并测定其含量。根

据Morrison等<sup>[24]</sup>的方法, 采用14%的三氟化硼—甲醇对总脂样品进行甲脂化后, 采用Agilent 5977A/7890B气相色谱—质谱联用仪对样品中的脂肪酸组成进行分析。

### 1.7 数据分析

数据均以平均值 $\pm$ 标准误(mean $\pm$ SE)表示。采用SPSS 18.0软件对实验数据进行统计分析, 首先采用Levene法对所有数据进行方差齐性检验, 若不满足齐性方差时再对百分比数据进行反正弦或平方根处理, 采用单因素方差分析法(One-Way ANOVA)对实验结果进行方差分析, 采用Duncan氏检验进行多重比较,  $P < 0.05$ 表示显著性差异。

## 2 结果

### 2.1 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体成活、生长和育肥性能的影响

三疣梭子蟹雌体的成活率随饲料中鱼油替代水平的升高而降低, 但各组均无显著性差异(表3)。就生长指标而言, 各组雌蟹平均终末体质量和增重率均无显著性差异, 分别为162.30~165.69 g和7.12%~7.77%。在育肥性能指标中, 各组雌蟹的GSI、HSI、MY和TEY平均值均无显著性差异, 分别为3.52%~4.05%、5.43%~5.97%、24.33%~27.47%和33.29%~36.82%。

### 2.2 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体脂质代谢指标的影响

Diet 3、Diet 4和Diet 5组雌蟹肝胰腺中的

表3 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体成活、生长和育肥性能的影响

Tab. 3 Effects of fish oil replacement by blending vegetable oils on survival, growth and fattening performance of adult female *P. trituberculatus*

指标 indices	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
成活率/% SR	86.67 $\pm$ 3.33	83.33 $\pm$ 3.33	83.33 $\pm$ 3.33	80.00 $\pm$ 5.77	76.67 $\pm$ 3.33
初始体质量/g IBW	151.88 $\pm$ 15.42	154.22 $\pm$ 13.23	153.85 $\pm$ 16.09	154.13 $\pm$ 12.88	151.68 $\pm$ 14.56
终末体质量/g FBW	162.51 $\pm$ 12.42	165.02 $\pm$ 11.23	165.69 $\pm$ 11.34	164.92 $\pm$ 10.48	162.30 $\pm$ 11.27
增重率/% WGR	7.22 $\pm$ 0.48	7.13 $\pm$ 0.36	7.77 $\pm$ 0.43	7.12 $\pm$ 0.33	7.20 $\pm$ 0.25
性腺指数/% GSI	3.52 $\pm$ 0.75	3.80 $\pm$ 0.50	4.05 $\pm$ 0.68	3.91 $\pm$ 0.99	3.53 $\pm$ 0.89
肝胰腺指数/% HSI	5.83 $\pm$ 0.89	5.97 $\pm$ 0.56	5.73 $\pm$ 0.87	5.54 $\pm$ 0.73	5.43 $\pm$ 0.98
出肉率/% MY	27.47 $\pm$ 2.65	26.78 $\pm$ 2.70	26.24 $\pm$ 3.25	24.96 $\pm$ 2.82	24.33 $\pm$ 2.49
总可食率/% TEY	36.82 $\pm$ 1.93	36.55 $\pm$ 1.82	36.02 $\pm$ 2.58	34.41 $\pm$ 1.72	33.29 $\pm$ 1.58

TG含量均显著高于Diet 1和Diet 2组( $P<0.05$ ), 而各组肝胰腺中的TC含量和HL活性均无显著性差异( $P>0.05$ )(表4)。Diet 1组雌蟹肝胰腺中的MDH活性显著高于Diet 5组( $P<0.05$ ), 但与其他3组差异不显著( $P>0.05$ )。雌蟹肝胰腺中的LPS活性随饲料鱼油替代水平的提高而上升, 而LPL活性在

Diet 2组最高, Diet 5组最低( $P<0.05$ )。

各组雌蟹血清中的TG和TC含量均存在显著性差异, 其中TG含量在Diet 3组最高, 而TC含量在Diet 4组最高( $P<0.05$ )(表5)。各组雌蟹血清中的CE、FC、LDL-C和HDL-C均无显著性差异( $P>0.05$ )。

表 4 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹成体雌蟹肝胰腺脂质代谢指标的影响

Tab. 4 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on lipid metabolism indices in the hepatopancreas of adult female *P. trituberculatus*

指标 indices		Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
甘油三酯/(mmol/g dry tissue)	TG	0.73±0.04 <sup>a</sup>	0.78±0.06 <sup>a</sup>	1.08±0.07 <sup>b</sup>	1.10±0.05 <sup>b</sup>	1.10±0.10 <sup>b</sup>
总胆固醇/(μmol/g dry tissue)	TC	3.56±0.03	3.53±0.03	3.52±0.07	3.40±0.05	3.49±0.07
苹果酸脱氢酶/(U/mg protein)	MDH	7.23±0.30 <sup>b</sup>	6.35±0.43 <sup>ab</sup>	6.40±0.40 <sup>ab</sup>	6.71±0.38 <sup>ab</sup>	6.04±0.27 <sup>a</sup>
脂肪酶/(U/g protein)	LPS	2.59±0.23 <sup>a</sup>	2.66±0.22 <sup>ab</sup>	2.79±0.22 <sup>ab</sup>	3.20±0.23 <sup>ab</sup>	3.34±0.22 <sup>b</sup>
脂蛋白酯酶/(U/mg protein)	LPL	1.27±0.14 <sup>ab</sup>	1.51±0.24 <sup>b</sup>	1.28±0.25 <sup>ab</sup>	1.15±0.08 <sup>ab</sup>	0.79±0.08 <sup>a</sup>
肝脂酶/(U/mg protein)	HL	1.44±0.10	1.71±0.26	1.24±0.14	1.46±0.17	1.19±0.13

注: 同行数据中上标字母不同表示差异显著( $P<0.05$ ), 下同

Notes: the superscript in the same column means significant difference ( $P<0.05$ ), the same below

表 5 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹成体雌蟹血清脂质代谢指标的影响

Tab. 5 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on lipid metabolism indices in the serum of adult female *P. trituberculatus*

指标 indices		Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
甘油三酯/(mmol/L)	TG	0.48±0.02 <sup>a</sup>	0.52±0.01 <sup>b</sup>	0.54±0.02 <sup>b</sup>	0.51±0.02 <sup>ab</sup>	0.50±0.03 <sup>a</sup>
总胆固醇/(mmol/L)	TC	0.66±0.04 <sup>a</sup>	0.70±0.05 <sup>b</sup>	0.71±0.05 <sup>b</sup>	0.72±0.04 <sup>b</sup>	0.68±0.05 <sup>ab</sup>
胆固醇酯/(mmol/L)	CE	0.45±0.04	0.45±0.05	0.45±0.06	0.45±0.03	0.46±0.04
游离胆固醇/(μmol/dL)	FC	2.50±0.10	2.53±0.14	2.56±0.17	2.54±0.14	2.57±0.09
低密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L)	LDL-C	0.23±0.04	0.23±0.02	0.23±0.01	0.24±0.02	0.22±0.02
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L)	HDL-C	0.25±0.01	0.26±0.01	0.27±0.02	0.26±0.01	0.25±0.02

### 2.3 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹抗氧化能力和免疫性能指标的影响

各组雌蟹肝胰腺中的T-SOD、T-AOC、MDA含量和 $\gamma$ -GT活性均无显著性差异( $P>0.05$ ), 而POD活性在Diet 1组最高, Diet 2组最低(表6)。Diet 2、3、4和5组肝胰腺中的ALP活性均显著高于Diet 1组, 而ACP活性在Diet 4组最高, Diet 2组最低。

Diet 2、Diet 3、Diet 4和Diet 5组雌蟹血清中的T-SOD活性均显著高于Diet 1组, 而POD活性在Diet 1组最高, Diet 5组最低(表7)。各

组雌蟹血清中的T-AOC、MDA和Hc含量均无显著性差异( $P>0.05$ )。雌蟹血清中的ALP活性随饲料鱼油替代水平的提高而显著降低, 而ACP活性在Diet 2组最高, Diet 3组最低。

### 2.4 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体常规营养组成的影响

肝胰腺中的水分和粗蛋白含量均无显著性差异( $P>0.05$ ), 而粗脂肪含量在Diet 5组最高, Diet 2组最低, 总碳水化合物在Diet 4组最高, Diet 1组最低(表8)。各组卵巢中的水分、粗脂肪和总碳水化合物含量均无显著性差异( $P>0.05$ ),

表 6 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体肝胰腺抗氧化能力和免疫性能的影响

Tab. 6 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on antioxidant capacity and immune performance indices in the hepatopancreas of adult female *P. trituberculatus*

指标 indices	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
总超氧化物歧化酶/(U/mg protein) T-SOD	4.23±0.14	3.78±0.21	4.31±0.14	3.98±0.15	4.07±0.18
总抗氧化能力/(U/mg protein) T-AOC	1.08±0.15	1.04±0.11	1.05±0.06	0.96±0.07	0.99±0.07
过氧化物酶/(U/mg protein) POD	2.27±0.12 <sup>c</sup>	1.71±0.08 <sup>a</sup>	1.87±0.10 <sup>ab</sup>	2.07±0.17 <sup>bc</sup>	2.18±0.08 <sup>bc</sup>
丙二醛/(nmol/mg protein) MDA	3.12±0.23	2.88±0.14	3.08±0.52	2.42±0.37	2.46±0.24
碱性磷酸酶/(U/mg protein) ALP	37.76±3.59 <sup>a</sup>	51.08±2.2 <sup>b</sup>	53.62±4.45 <sup>b</sup>	58.09±3.86 <sup>b</sup>	50.78±5.03 <sup>b</sup>
酸性磷酸酶/(U/mg protein) ACP	0.64±0.09 <sup>ab</sup>	0.56±0.08 <sup>a</sup>	0.75±0.16 <sup>b</sup>	0.76±0.05 <sup>b</sup>	0.70±0.09 <sup>ab</sup>
$\gamma$ -谷氨酰转肽酶/(U/mg protein) $\gamma$ -GT	0.39±0.04	0.43±0.02	0.43±0.04	0.45±0.04	0.47±0.04

表 7 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体血清抗氧化能力和免疫性能指标的影响

Tab. 7 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on antioxidant capacity and immune performance indices in the serum of adult female *P. trituberculatus*

指标 indices	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
总超氧化物歧化酶/(U/mL) T-SOD	33.23±0.75 <sup>a</sup>	43.67±0.95 <sup>b</sup>	38.08±1.87 <sup>b</sup>	40.46±1.81 <sup>b</sup>	42.12±1.81 <sup>b</sup>
总抗氧化能力/(U/mL) T-AOC	16.99±0.69	16.13±0.78	16.74±0.52	17.11±0.66	16.08±0.73
过氧化物酶/(U/mL) POD	11.90±0.26 <sup>b</sup>	11.88±0.46 <sup>b</sup>	10.44±0.45 <sup>ab</sup>	10.86±0.53 <sup>ab</sup>	10.02±0.65 <sup>a</sup>
丙二醛/(nmol/mL) MDA	2.32±0.34	2.68±0.31	3.11±0.29	3.07±0.19	3.03±0.55
血蓝蛋白/(mg/mL) Hc	80.88±2.82	75.89±2.77	73.99±1.99	74.09±2.37	74.84±2.07
碱性磷酸酶/(U/100 mL) ALP	125.33±10.85 <sup>c</sup>	95.67±5.35 <sup>b</sup>	93.33±5.51 <sup>ab</sup>	75.67±3.56 <sup>ab</sup>	72.67±7.88 <sup>a</sup>
酸性磷酸酶/(U/100 mL) ACP	12.06±0.46 <sup>b</sup>	13.39±0.40 <sup>b</sup>	9.87±0.60 <sup>a</sup>	11.35±0.40 <sup>ab</sup>	11.97±0.56 <sup>b</sup>

而粗蛋白含量在Diet 3组最高, 在Diet 5组最低。各组肌肉中的水分和粗脂肪含量均无显著性差异( $P>0.05$ ), 而粗蛋白含量在Diet 3组最高, Diet 5组最低; 总碳水化合物含量在Diet 3组最高, Diet 4组最低。

## 2.5 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体脂肪酸组成的影响

就肝胰腺中饱和脂肪酸(SFA)而言, C14:0和C15:0含量均随饲料鱼油替代水平的提高而降低, 而C16:0、C17:0和总饱和脂肪酸( $\Sigma$ SFA)其含量呈先升高后下降变化, 在Diet 2组最高, Diet 5组最低(表9)。就单不饱和脂肪酸(MUFA)而言, C16:1n7、C18:1n7及总单不饱和脂肪酸( $\Sigma$ MUFA)含量随鱼油替代水平的提高而整体降低, 而C22:1n9含量在Diet 2组最高, Diet 3组最低。就多不饱和脂肪酸(PUFA)而言, 总多不饱和脂肪酸( $\Sigma$ PUFA)组成在各实验组中无显著性差异( $P>$

0.05), 其主要PUFA如C18:2n6含量随鱼油替代水平的提高而整体上升, 而C20:4n6、C20:5n3、n-3多不饱和脂肪酸(n-3 PUFA)、总高度不饱和脂肪酸( $\Sigma$ HUFA)及n-3/n-6比例均在Diet 1组最高, Diet 5组最低; Diet 3组的C22:5n3含量显著高于Diet 4组( $P<0.05$ ), 但与其余3组差异不显著( $P>0.05$ ); 肝胰腺中的C22:6n3含量随鱼油替代水平的提高呈显著下降趋势, 而总n-6多不饱和脂肪酸(n-6 PUFA)含量在Diet 5组最高, Diet 1组最低。

就卵巢中SFA而言, C15:0和C17:0含量均在Diet 2组最高, Diet 5组最低, 而其余各组SFA和 $\Sigma$ SFA含量均无显著性差异( $P>0.05$ )(表10)。就MUFA而言, C17:1n7含量随鱼油替代水平的提高而整体下降, 而其余各组MUFA和 $\Sigma$ MUFA含量均无显著性差异( $P>0.05$ )。就PUFA而言, C18:2n6、C18:3n3和n-6 PUFA含量均在Diet 4组最高, 在Diet 2组最低, 而C20:4n6含量和n-3/n-6比

表 8 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体常规营养组成的影响(湿重)  
 Tab. 8 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on proximate composition of female adult *P. trituberculatus* (wet weight)

项目 items	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5	%
<b>肝胰腺 hepatopancreas</b>						
水分 moisture	71.3±5.52	69.93±6.95	65.92±5.84	68.01±6.37	70.5±3.37	
粗蛋白 crude protein	15.06±0.62	15.8±0.71	15.84±0.88	14.72±1.19	12.82±1.27	
粗脂肪 crude lipid	9.93±0.40 <sup>a</sup>	9.57±0.44 <sup>a</sup>	11.56±0.41 <sup>b</sup>	11.34±0.42 <sup>b</sup>	11.72±0.52 <sup>b</sup>	
总碳水化合物 total carbohydrate	0.65±0.03 <sup>a</sup>	0.66±0.01 <sup>a</sup>	0.73±0.03 <sup>b</sup>	0.74±0.01 <sup>b</sup>	0.66±0.02 <sup>a</sup>	
<b>卵巢 ovary</b>						
水分 moisture	59.47±2.94	60.34±3.01	57.48±2.3	59.36±2.71	61.04±2.66	
粗蛋白 crude protein	26.53±0.21 <sup>ab</sup>	26.37±0.32 <sup>ab</sup>	29.2±0.22 <sup>c</sup>	27.13±0.29 <sup>b</sup>	25.86±0.50 <sup>a</sup>	
粗脂肪 crude lipid	11.24±0.66	10.13±0.44	10.98±0.32	10.46±0.77	10.00±0.47	
总碳水化合物 total carbohydrate	0.64±0.03	0.64±0.01	0.68±0.02	0.70±0.01	0.66±0.02	
<b>肌肉 muscle</b>						
水分 moisture	82.94±2.17	83.01±1.08	82.46±1.65	84.91±1.5	84.21±1.9	
粗蛋白 crude protein	13.27±0.36 <sup>b</sup>	13.84±0.23 <sup>bc</sup>	14.29±0.33 <sup>c</sup>	12.25±0.29 <sup>a</sup>	12.11±0.25 <sup>a</sup>	
粗脂肪 crude lipid	1.17±0.08	1.14±0.07	1.19±0.08	1.07±0.06	0.93±0.17	
总碳水化合物 total carbohydrate	0.90±0.01 <sup>bc</sup>	0.88±0.01 <sup>ab</sup>	0.94±0.02 <sup>c</sup>	0.85±0.01 <sup>a</sup>	0.87±0.01 <sup>ab</sup>	

例均在Diet 2组最高, 在Diet 4组最低;  $\Sigma$ HUFA含量随鱼油替代水平的提高而显著降低( $P>0.05$ )。

就肌肉中SFA而言, C14:0和C16:0含量随鱼油替代水平的提高而整体降低(表11); Diet 4和Diet 5组肌肉中的C18:0含量显著高于其他组, 而 $\Sigma$ SFA含量在Diet 1组最高, Diet 2组最低。就MUFA而言, C16:1n7和C18:1n7含量随鱼油替代水平的提高而整体降低, 而C17:1n7和 $\Sigma$ MUFA含量均在Diet 1组最高, Diet 3组最低。就PUFA而言, Diet 4组肌肉中的C20:2n6含量显著高于Diet 3和Diet 5组( $P<0.05$ ), 但与其余2组间差异不显著( $P>0.05$ ); 肌肉中的C20:5n3含量在Diet 3组最低, Diet 5组最高, 而C22:5n3和C22:6n3含量分别在Diet 2和Diet 3组最高( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体成活、生长和育肥性能的影响

经过45 d的育肥养殖后, 尽管各组三疣梭子蟹雌体的成活率无显著性差异, 但随饲料中鱼油替代水平的提高而降低, 暗示了饲料中过高

的鱼油替代可能会对三疣梭子蟹雌体的成活造成负面影响。各组雌蟹的增重率较为接近, 无显著差异, 体质量与育肥前相比无明显变化, 这与先前对幼蟹的研究不一致<sup>[25-26]</sup>。分析这种差异的可能原因: 甲壳动物的生长依赖于蜕壳<sup>[27-28]</sup>, 本研究中所采用的实验蟹均为生殖蜕壳后雌蟹, 已经完成最后一次蜕壳, 无需蜕壳生长, 因此其体质量与育肥前相比无明显变化。

卵巢、肝胰腺和肌肉是三疣梭子蟹雌体主要的三大可食部位, 因此通常采用GSI、HSI、MY和TEY来评价其育肥效果<sup>[7]</sup>。本研究中, 采用混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体进行为期45 d的育肥发现, 各组雌蟹GSI、HSI、MY和TEY并无显著性差异, 这与赵磊等<sup>[12]</sup>对中华绒螯蟹雄体育肥的结果较为相似。分析其原因: 本研究为了使实验结果更接近生产实际, 采用了实用饲料配方, 饲料原料中的鱼粉、虾粉和乌贼粉含有一定量HUFA, 这可能已经可以满足三疣梭子蟹雌体对HUFA的需求, 因此采用混合植物油替代鱼油对其育肥性能并无显著影响。此外, 经过45 d育肥后, 各组雌蟹的平均GSI由初始的0.83%升高至3.52%~4.05%, 这与先



表9 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体肝胰腺脂肪酸组成的影响  
 Tab.9 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on fatty acid profiles (total fatty acids) of hepatopancreas of female adult *P. trituberculatus* %

项目 items	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
C14:0	3.14±0.03 <sup>c</sup>	2.88±0.60 <sup>c</sup>	2.41±0.09 <sup>bc</sup>	1.75±0.03 <sup>ab</sup>	1.19±0.33 <sup>a</sup>
C15:0	0.73±0.11 <sup>c</sup>	0.55±0.10 <sup>bc</sup>	0.49±0.02 <sup>b</sup>	0.37±0.04 <sup>ab</sup>	0.26±0.07 <sup>a</sup>
C16:0	12.71±2.64 <sup>a</sup>	17.25±0.36 <sup>b</sup>	13.76±0.65 <sup>ab</sup>	11.97±1.19 <sup>a</sup>	10.27±0.24 <sup>a</sup>
C17:0	0.53±0.04 <sup>c</sup>	0.55±0.06 <sup>c</sup>	0.41±0.02 <sup>b</sup>	0.41±0.01 <sup>b</sup>	0.27±0.04 <sup>a</sup>
C18:0	4.46±0.27	5.22±0.68	4.72±0.35	4.98±0.33	4.22±0.27
C20:0	0.47±0.06	0.57±0.19	0.44±0.05	0.50±0.06	0.42±0.05
C22:0	0.27±0.10	0.32±0	0.41±0.06	0.46±0.12	0.32±0.06
∑SFA	22.50±2.72 <sup>b</sup>	27.58±1.88 <sup>c</sup>	22.85±0.78 <sup>b</sup>	20.58±1.35 <sup>ab</sup>	17.10±0.65 <sup>a</sup>
C16:1n7	7.52±0.88 <sup>b</sup>	4.45±0.48 <sup>ab</sup>	5.40±0.47 <sup>ab</sup>	4.80±0.31 <sup>ab</sup>	3.41±1.40 <sup>a</sup>
C17:1n7	0.31±0.26	0.49±0.15	0.48±0.04	0.40±0.13	0.44±0
C18:1n9	25.05±0.82	24.65±1.15	24.74±0.43	25.91±0.25	24.59±0.70
C18:1n7	5.28±0.63 <sup>c</sup>	4.56±0.11 <sup>b</sup>	4.96±0.45 <sup>b</sup>	1.30±0.01 <sup>a</sup>	1.06±0.77 <sup>a</sup>
C20:1n9	2.65±0.65	2.67±0.38	2.26±0.11	2.81±0.15	2.21±0.50
C22:1n9	0.45±0.09 <sup>ab</sup>	0.64±0.11 <sup>b</sup>	0.23±0.01 <sup>a</sup>	0.44±0.08 <sup>ab</sup>	0.41±0.08 <sup>ab</sup>
∑MUFA	41.58±1.21 <sup>b</sup>	37.63±2.21 <sup>ab</sup>	38.19±1.12 <sup>ab</sup>	35.37±0.55 <sup>ab</sup>	32.06±2.05 <sup>a</sup>
C18:2n6	8.27±1.99 <sup>a</sup>	12.48±1.15 <sup>ab</sup>	12.17±1.48 <sup>ab</sup>	13.19±1.48 <sup>ab</sup>	14.31±1.39 <sup>b</sup>
C18:3n3	1.22±0	1.20±0.01	1.74±0.18	2.09±0.42	1.70±0.42
C20:2n6	1.29±0.22	1.36±0.01	1.25±0.09	1.62±0.16	1.47±0.18
C20:4n6	1.41±0.12 <sup>b</sup>	1.06±0.17 <sup>ab</sup>	1.08±0.09 <sup>ab</sup>	1.41±0.10 <sup>b</sup>	0.68±0.19 <sup>a</sup>
C20:5n3	5.25±0.66 <sup>b</sup>	3.57±0.18 <sup>ab</sup>	3.75±0.57 <sup>ab</sup>	4.84±0.36 <sup>b</sup>	2.54±0.83 <sup>a</sup>
C22:5n3	1.47±0.19 <sup>ab</sup>	1.45±0.12 <sup>ab</sup>	1.84±0.47 <sup>b</sup>	1.07±0.27 <sup>a</sup>	1.30±0.34 <sup>ab</sup>
C22:6n3	12.07±1.78 <sup>c</sup>	10.24±0.39 <sup>bc</sup>	8.54±0.66 <sup>b</sup>	8.35±0.52 <sup>b</sup>	5.70±0.75 <sup>a</sup>
∑PUFA	31.73±0.26	31.98±1.86	31.01±0.82	33.28±1.68	28.10±1.21
n-3PUFA	20.29±2.31 <sup>c</sup>	16.68±0.54 <sup>b</sup>	16.10±1.02 <sup>b</sup>	16.64±0.52 <sup>b</sup>	11.39±1.04 <sup>a</sup>
n-6PUFA	11.44±2.06 <sup>a</sup>	15.30±1.32 <sup>b</sup>	14.90±1.50 <sup>ab</sup>	16.64±1.73 <sup>b</sup>	16.71±1.38 <sup>b</sup>
n-3/n-6	1.87±0.54 <sup>b</sup>	1.09±0.06 <sup>ab</sup>	1.12±0.19 <sup>ab</sup>	1.02±0.11 <sup>ab</sup>	0.70±0.10 <sup>a</sup>
∑HUFA	21.95±2.47 <sup>b</sup>	18.02±0.70 <sup>b</sup>	17.42±1.07 <sup>b</sup>	18.31±0.52 <sup>b</sup>	12.23±1.27 <sup>a</sup>

前采用冰鲜杂鱼等天然饵料对生殖蜕壳后三疣梭子蟹雌体育肥第30~60天的结果(平均GSI为4.2%~5.12%)较为接近<sup>[7]</sup>, 说明采用人工配合饲料对三疣梭子蟹雌体进行育肥具有实际可行性。

### 3.2 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体脂质代谢的影响

植物油和鱼油的脂肪酸组成存在较大差

异, 因此采用植物油替代鱼油势必会影响甲壳动物的脂质代谢情况<sup>[12, 29]</sup>。本研究中, 采用混合植物油替代鱼油可明显提高三疣梭子蟹雌体肝胰腺和血清中的TG含量, 说明采用混合植物油替代鱼油有利于TG在雌蟹体内的积累, 这可能是由于混合植物油替代鱼油提高了饲料中MUFA的含量, 从而促进了肝胰腺中脂肪酸和TG合成相关基因的表达<sup>[29-30]</sup>。胆固醇是甲壳动物

表 10 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体卵巢脂肪酸组成的影响  
 Tab. 10 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on fatty acid profiles (total fatty acids) of ovaries of female adult *P. trituberculatus* %

项目 items	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5
C14:0	1.70±0.03	1.79±0.17	1.70±0.04	1.67±0.08	1.48±0.15
C15:0	0.41±0.02 <sup>b</sup>	0.44±0.02 <sup>b</sup>	0.37±0.02 <sup>ab</sup>	0.37±0.01 <sup>ab</sup>	0.31±0.02 <sup>a</sup>
C16:0	14.63±0.47	14.06±0.39	14.07±0.22	13.47±0.26	13.95±0.39
C17:0	0.47±0.03 <sup>ab</sup>	0.52±0.03 <sup>b</sup>	0.49±0.05 <sup>ab</sup>	0.45±0.01 <sup>ab</sup>	0.39±0.01 <sup>a</sup>
C18:0	5.37±0.40	5.87±0.69	6.22±0.14	5.83±0.28	5.99±0.22
∑SFA	22.96±0.37	23.74±1.26	23.45±0.21	22.65±0.54	23.78±0.61
C16:1n7	5.20±0.39	4.83±0.48	4.70±0.68	4.29±0.37	4.14±0.53
C17:1n7	0.64±0.02 <sup>b</sup>	0.61±0.03 <sup>b</sup>	0.50±0.05 <sup>a</sup>	0.51±0.02 <sup>a</sup>	0.47±0.02 <sup>a</sup>
C18:1n9	18.60±0.70	18.42±0.29	18.56±0.48	19.09±0.29	19.09±0.51
C18:1n7	4.47±0.09	4.38±0.06	3.97±0.26	4.05±0.02	4.13±0.20
C20:1n9	0.72±0.05	0.74±0.08	0.80±0.06	0.81±0.06	0.81±0.10
∑MUFA	29.88±0.92	29.27±0.67	28.7±1.22	28.92±0.20	28.88±0.88
C18:2n6	3.78±0.59 <sup>a</sup>	2.49±0.36 <sup>a</sup>	6.35±1.79 <sup>bc</sup>	7.93±1.33 <sup>c</sup>	7.24±0.98 <sup>bc</sup>
C18:3n3	0.46±0.06 <sup>ab</sup>	0.32±0.03 <sup>a</sup>	0.68±0.16 <sup>bc</sup>	0.95±0.13 <sup>c</sup>	0.74±0.13 <sup>bc</sup>
C20:2n6	0.67±0.13	0.56±0.08	0.67±0.11	0.72±0.08	0.91±0.10
C20:4n6	2.61±0.19 <sup>b</sup>	2.72±0.19 <sup>b</sup>	2.34±0.08 <sup>ab</sup>	2.14±0.12 <sup>a</sup>	2.20±0.13 <sup>a</sup>
C20:5n3	9.95±0.53 <sup>b</sup>	9.70±0.76 <sup>b</sup>	8.78±0.33 <sup>ab</sup>	8.35±0.24 <sup>a</sup>	8.81±0.34 <sup>ab</sup>
C22:5n3	1.42±0.22	1.59±0.21	1.60±0.10	1.50±0.07	1.29±0.08
C22:6n3	21.67±0.85	20.97±0.82	20.75±0.87	20.32±0.53	19.92±0.46
∑PUFA	40.81±1.64	38.61±1.87	41.38±1.42	42.17±1.32	41.30±1.07
n-3PUFA	33.67±1.07	32.73±1.35	31.95±0.62	31.30±0.51	30.95±0.45
n-6PUFA	7.14±0.91 <sup>ab</sup>	5.87±0.54 <sup>a</sup>	9.43±1.87 <sup>ab</sup>	10.87±1.27 <sup>b</sup>	10.35±1.16 <sup>b</sup>
n-3/n-6	4.98±0.70 <sup>bc</sup>	5.66±0.34 <sup>c</sup>	3.81±0.74 <sup>ab</sup>	3.02±0.42 <sup>a</sup>	3.10±0.34 <sup>a</sup>
∑HUFA	36.36±1.20 <sup>b</sup>	35.55±1.51 <sup>ab</sup>	34.35±0.66 <sup>ab</sup>	33.52±0.55 <sup>ab</sup>	33.16±0.46 <sup>a</sup>

类固醇激素合成的重要前体物质，但其自身无法合成胆固醇，主要依赖于饵料中外源性胆固醇<sup>[31]</sup>。本研究表明，饲料中25%~75%的鱼油替代水平可显著提高雌蟹血清中的TC含量，这与在中华绒螯蟹中的研究结果较为相似<sup>[12]</sup>，说明饲料中混合植物油替代25%~75%的鱼油有利于三疣梭子蟹雌体对胆固醇的吸收和利用。

还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(NADPH)是动物体内脂肪酸合成的重要辅酶和供氢体，其供应情况直接影响脂肪酸的合成<sup>[32]</sup>，而MDH活性的高低直接关系到NADPH的生成<sup>[33-34]</sup>，进而间

接调节脂肪酸的合成代谢<sup>[35]</sup>。本研究中，梭子蟹雌体肝胰腺中的MDH活性随鱼油替代水平的提高而降低，这与赵磊等<sup>[12]</sup>的研究结果相类似，可能是由于混合植物油替代鱼油提高了饲料中n-6 PUFA含量，从而抑制了MDH的活性<sup>[30]</sup>。LPS是酯酶的一种，其分泌和活性受饵料脂肪和脂肪酸组成的影响<sup>[36-37]</sup>。本研究中，三疣梭子蟹雌体肝胰腺中的LPS活性随鱼油替代水平的提高呈上升变化，这与对中华绒螯蟹和红螯光壳螯虾(*Cherax quadricarinatus*)的研究结果较为相似<sup>[12, 37]</sup>，暗示了饲料中高比例的n-6 PUFA可提高三疣梭子

表 11 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体肌肉脂肪酸组成的影响  
 Tab. 11 Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on fatty acid profiles (total fatty acids) of muscle of female adult *P. trituberculatus*

项目 items	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5	%
C14:0	0.39±0.02 <sup>b</sup>	0.32±0.04 <sup>ab</sup>	0.28±0.04 <sup>a</sup>	0.27±0.02 <sup>a</sup>	0.26±0.04 <sup>a</sup>	
C16:0	12.65±0.48 <sup>b</sup>	11.47±0.39 <sup>ab</sup>	11.29±0.74 <sup>ab</sup>	10.08±0.92 <sup>a</sup>	9.82±0.26 <sup>a</sup>	
C17:0	0.54±0.03	0.53±0.02	0.45±0.06	0.55±0.04	0.53±0.01	
C18:0	8.87±0.46 <sup>a</sup>	7.30±0.20 <sup>a</sup>	7.81±0.11 <sup>a</sup>	10.53±0.66 <sup>b</sup>	10.60±0.86 <sup>b</sup>	
C20:0	0.41±0.04	0.33±0.03	0.41±0.09	0.51±0.08	0.51±0.02	
C22:0	0.28±0.03	0.23±0.02	0.24±0.04	0.25±0.02	0.30±0.08	
ΣSFA	23.34±0.18 <sup>c</sup>	20.34±0.34 <sup>a</sup>	20.63±0.63 <sup>ab</sup>	22.25±0.30 <sup>bc</sup>	22.14±1.01 <sup>bc</sup>	
C16:1n7	2.30±0.38 <sup>b</sup>	1.69±0.15 <sup>ab</sup>	1.56±0.28 <sup>ab</sup>	1.48±0.08 <sup>ab</sup>	1.18±0.24 <sup>a</sup>	
C17:1n7	0.39±0.04 <sup>b</sup>	0.31±0.02 <sup>ab</sup>	0.25±0.02 <sup>a</sup>	0.29±0.01 <sup>ab</sup>	0.32±0.02 <sup>ab</sup>	
C18:1n9	17.85±0.80	16.54±0.63	16.51±0.18	16.89±0.37	17.86±0.65	
C18:1n7	3.67±0.10 <sup>b</sup>	3.43±0.17 <sup>b</sup>	3.21±0.06 <sup>ab</sup>	3.25±0.44 <sup>ab</sup>	2.61±0.11 <sup>a</sup>	
C20:1n9	0.36±0.03	0.39±0.04	0.40±0.03	0.25±0	0.46±0.24	
C22:1n9	0.57±0.36	0.24±0.02	0.24±0.03	0.23±0.01	0.30±0.06	
ΣMUFA	24.29±0.24 <sup>b</sup>	22.60±0.84 <sup>a</sup>	22.09±0.45 <sup>a</sup>	22.40±0.75 <sup>a</sup>	22.60±0.59 <sup>a</sup>	
C18:2n6	3.87±0.37	4.73±1.41	5.28±1.50	5.84±0.14	6.08±0.28	
C18:3n3	0.31±0.06	0.32±0.08	0.38±0.12	0.24±0.02	0.19±0.08	
C20:2n6	0.53±0.07 <sup>ab</sup>	0.55±0.08 <sup>ab</sup>	0.50±0.06 <sup>a</sup>	0.75±0.06 <sup>b</sup>	0.42±0.07 <sup>a</sup>	
C20:4n6	3.52±0.37	3.07±0.24	2.87±0.92	4.49±0.72	3.46±1.44	
C20:5n3	19.89±0.94 <sup>b</sup>	17.53±0.52 <sup>a</sup>	15.78±2.13 <sup>a</sup>	24.12±1.50 <sup>c</sup>	24.96±1.09 <sup>c</sup>	
C22:5n3	1.04±0.15 <sup>ab</sup>	1.76±0.68 <sup>b</sup>	1.32±0.60 <sup>ab</sup>	0.34±0.01 <sup>a</sup>	0.13±0.01 <sup>a</sup>	
C22:6n3	16.57±0.56 <sup>c</sup>	19.98±1.14 <sup>d</sup>	20.89±1.02 <sup>d</sup>	13.63±1.24 <sup>b</sup>	10.51±0.39 <sup>a</sup>	
ΣPUFA	45.91±1.02	48.15±0.99	47.17±0.47	49.5±0.82	45.99±3.13	
n-3PUFA	37.92±0.57	39.70±1.91	38.46±0.87	38.31±0.46	35.95±1.47	
n-6PUFA	7.99±0.46	8.45±1.40	8.71±0.53	11.19±0.76	10.04±1.81	
n-3/n-6	4.78±0.22	5.15±0.91	4.46±0.38	3.46±0.26	3.83±0.69	
ΣHUFA	41.51±0.79	42.88±2.06	41.39±1.82	42.91±0.89	39.49±2.83	

蟹雌体肝胰腺中的LPS活性,但其机制还有待进一步研究。LPL主要催化水解脂蛋白和乳糜微粒中的甘油三酯释放出游离脂肪酸供机体进行脂质合成或氧化供能<sup>[38-39]</sup>。本研究中LPL活性随鱼油替代水平的升高呈先升高后降低的变化,在Diet 2组LPL活性最高,Diet 5组最低,说明高比例鱼油替代水平会抑制三疣梭子蟹雌体肝胰腺中的LPL活性,这与潘瑜等<sup>[40]</sup>对鲤(*Cyprinus carpio*)的研究结果相似,分析其可能原因是由于HUFA

对肝胰腺LPL mRNA表达的促进作用强于油酸(C18:1n9)和亚油酸(C18:2n6),进而诱导肝胰腺LPL合成增加所致,这在真鲷(*Pagrus major*)中已经有所报道<sup>[41]</sup>。

### 3.3 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体抗氧化能力和免疫性能的影响

抗氧化酶(如SOD、POD和T-AOC等)是甲壳动物抗氧化防御系统的重要组成部分,在清

除机体氧自由基、防止组织氧化损伤等方面具有重要作用<sup>[17, 42]</sup>。本研究发现, 采用混合植物油替代25%~100%鱼油后显著提高了三疣梭子蟹雌体血清中的T-SOD活性, 这与对中华绒螯蟹幼蟹的研究结果基本一致<sup>[25]</sup>。此外, 肝胰腺和血清中的POD活性均在全鱼油组最高, 这可能是由于全鱼油组摄入过多的HUFA导致机体内过氧化物含量升高, 因此机体适应性地提高POD的活性来降低过氧化物对机体的危害<sup>[43-44]</sup>。

采用植物油替代鱼油除了影响甲壳动物的抗氧化能力外, 还可能影响其免疫性能<sup>[12, 25]</sup>。ALP和ACP是2种重要的非特异性磷酸水解酶, 能催化磷酸酯的水解和磷酸基团的转移反应, 在甲壳动物的免疫防御中发挥着重要作用<sup>[17, 45]</sup>。本研究发现, 三疣梭子蟹雌体肝胰腺中的ACP和ALP活性在Diet 4组(75%替代组)最高, 而在Diet 5组(100%替代组)略有降低, 这与以往的研究结果相似<sup>[25, 42]</sup>, 说明饲料中植物油与鱼油的合理搭配可提高梭子蟹的免疫能力, 但过高的替代水平则会对其免疫应答产生一定抑制作用。

### 3.4 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体组织常规营养成分的影响

肝胰腺、卵巢和肌肉是三疣梭子蟹雌体的三大可食部位, 其生化组成是评价三疣梭子蟹雌体营养价值的重要指标<sup>[7]</sup>。本研究发现, 饲料中50%以上的鱼油替代水平可显著提高三疣梭子蟹雌体肝胰腺中的总脂含量, 这与对中华绒螯蟹的研究结果相类似<sup>[14, 46]</sup>, 这可能是由于混合植物油替代鱼油提高了饲料中的MUFA含量, 从而促进了中性脂肪(如甘油三酯等)在肝胰腺中的合成和沉积<sup>[47, 30]</sup>。糖类(或碳水化合物)是甲壳动物生命活动过程中的重要能量物质, 其含量受饵料和环境等因素的影响<sup>[48-49]</sup>。本研究结果显示, 饲料中50%~75%的鱼油替代水平可显著提高三疣梭子蟹雌体肝胰腺中的总碳水化合物含量, 可能是由于采用混合植物油替代鱼油后提高了饲料中的MUFA和亚油酸含量, 而MUFA和亚油酸相比其他脂肪酸更容易被 $\beta$ 氧化供能<sup>[50]</sup>, 因此间接降低了机体对碳水化合物的利用程度, 从而有利于组织中总碳水化合物的沉积。

本研究中, 三疣梭子蟹卵巢和肌肉中的粗蛋白含量均在50%鱼油替代组最高, 说明饲料中一定比例的鱼油替代有利于三疣梭子蟹雌体组

织中蛋白质的沉积。以往的研究显示, 鱼油中的 $V_A$ 和 $V_E$ 含量分别约为1.71和2.02  $\mu\text{g/g}$ <sup>[51]</sup>, 而大豆油中 $V_A$ 和 $V_E$ 含量远远高于鱼油, 分别约为1.82和2.15  $\text{mg/g}$ <sup>[52]</sup>, 因此适量的鱼油替代不仅改善了饲料脂肪酸组成的平衡性, 同时提高了脂溶性维生素 $V_A$ 和 $V_E$ 的含量。以往的研究表明适当提高饲料的 $V_A$ 含量有利于凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)组织中蛋白质的沉积<sup>[53]</sup>。由此推测50%鱼油替代水平促进组织中蛋白质沉积的原因可能与之相同, 但其具体机理还有待进一步研究。

### 3.5 混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹雌体组织脂肪酸组成的影响

植物油与鱼油的脂肪酸组成存在较大差异, 因此饲料中混合植物油替代鱼油势必会改变饲料中的脂肪酸组成, 从而影响蟹类组织中的脂肪酸组成<sup>[14, 54]</sup>。本研究中, 三疣梭子蟹雌体肝胰腺中的C14:0、C15:0、C16:0、C17:0、 $\Sigma\text{SFA}$ 、C16:1n7、C18:1n7、C22:6n3、总n-3多不饱和脂肪酸( $\Sigma\text{n-3PUFA}$ )和 $\Sigma\text{HUFA}$ 含量均随饲料中相应脂肪酸含量的下降整体呈下降趋势, 而C18:2n6和总n-6多不饱和脂肪酸( $\Sigma\text{n-6 PUFA}$ )含量随饲料中相应脂肪酸含量的升高整体呈上升变化, 这与对中华绒螯蟹的研究结果相类似<sup>[14]</sup>, 说明三疣梭子蟹卵巢发育阶段肝胰腺中的脂肪酸易受到饲料脂肪酸组成的影响。

本研究结果显示, 三疣梭子蟹卵巢中的C15:0、C17:0、C17:1n7、C20:4n6、C20:5n3和 $\Sigma\text{n-3 PUFA}$ 的含量随饲料中相应脂肪酸含量的降低整体呈下降变化, 而C18:2n6、C18:3n3和 $\Sigma\text{n-3 PUFA}$ 饲料中相应脂肪酸含量的上升整体呈上升变化, 这与对中华绒螯蟹雄体的研究结果相类似<sup>[14]</sup>, 说明饲料中的脂肪酸组成对三疣梭子蟹卵巢的脂肪酸组成具有一定影响。而各组卵巢中的C18:0、C16:1n7、C18:1n9、C18:1n7、C22:5n3和C22:6n3含量均无显著性差异, 暗示三疣梭子蟹卵巢中的这些脂肪酸组成具有较高的保守性, 可能是由于这些脂肪酸, 尤其是EPA(C20:5n3)和DHA(C22:6n3)对蟹类繁殖性能具有重要的作用导致<sup>[54-55]</sup>。

三疣梭子蟹雌体肌肉中的C14:0、C16:0、C16:1n7、C18:1n7和C20:5n3含量随饲料中相应脂肪酸含量的下降整体呈现下降变化, 这与其他

甲壳动物的研究结果相类似<sup>[37, 56-57]</sup>。说明三疣梭子蟹雌体肌肉中的脂肪酸组成在一定程度上受饲料脂肪酸组成的影响。肌肉中的HUFA含量明显高于肝胰腺和卵巢, 这与中华绒螯蟹相类似<sup>[46, 58]</sup>。肌肉中高比例的HUFA可能是因为其磷脂含量较高<sup>[7]</sup>, 细胞膜磷脂中高含量的HUFA与其渗透压调节和低温适应能力有关<sup>[59-60]</sup>。

综上所述, 育肥饲料中采用混合植物油(豆油: 菜籽油=1: 1)替代鱼油对三疣梭子蟹雌体的育肥性能无显著影响, 但可提高肝胰腺中甘油三酯、粗脂肪和n-6PUFA含量, 以及过氧化物酶和磷酸酶活性; 50%的鱼油替代水平可显著提高卵巢和肌肉中蛋白质含量, 但100%的鱼油替代水平会降低肝胰腺和卵巢的HUFA含量。

#### 参考文献:

- [1] Turchini G M, Francis D S, Senadheera S P S D, *et al.* Fish oil replacement with different vegetable oils in Murray cod: evidence of an "omega-3 sparing effect" by other dietary fatty acids[J]. *Aquaculture*, 2011, 315(3-4): 250-259.
- [2] Tacon A G J, Metian M. Aquaculture feed and food safety[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008, 1140(1): 50-59.
- [3] Nasopoulou C, Zabetakis I. Benefits of fish oil replacement by plant originated oils in compounded fish feeds. A review[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 47(2): 217-224.
- [4] Brown P B, Hart S D. Soybean oil and other n-6 polyunsaturated fatty acid-rich vegetable oils[M]//Turchini G M, Ng W K, Tocher D R. Fish Oil Replacement and Alternative Lipid Sources in Aquaculture Feeds. Boca Roton: Chemical Rubber Company Press, 2010: 133-160.
- [5] 杨宁, 周素明, 王国良, 等. 三疣梭子蟹B型清道夫受体蛋白的原核表达及细胞、组织分布[J]. *水产学报*, 2018, 42(1): 39-47.  
Yang N, Zhou S M, Wang G L, *et al.* Prokaryotic expression, cell and tissue distribution of the class B scavenger receptor in *Portunus trituberculatus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(1): 39-47(in Chinese).
- [6] He J, Xuan F J, Shi H, *et al.* Comparison of nutritional quality of three edible tissues of the wild-caught and pond-reared swimming crab (*Portunus trituberculatus*) females[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 75: 624-630.
- [7] 吴旭干, 汪倩, 楼宝, 等. 育肥时间对三疣梭子蟹卵巢发育和营养品质的影响[J]. *水产学报*, 2014, 38(2): 170-182.  
Wu X G, Wang Q, Lou B, *et al.* Effects of fattening period on ovarian development and nutritional quality of female swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(2): 170-182(in Chinese).
- [8] 王慧, 施文正, 吴旭干, 等. 饲料对雌体三疣梭子蟹不同部位滋味的的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(19): 356-362.  
Wang H, Shi W Z, Wu X G, *et al.* Effects of dietary on taste of different parts of female juvenile swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(19): 356-362(in Chinese).
- [9] Wang S, He Y, Wang Y Y, *et al.* Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis*[J]. *Food Chemistry*, 2016, 200: 24-31.
- [10] Wu X G, Cheng Y X, Sui L Y, *et al.* Effect of dietary supplementation of phospholipids and highly unsaturated fatty acids on reproductive performance and offspring quality of Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards), female broodstock[J]. *Aquaculture*, 2007, 273(4): 602-613.
- [11] Wen X B, Chen L Q, Ai C X, *et al.* Variation in lipid composition of Chinese mitten-handed crab, *Eriocheir sinensis* during ovarian maturation[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2001, 130(1): 95-104.
- [12] 赵磊, 龙晓文, 吴旭干, 等. 育肥饲料中混合植物油替代鱼油对中华绒螯蟹成体雄蟹性腺发育、脂质代谢、抗氧化及免疫性能的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(2): 455-467.  
Zhao L, Long X W, Wu X G, *et al.* Effects of fish oil replacement by blending vegetable oils in fattening diets on gonadal development, lipid metabolism, antioxidant and immune capacities of adult male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(2): 455-467(in Chinese).
- [13] Turchini G M, Torstensen B E, Ng W K. Fish oil replacement in finfish nutrition[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2009, 1(1): 10-57.
- [14] 赵磊, 龙晓文, 吴旭干, 等. 混合植物油替代鱼油对中华绒螯蟹成体雄蟹常规成分和脂肪酸组成的影响[J]. *动物学杂志*, 2016, 51(6): 1071-1083.  
Zhao L, Long X W, Wu X G, *et al.* Effects of fish oil replacement by blending vegetable oils in fattening diets on proximate composition and fatty acid composition of



- adult male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Chinese Journal of Zoology, 2016, 51(6): 1071-1083(in Chinese).
- [15] 庄柯瑾. 饲料中植物油替代鱼油对中华绒螯蟹气味品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.  
Zhuang K J. Effects of dietary fish oil replacement by vegetable oils on odor quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016(in Chinese).
- [16] 潘桂平, 候文杰, 吴旭干, 等. 水温和单体筐养对三疣梭子蟹雌体卵巢发育和常规生化成分的影响[J]. 海洋渔业, 2015, 37(6): 550-556.  
Pan G P, Hou W J, Wu X G, *et al.* Effects of water temperature and single crab basket culture on ovarian development and tissue proximate composition of female *Portunus trituberculatus*[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(6): 550-556(in Chinese).
- [17] Long X W, Wu X G, Zhao L, *et al.* Effects of dietary supplementation with *Haematococcus pluvialis* cell powder on coloration, ovarian development and antioxidation capacity of adult female Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. *Aquaculture*, 2017, 473: 545-553.
- [18] 徐敏杰, 张佳鑫, 黄根勇, 等. L-色氨酸和褪黑激素对中华绒螯蟹血清血糖水平及肝胰腺抗氧化能力的影响[J]. 水产学报, 2018, 42(1): 91-99.  
Xu M J, Zhang J X, Huang G Y, *et al.* Effects of L-tryptophan and melatonin on the serum glucose level and antioxidant capacity in the hepatopancreas of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(1): 91-99(in Chinese).
- [19] 宣富君, 姜森颢, 卞勋光, 等. 室内养殖条件下三疣梭子蟹的生殖蜕壳和交配行为[J]. 动物学杂志, 2014, 49(4): 579-586.  
Xuan F J, Jiang S H, Bian X G, *et al.* Reproductive molt and mating behavior of the swimming crab *Portunus trituberculatus* in the laboratory-reared condition[J]. Chinese Journal of Zoology, 2014, 49(4): 579-586(in Chinese).
- [20] Folch J, Lees M, Stanley G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226: 497-509.
- [21] Nickerson K W, Van Holde K E. A comparison of molluscan and arthropod hemocyanin- I . Circular dichroism and absorption spectra[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry*, 1971, 39(4): 855-872.
- [22] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists[M]. 16th ed. Arlington, VA, USA: Association of Official Analytical Chemists, 1995.
- [23] Kochert G. Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method[C]//Hellebust J A, Craigie J S. Handbook of Phycological Methods, Physiological and Biochemical Methods. Cambridge: Cambridge University Press, 1978: 95-97.
- [24] Morrison W R, Smith L M. Preparation of fatty acid methyl esters and dimethylacetals from lipids with boron fluoride--methanol[J]. Journal of Lipid Research, 1964, 5: 600-608.
- [25] 陈彦良, 李二超, 禹娜, 等. 豆油替代鱼油对中华绒螯蟹幼蟹生长、非特异性免疫和抗病力的影响[J]. 中国水产科学, 2014, 21(3): 511-521.  
Chen Y L, Li E C, Yu N, *et al.* Effect of replacing dietary fish oil with soybean oil on growth, non-specific immune response, and resistance to *Aeromonas hydrophila* challenge in Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(3): 511-521(in Chinese).
- [26] 张稳, 谢奉军, 金敏, 等. 饲料中n-3高不饱和和脂肪酸含量对三疣梭子蟹幼蟹生长性能及脂肪酸组成的影响[J]. 动物营养学报, 2014, 26(5): 1254-1264.  
Zhang W, Xie F J, Jin M, *et al.* Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acid content on growth performance and fatty acid composition of juvenile swimming crab (*Portunus trituberculatus*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(5): 1254-1264(in Chinese).
- [27] Pan C H, Chien Y H, Cheng J H. Effects of light regime, algae in the water, and dietary astaxanthin on pigmentation, growth, and survival of black tiger prawn *Penaeus monodon* post-larvae[J]. Zoological Studies, 2001, 40(4): 371-382.
- [28] Petit H, Nègre-Sadargues G, Castillo R, *et al.* The effects of dietary astaxanthin on growth and moulting cycle of postlarval stages of the prawn, *Penaeus japonicus* (Crustacea, Decapoda)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Physiology*, 1997, 117(4): 539-544.
- [29] 刘泽华, 吴旭干, 龙晓文, 等. 育肥饲料中植物油混合替代鱼油对中华绒螯蟹雄体脂肪酸代谢相关基因表达的影响[J]. 水生生物学报, 2016, 40(4): 767-778.  
Liu Z H, Wu X G, Long X W, *et al.* Effects of fish oil replacement by vegetable oils in fattening diets on the related gene expression of fatty acid metabolism of adult

- male chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, 40(4): 767-778(in Chinese).
- [30] Ribeiro P A P, Logato P V R, de Jesús Paulad A, *et al.* Effect of different oils in the diet on lipogenesis and the lipid profile of Nile tilapias[J]. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2008, 37(8): 1331-1337.
- [31] Sheen S S. Dietary cholesterol requirement of juvenile mud crab *Scylla serrata*[J]. *Aquaculture*, 2000, 189(3-4): 277-285.
- [32] 周继术, 吉红, 王建华, 等. 鱼油对鲤生长及脂质代谢的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(2): 275-280.  
Zhou J S, Ji H, Wang J H, *et al.* Influence of fish oil on growth and lipid metabolism in common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(2): 275-280(in Chinese).
- [33] Long X W, Wu X G, Zhao L, *et al.* Effects of dietary supplementation of haematococcus pluvialis powder on gonadal development, color and antioxidant capacity of adult female Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Aquaculture*, 2017, 473(4): 545-553.
- [34] Lee Y B, Kauffman R G. Cellularity and lipogenic enzyme activities of porcine intramuscular adipose tissue[J]. *Journal of Animal Science*, 1974, 38(3): 538-544.
- [35] Mersmann H J, Pond W G, Yen J T. Use of carbohydrate and fat as energy source by obese and lean swine[J]. *Journal of Animal Science*, 1984, 58(4): 894-902.
- [36] Shields R J. Larviculture of marine finfish in Europe[J]. *Aquaculture*, 2001, 200(1-2): 55-88.
- [37] 郭占林, 李嘉尧, 甘信辉, 等. 不同脂肪源对红螯光壳蟹幼虾生长、消化酶活性及其肌肉生化组成的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 996-1004.  
Guo Z L, Li J Y, Gan X H, *et al.* Influence of different lipid sources on growth, digestive enzyme activity and fatty acid composition in juvenile red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(5): 996-1004(in Chinese).
- [38] Auwerx J, Leroy P, Schoonjans K. Lipoprotein lipase: recent contributions from molecular biology[J]. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 1992, 29(3-4): 243-268.
- [39] Holmes R S, VandeBerg J L, Cox L A. Comparative studies of vertebrate lipoprotein lipase: a key enzyme of very low density lipoprotein metabolism[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part D: Genomics and Proteomics*, 2011, 6(2): 224-234.
- [40] 潘瑜, 陈文燕, 林仕梅, 等. 亚麻油替代鱼油对鲤鱼生长性能、肝脏脂质代谢及抗氧化能力的影响[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(2): 420-426.  
Pan Y, Chen W Y, Lin S M, *et al.* Effects of replacement of fish oil by linseed oil on growth performance, lipid metabolism and antioxidant ability in hepatopancreas of common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(2): 420-426(in Chinese).
- [41] 梁旭方, 李月琴, 李贵生, 等. 真鲷脂蛋白脂肪酶基因顺式元件PPRE及在肝脏活体调控作用[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(4): 49-55.  
Liang X F, Li Y Q, Li G S, *et al.* Cis-acting element and in vivo regulation of lipoprotein lipase gene of red sea bream *Pagrosomus major*[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(4): 49-55(in Chinese).
- [42] 邱仁杰, 成永旭, 吴旭干, 等. 投喂不同油脂饲料对中华绒螯蟹免疫、代谢及耐低氧性能的影响[J]. *动物学杂志*, 2012, 47(1): 78-87.  
Qiu R J, Cheng Y X, Wu X G, *et al.* Effect of dietary lipid sources on the immune function, metabolism and resistance to hypoxia in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2012, 47(1): 78-87(in Chinese).
- [43] Stéphan G, Guillaume J, Lamour F. Lipid peroxidation in turbot (*Scophthalmus maximus*) tissue: effect of dietary vitamin E and dietary n-6 or n-3 polyunsaturated fatty acids[J]. *Aquaculture*, 1995, 130(2-3): 251-268.
- [44] Sekine S, Kubo K, Tadokoro T, *et al.* Dietary docosahexaenoic acid-induced generation of liver lipid peroxides is not suppressed further by elevated levels of glutathione in ODS rats[J]. *Nutrition*, 2006, 22(4): 385-394.
- [45] 麻楠, 龙晓文, 赵磊, 等. 饲料中添加合成虾青素对中华绒螯蟹成体雌蟹性腺发育、色泽和抗氧化能力的影响[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(4): 755-765.  
Ma N, Long X W, Zhao L, *et al.* Effects of dietary supplementation of synthetic astaxanthin on ovarian development, coloration and antioxidant capacity of adult female Chinese mitten crab, *Eriocheir Sinensis*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(4): 755-765(in Chinese).
- [46] 常国亮, 吴旭干, 成永旭, 等. 不同脂类营养对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)幼蟹生长、成活、肝胰腺指数和生化成分的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(3): 276-283.  
Chang G L, Wu X G, Cheng Y X, *et al.* Effect of lipid nutrition on hepatosomatic index and biochemical composition of juvenile *Eriocheir sinensis*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(3): 276-

- 283(in Chinese).
- [47] Brousseau M E, Ordovas J M, Osada J, *et al.* Dietary monounsaturated and polyunsaturated fatty acids are comparable in their effects on hepatic apolipoprotein mRNA abundance and liver lipid concentrations when substituted for saturated fatty acids in cynomolgus monkeys[J]. *Journal of Nutrition*, 1995, 125(3): 425-436.
- [48] Zou E M, Du N S, Lai W. The effects of severe hypoxia on lactate and glucose concentrations in the blood of the Chinese freshwater crab *Eriocheir sinensis* (Crustacea: Decapoda)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Physiology*, 1996, 114(2): 105-109.
- [49] Whiteley N M, Taylor E W, Haj A J E. Seasonal and latitudinal adaptation to temperature in crustaceans[J]. *Journal of Thermal Biology*, 1997, 22(6): 419-427.
- [50] Henderson R J, Sargent J R. Chain-length specificities of mitochondrial and peroxisomal  $\beta$ -oxidation of fatty acids in livers of rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry*, 1985, 82(1): 79-85.
- [51] 苏德森, 陈涵贞, 林虬, 等. 高效液相色谱法同时测定鱼油中维生素A、D和E[J]. *福建农业学报*, 2005, 20(4): 289-291.
- Su D S, Chen H Z, Lin Q, *et al.* Simultaneous determination of vitamin A, D and E in fish oil by high performance liquid chromatography[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2005, 20(4): 289-291(in Chinese).
- [52] 姜波, 胡文忠, 刘长建, 等. HPLC法同时测定植物油中维生素A和不同构型维生素E含量[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(3): 320-323, 334.
- Jiang B, Hu W Z, Liu C J, *et al.* Simultaneous determination of vitamin A and different configuration of vitamin E in vegetable oils by HPLC[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(3): 320-323, 334(in Chinese).
- [53] 杨奇慧, 周歧存, 迟淑艳, 等. 饲料中维生素A水平对凡纳滨对虾生长、饲料利用、体组成成分及非特异性免疫反应的影响[J]. *动物营养学报*, 2007, 19(6): 698-705.
- Yang Q H, Zhou Q C, Chi S Y, *et al.* Effects of dietary vitamin a levels on growth, feed utilization, body composition and non-specific immunological responses of juvenile shrimp[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2007, 19(6): 698-705(in Chinese).
- [54] Wu X G, Wang Z K, Cheng Y X, *et al.* Effects of dietary phospholipids and highly unsaturated fatty acids on the precocity, survival, growth and hepatic lipid composition of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards)[J]. *Aquaculture Research*, 2011, 42(3): 457-468.
- [55] Wen X B, Chen L Q, Zhou Z L, *et al.* Reproduction response of Chinese mitten-handed crab (*Eriocheir sinensis*) fed different sources of dietary lipid[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2002, 131(3): 675-681.
- [56] González-Félix M L, Gatlin III D M, Lawrence A L, *et al.* Nutritional evaluation of fatty acids for the open thelycum shrimp, *Litopenaeus vannamei*: II. Effect of dietary n-3 and n-6 polyunsaturated and highly unsaturated fatty acids on juvenile shrimp growth, survival, and fatty acid composition[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2003, 9(2): 115-122.
- [57] González-Félix M L, Lawrence A L, Gatlin III D M, *et al.* Nutritional evaluation of fatty acids for the open thelycum shrimp, *Litopenaeus vannamei*: I. Effect of dietary linoleic and linolenic acids at different concentrations and ratios on juvenile shrimp growth, survival and fatty acid composition[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2003, 9(2): 105-113.
- [58] Wu X, Chang G, Cheng Y, *et al.* Effects of dietary phospholipid and highly unsaturated fatty acid on the gonadal development, tissue proximate composition, lipid class and fatty acid composition of precocious Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2010, 16(1): 25-36.
- [59] 孔祥会, 王桂忠, 李少菁. 低温适应下锯缘青蟹肌肉及其细胞膜脂肪酸组成的变化[J]. *水产学报*, 2006, 30(5): 603-610.
- Kong X H, Wang G Z, Li S J. Changes of fatty acid composition in muscle and muscle cell membrane of *Scylla serrata* under low temperature adaptation[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(5): 603-610(in Chinese).
- [60] Romano N, Wu X G, Zeng C S, *et al.* Growth, osmoregulatory responses and changes to the lipid and fatty acid composition of organs from the mud crab, *Scylla serrata*, over a broad salinity range[J]. *Marine Biology Research*, 2014, 10(5): 460-471.

## Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on fattening performance, physiological metabolism indices and biochemical composition of adult female *Portunus trituberculatus*

WU Renfu<sup>1</sup>, LONG Xiaowen<sup>1,2,3</sup>, HOU Wenjie<sup>4</sup>, PAN Guiping<sup>4</sup>,  
DONG Zhiguo<sup>5</sup>, CHENG Yongxu<sup>1,2,3</sup>, WU Xugan<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. National Demonstration Centre for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Shanghai Fisheries Research Institute and Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai 200433, China;

5. Key Laboratory of Marine Biotechnology of Jiangsu Province, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of dietary fish oil replacement with blending vegetable oils on the fattening performance, physiological metabolism and biochemical composition of adult female swimming crab (*Portunus trituberculatus*), five isonitrogenous and islipidic fattening diets were formulated to replace 0%, 25%, 50%, 75% and 100% of fish oil (defined as Diet 1-Diet 5) with blending vegetable oils (soybean oil : rapeseed oil=1 : 1). The five fattening diets were fed to female *P. trituberculatus* (150±25) g for 45 days. The results showed as follows: Dietary fish oil levels had no significant effects on survival rate, weight gain rate, gonadosomatic index and hepatosomatic index, meat yield and total edible yeild of adult female *P. trituberculatus*. There were significant differences in the triglyceride (TG) content, malate dehydrogenase (MDH) lipase (LPS) and lipoprotein lipase (LPL) activities in the hepatopancreas among five diet treatments; the highest levels of TG and LPS were detected in Diet 5, and the highest MDH was detected in Diet 1, while the highest LPL was detected in Diet 2. The highest TG and TC were detected in Diet 3 and Diet 4, respectively. The hepatopancreatic peroxidase (POD) activity of the crabs in Diet 1 was significantly higher than that of Diet 2 and Diet 3, while the Diet 4 had the highest activities of hepatopancreatic alkaline phosphatase (ALP) and acid phosphatase (ACP). The highest and lowest values of total superoxide dismutase (T-SOD) activity in the serum were detected at treatments of Diet 2 and Diet 1, respectively, while the highest serum ALP activity was detected in Diet 1. Dietary fish oil replacement has significant effects on the contents of crude protein and total carbohydrate in muscle, and the highest levels of crude protein and total carbohydrate in the muscle were dected in Diet 3. There were significant differences in the contents of total lipid and total carbohydrate in the hepatopancreas among five treatments, and the higher levels of them were detected for Diet 3 and 4 treatments; moreover, the highest ovarian crude protein content was also detected in Diet 3 treatment. Dietary fish oil replacement had significant effects on the fatty acid profile of muscle, ovary, and hepatopancreas; tissue n-6 polyunsaturated fatty acid (n-6 PUFA) increased with increasing dietary fish oil replacement level, while the contents of n-3 PUFAs and highly unsaturated fatty acid (HUFA) showed a decreasing trend. In conclusion, dietary fish oil replacement by vegetable oils had no significant effect on survival rate and fattening performance of adult female *P. trituberculatus*, but promote the TG, crude lipid and n-6 PUFA accumulations in the hepatopancreas as well as the POD and phosphatase; 50% fish oil replacement level could increase the crude protein conetent of ovaries and muscle. These results indicated the dietary optimal fish oil replacement with blending vegetable oils could be 50% for the fattening of adult female *P. trituberculatus*.

**Key words:** *Portunus trituberculatus*; fattening performance; fattening diet; fish oil replacement; physiological metabolism; biochemical composition

**Corresponding author:** WU Xugan. E-mail: xgwu@shou.edu.cn

**Funding projects:** Extension Project from Shanghai Agriculture Committee (2016-1-1-8); Science and Technology Special Project of Northern of Jiangsu Province Department (SZ-LYG2017019); Capacity Promotion Projects of Shanghai Engineering and Technology Center from Shanghai Municipal Science and Technology Commission (16DZ2281200); Shanghai Universities Top Disciplines Project of Fisheries from Shanghai Municipal Education Committee (2015-62-0908)

## Aquaculture in China

### Success Stories and Modern Trends

Edited by: Jian-Fang Gui, Qisheng Tang, Zhongjie Li, Jiashou Liu, Sena S. De Silva

Fish have been a major component of our diet and it has been suggested that fish/seafood consumption contributed to the development of the human brain, and this together with the acquisition of bipedalism, perhaps made us what we are. In the modern context global fish consumption is increasing. However, unlike our other staples, until a few years back the greater proportion of our fish supplies were of a hunted origin. This scenario is changing and a greater proportion of fish we consume now is of farmed origin.

Aquaculture, the farming of waters, is thought to have originated in China, many millennia ago. Nevertheless, it transformed into a major food sector only since the second half of the last century, and continues to forge ahead, primarily in the developing world. China leads the global aquaculture production in volume, in the number of species that are farmed, and have contributed immensely to transforming the practices from an art to a science.

This book attempts to capture some of the key elements and practices that have contributed to the success of Chinese aquaculture. The book entails contributions from over 100 leading experts in China, and provides insights into some aquaculture practices that are little known to the rest of the world. This book will be essential reading for aquaculturists, practitioners, researchers and students, and planners and developers.

ISBN: 978-1-119-12074-2