

# 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

赵磊<sup>①</sup> 龙晓文<sup>①</sup> 吴旭干<sup>①②\*</sup> 刘泽华<sup>①</sup> 成永旭<sup>①②</sup>

① 上海海洋大学 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室 上海 201306; ② 上海海洋大学  
上海市教委水产动物遗传育种协同创新中心 上海 201306

**摘要:** 为研究育肥饲料中混合植物油替代鱼油对中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 成体雄蟹常规成分和脂肪酸组成的影响, 采用豆油和菜籽油混合物替代鱼油制成 5 种不同鱼油替代水平 (0%、25%、50%、75% 和 100%) 的等氮等脂育肥饲料 (分别记为 1# ~ 5# 饲料组) 饲喂雄蟹, 测定 5 组雄蟹肝胰腺、肌肉和性腺中的常规成分和脂肪酸组成, 并对实验数据进行方差分析。结果显示: (1) 饲料 1# 组性腺灰分含量显著高于饲料 4# 和 5# 组 ( $P < 0.05$ ), 但各组性腺中的水分、总脂和蛋白含量均无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 饲料 1# 组肝胰腺中的水分和灰分最高, 但其总脂含量低于其他组, 各组肝胰腺的蛋白含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 除 1# 饲料组外, 肌肉中的总脂和灰分含量随鱼油替代水平的升高而显著上升 ( $P < 0.05$ ), 而水分和蛋白含量均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。 (2) 各饲料组精巢中总饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  SFA)、总多不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  PUFA) 和总高度不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  HUFA) 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 其总 n-6 多不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  n-6PUFA) 含量随鱼油替代水平升高而升高, 而总 n-3 多不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  n-3PUFA) 含量和  $\Sigma$  n-3PUFA/ $\Sigma$  n-6PUFA 比值呈显著下降趋势 ( $P < 0.05$ )。 (3) 肝胰腺中  $\Sigma$  n-3PUFA 和  $\Sigma$  HUFA 含量具有显著的组间差异, 且均以饲料 3# 组最高。但各组的  $\Sigma$  PUFA 和  $\Sigma$  n-6PUFA 含量差异并不显著 ( $P > 0.05$ )。 (4) 肌肉中大部分脂肪酸组成无显著差异, 仅  $\Sigma$  n-6PUFA 含量随鱼油替代水平升高而升高。 综上, 中华绒螯蟹育肥饲料中植物油 (豆油与菜籽油含量为 1:1) 替代鱼油对成体雄蟹可食组织中水分和蛋白含量并无显著影响, 但会对其脂肪酸组成造成显著的影响, 50% 的鱼油替代水平有利于雄蟹肝胰腺和肌肉中的脂肪沉积。

**关键词:** 中华绒螯蟹; 育肥饲料; 植物油; 鱼油; 常规成分; 脂肪酸组成

**中图分类号:** S963.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3263 (2016) 06-1071-13

## 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*)

**基金项目** 上海市科学技术委员会科研项目 (No. 13320502100), 科技部港澳台科技合作专项项目 (No. 2014DFT30270), 国家自然科学基金面上项目 (No. 31472287), 上海高校水产学一流学科建设项目 (No. 2012-62-0908);

\* 通讯作者, E-mail: xgwu@shou.edu.cn;

**第一作者介绍** 赵磊, 男, 硕士研究生; 研究方向: 水产动物营养与生理; E-mail: 1229570949@qq.com。

收稿日期: 2016-01-20, 修回日期: 2016-04-13 DOI: 10.13859/j.cjz.201606015

ZHAO Lei<sup>①</sup> LONG Xiao-Wen<sup>①</sup> WU Xu-Gan<sup>①②\*</sup> LIU Ze-Hua<sup>①</sup> CHENG Yong-Xu<sup>①②</sup>

① *Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306*; ② *Collaborative Innovation Center of Aquatic Animal Breeding Center Certificated by Shanghai Municipal Education Commission, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*

**Abstract:** Five isonitrogenous and isolipidic fattening diets were formulated by blending vegetable oils (soybean oil: rapeseed oil = 1 : 1) to replace fish oil at level of 0, 25%, 50%, 75% and 100% (named as diet F1, F2, F3, F4 and F5, Table 1) to feed 5 treatments of adult male Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*) for 60 days. Then, we assayed the proximate composition and fatty acid composition of the hepatopancreas, muscle and testis of each crab in the five treatments and analyzed these data by variance analysis method. We got the following results: (1) The gonads of crabs fed F1 diet had the significantly higher ash content than those fed by diet F4 and F5 ( $P < 0.05$ ), but no significant difference with crabs fed diet F2 and F3; no significant differences in the contents of moisture, crude protein and crude lipid among five diet treatments ( $P > 0.05$ ). The contents of moisture and ash in the hepatopancreas of crabs fed diet F1 were highest among the five treatment group, but the crude lipid was lower than other four treatments; however, no significant difference was found in the crude protein content between individuals in the five treatments ( $P > 0.05$ ). Except for the crabs treated by diet F1, the crude lipid and ash contents in the muscle increased with increasing replacement level; while no significant differences were found for the rest contents in the muscle among crabs treated by five diet ( $P > 0.05$ ) (Table 3). (2) The total n-6 polyunsaturated fatty acid ( $\sum$  n-6PUFA) contents in gonads of crabs increased with the increasing replacement level, while the content of total n-3 polyunsaturated fatty acid ( $\sum$  n-3PUFA) had opposite changing tendency. No significant difference was found in the total saturated fatty acid ( $\sum$  SFA), total polyunsaturated fatty acid ( $\sum$  PUFA) and total highly unsaturated fatty acid ( $\sum$  HUFA) contents in the crab gonads between all the five treatments ( $P > 0.05$ ) (Table 4). (3) The highest content of  $\sum$  n-3PUFA and  $\sum$  HUFA was detected in the hepatopancreas of crabs treated by diet F3 although there was a significant difference between each treatment. While no significant differences were found for the  $\sum$  PUFA and  $\sum$  n-6PUFA contents among five treatments ( $P > 0.05$ ) (Table 5). (4) There was no significant difference among the fatty acids contents in muscle except for the content of  $\sum$  n-6PUFA which increased with elevating replacement levels (Table 6). In conclusion, except for moisture and crude protein contents, fish oil replacement by blending vegetable oils in fattening diets have significant influence on fatty acid composition in the edible tissues of adult male *E. sinensis*. These results suggested that the replacement level of 50% is good for the fat accumulation in the hepatopancreas and muscle of this crab.

**Key words:** Chinese Mitten Crab, *Eriocheir sinensis*; Fattening diet; Vegetable oil; Fish oil; Proximate composition; Fatty acid composition

中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*), 俗称河蟹、大闸蟹, 是我国重要的养殖蟹类之一, 其 2014 年全国养殖产量近 80 万吨 (农业部渔业渔政管理局 2015), 因其独特的风味和较高的营养价值而深受广大消费者的喜爱。先前的研

究表明, 中华绒螯蟹的营养价值和风味可能与其体内含有较多的高不饱和脂肪酸 (high unsaturated fatty acids, HUFA) 有关 (吴旭干等 2004, 高先楚等 2014), 因此, 其育肥饲料中通常需要添加较高含量的鱼油 (Wen et al.

2001, Wu et al. 2007a)。但众所周知, 随着世界水产养殖产业的迅猛发展, 饲料用途的鱼油资源已供不应求, 价格日益上升 (Pickova et al. 2007)。因此, 寻找饲料中鱼油的替代源已势在必行。在这种情况下, 植物油以其来源广泛、价格低廉、总产量大等特点, 成为了水产饲料中鱼油替代的重要选择 (Nasopoulou et al. 2012), 并引起广泛的关注 (Turchini et al. 2009, 陈彦良等 2014)。

目前有关中华绒螯蟹饲料中鱼油替代的研究相对较少, 且主要集中于生长阶段 (常国亮等 2008, 阙有清等 2012, 陈彦良等 2014), 尚未见对中华绒螯蟹性腺发育和可食组织中生化组成影响的研究报道。肌肉、肝胰腺和性腺作为中华绒螯蟹的三大可食部位, 其生化组成和性腺发育情况直接影响中华绒螯蟹的食用价值和营养价值 (Wu et al. 2007b, Shao et al. 2013)。因此, 通常需要通过完成生殖蜕壳的中华绒螯蟹进行一段时间的育肥来提高中华绒螯蟹的营养价值 (吴旭干等 2004)。由于这期间的饲料用量通常占成蟹养殖过程饲料总用量的 50% 左右, 因此, 探讨育肥饲料中合适的鱼油替代水平对研究中华绒螯蟹饲料中鱼油替代具有重要的意义 (赵磊等 2016)。同时, 由于中华绒螯蟹雌雄个体的性腺发育规律和性腺中的脂肪酸组成均存在较大差异 (Wu et al. 2007a, b, He et al. 2014), 其育肥饲料中的最佳高度不饱和脂肪酸 (HUFA) 组成、含量及适合的鱼油水平可能都存在一定差异 (Sui et al. 2011), 因此本研究着重研究育肥饲料中鱼油替代对雄蟹常规成分和脂肪酸组成的影响。

豆油和菜籽油是水产饲料常用的两种植物油。先前的研究表明, 豆油的亚麻酸含量适合, 且亚油酸与亚麻酸比例较为合理, 但油酸含量远低于菜子油, 且不如菜子油易于消化 (熊秋芳等 2014), 因此, 二者脂肪酸组成具有一定的互补性 (Glencross et al. 2011, Gunstone et al. 2011), 采用两者混合替代鱼油可能具有一定优势 (Brown et al. 2011, Turchini et al. 2011)。鉴

于此, 本文采用植物油混合物 (豆油与菜籽油含量为 1:1) 替代鱼油, 研究了饲料中不同鱼油替代水平 (0、25%、50%、75% 和 100%) 对成体雄蟹常规成分和脂肪酸组成的影响, 以期中华绒螯蟹育肥饲料配制、育肥养殖和鱼油替代源的开发等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

实验饲料以豆粕、菜籽粕和鱼粉作为主要蛋白源, 采用植物油混合物 (豆油与菜籽油含量为 1:1) 替代鱼油 (鱼油替代水平分别为 0、25%、50%、75% 和 100%), 配制 5 种等氮等脂的育肥饲料 (粗蛋白含量为 39.5%, 粗脂肪含量为 14.0%) (表 1)。配制饲料前, 所有原料粉碎后过 60 目筛, 按照饲料配方 (表 1), 在饲料厂先用牧羊 SLHS.0A 单轴混合机进行一次混合, 再经牧羊 SLHSJ1.0A 双轴混合机二次混合, 最后用恒润 HR118\*2 双螺杆膨化机制成沉性膨化饲料, 粒径 4.5 ~ 5.0 mm, 长约 10.0 mm, 植物油和鱼油按比例混合后采用真空喷涂方式添加。所有实验饲料冷却包装后于 -20℃ 冰箱中保存备用。饲料常规营养成分及脂肪酸组成见表 2。

### 1.2 实验蟹的养殖管理

实验用蟹采自上海海洋大学崇明基地养殖池塘, 均为生殖蜕壳后的雄蟹, 体重 135 ~ 165 g, 从中挑选 600 只附肢健全、体无外伤、活力较好的个体用于实验。为了使研究结果更加接近于生产实际, 育肥养殖实验在室外小型实验土池 (长 × 宽 × 深 = 7.8 m × 7.8 m × 0.7 m) 中进行, 土池四周设置双层防逃塑料板, 实验之前采用漂白粉溶解后全池泼洒的方式对实验土池进行消毒。实验池四周种植部分水稻 (*Oryza sativa*), 同时放适量水花生 (*Alternanthera philoxeroides*), 以净化水质和供中华绒螯蟹隐蔽, 实验期间水深 70 cm 左右。每个饲料组设 4 个重复池塘, 每口池塘随机放

表 1 实验饲料组成 (%)

Table 1 Formulation of experimental diets

原料 Ingredients	饲料 1 # Feed 1 #	饲料 2 # Feed 2 #	饲料 3 # Feed 3 #	饲料 4 # Feed 4 #	饲料 5 # Feed 5 #
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*	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
矿物质预混料 Mineral premix**	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	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	0.00
豆油 Soybean oil	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00
菜籽油 Rapeseed oil	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00
磷脂油 Lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
食盐 Salt	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

\* 维生素预混料为每千克饲料提供: VA 62 500 IU, VD<sub>3</sub> 15 000 IU, VE 1.05 g, VK<sub>3</sub> 35.4 mg, VB<sub>1</sub> 100 mg, VB<sub>2</sub> 150 mg, VB<sub>6</sub> 150 mg, VB<sub>12</sub> 0.2 mg, VC 700 mg, 生物素 4 mg, D-泛酸钙 250 mg, 叶酸 25 mg, 烟酰胺 300 mg; \*\* 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。

\* The vitamin premix provided for per kg of diets: VA 62 500 IU, VD<sub>3</sub> 15 000 IU, VE 1.05 g, VK<sub>3</sub> 35.4 mg, VB<sub>1</sub> 100 mg, VB<sub>2</sub> 150 mg, VB<sub>6</sub> 150 mg, VB<sub>12</sub> 0.2 mg, VC 700 mg, biotin 4 mg, D-pantothenic acid 250 mg, folic acid 25 mg, nicotinamide 300 mg. \*\* The mineral premix provided for 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.

入 25 只雄蟹和 25 只雌蟹 (本文主要报道雄蟹的研究结果), 在实验池塘中暂养 3 ~ 5 d 后开始正式实验, 于 2014 年 9 月 25 日开始正式实验。

实验期间每日 18:00 时左右进行投喂, 平均水温高于 20℃ 时, 按总体重的 2% ~ 3% 投喂, 当水温为 15 ~ 20℃, 则按照总体重的 1.5% 左右投喂, 具体根据水温和摄食情况灵活调整。投喂方式为全池均匀泼洒, 通过食台来检查残饵

情况, 投喂后 2 ~ 3 h 检查食台残饵情况, 并于次日 9:00 时左右检查池塘四周残饵和死亡情况, 并做好相关记录。养殖过程中, 每隔 3 d 测定 1 次水质指标, 根据水质指标每 2 周左右适当换水或加水。养殖期间水质指标要求, pH 7.0 ~ 9.0, 平均溶氧大于 4 mg/L, 氨氮低于 0.5 mg/L, 亚硝酸盐低于 0.15 mg/L, 这些均在中华绒螯蟹养殖的安全水质指标范围内, 实验养殖共计进行 60 d。

表 2 实验饲料常规成分及脂肪酸组成

Table 2 Proximate composition and fatty acid composition in replaced diets

项目 Items	饲料 1 # Feed 1 #	饲料 2 # Feed 2 #	饲料 3 # Feed 3 #	饲料 4 # Feed 4 #	饲料 5 # Feed 5 #
常规成分 (%干重) Proximate composition (% dry weight)					
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
粗灰分 Ash	9.21	9.15	9.14	9.24	9.40
脂肪酸 (%总脂肪酸) Fatty acids (% of total fatty acids)					
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
DHA/EPA	1.58	1.62	1.56	1.51	1.39
n-3/n-6	0.88	0.86	0.56	0.38	0.27

表中含量低于 0.4% 的脂肪酸未列出。SFA. 饱和脂肪酸; MUFA. 单不饱和脂肪酸; HUFA. 高不饱和脂肪酸。

Fatty acids content less than 0.4% was not listed in the table. SFA. Saturated fatty acid; MUFA. Monounsaturated fatty acid; HUFA. Highly unsaturated fatty acid.

### 1.3 样品采集

正式实验 60 d 后停食 1 d, 从每个池塘中随机采样 2 只雄蟹, 每个饲料组 8 只。用吸水纸擦干体表水分并用 JY 电子天平 (上海浦春

计量仪器有限公司, 精确至 0.01 g) 称重, 然后解剖取出肝胰腺和性腺, 准确称重。肝胰腺、性腺和肌肉装入自封袋于 -40℃ 冰箱中保存备用。

#### 1.4 常规指标及脂肪酸测定

按照 AOAC (1995) 的标准方法测定实验样品及饲料中的水分 (105°C 烘干法)、粗蛋白 (凯氏定氮法) 和粗灰分 (550°C 灼烧法); 按照 Folch 等 (1957) 的方法, 采用氯仿与甲醇 (体积比为 2:1) 提取总脂并测定其含量。实验样品及饲料的脂肪酸测定参考吴旭干等 (2014) 的方法, 采用 14% 的三氟化硼-甲醇对总脂进行甲脂化, 使用美国 Thermo TRACE GC ULTRA 气相色谱仪进行测定。色谱柱为 Agilent SP-2560 毛细管柱 (柱长 100 m, 内径 0.25 mm; 固定相涂层液膜厚度 0.2  $\mu\text{m}$ ), 50°C/min 由 70°C 升至 140°C, 保持 1 min, 4°C/min 升到 180°C, 保持 1 min, 最后 3°C/min 升至 225°C, 保持 30 min。

#### 1.5 数据分析及统计

采用 SPSS 16.0 软件对实验数据进行统计分析, 所有数据均以平均值  $\pm$  标准误表示。采用 Levene 法对所有数据进行方差齐性检验, 当不满足齐性方差时对百分比数据进行反正弦或平方根处理。采用 ANOVA 对实验结果进行方差分析, 采用 Duncan 法进行多重比较, 取  $P < 0.05$  为差异显著。

## 2 结果分析

### 2.1 植物油替代鱼油对成体雄蟹组织中常规成分的影响

饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹常规成分的影响见表 3。就性腺而言, 各饲料组性腺的水分、总脂和蛋白含量均无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但其灰分含量差异较大, 以饲料 1# 组的灰分最高, 并显著高于饲料 4# 和 5# 组 ( $P < 0.05$ )。就其肝胰腺而言, 饲料 5# 组的水分含量最高, 并显著高于饲料 3# 组 ( $P < 0.05$ ), 其余各组差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 饲料 4# 和 5# 组灰分含量显著高于饲料 1#、2# 和 3# 组 ( $P < 0.05$ ); 饲料 5# 组的总脂含量最低, 并显著低于其他饲料组 ( $P < 0.05$ ); 各饲料组间的蛋白含量并无显著差异 ( $P > 0.05$ )。对肌肉而言, 各饲料组

的水分和蛋白含量并无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 除饲料 1# 组外, 各组总脂和灰分含量随鱼油替代水平升高而上升。

### 2.2 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹性腺中脂肪酸组成的影响

饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹性腺脂肪酸含量的影响见表 4。就其饱和脂肪酸 (saturated fatty acids, SFA) 而言, 饲料 2# 组的 C16:0 含量显著高于饲料 5# 组 ( $P < 0.05$ ); 而各组的 C18:0 和总饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  saturated fatty acids,  $\Sigma$  SFA) 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。各组间各单不饱和脂肪酸 (mono unsaturated fatty acids, MUFA) 含量差异较大, 但总单不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  mono unsaturated fatty acids,  $\Sigma$  MUFA) 含量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。同样, 各组总多不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  poly unsaturated fatty acids,  $\Sigma$  PUFA) 和总高度不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  high unsaturated fatty acids,  $\Sigma$  HUFA) 含量均无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 而其总 n-3 多不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  n-3 poly unsaturated fatty acids,  $\Sigma$  n-3PUFA) 的含量随鱼油替代水平升高而降低, 且饲料 1# 组与饲料 4#、5# 组差异显著 ( $P < 0.05$ ); 与此相反, 精巢中总 n-6 多不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  n-6 poly unsaturated fatty acids,  $\Sigma$  n-6PUFA) 含量随鱼油替代水平升高而升高, 且饲料 4#、5# 组与饲料 1#、2# 组差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹肝胰腺中脂肪酸组成的影响

各饲料组雄蟹肝胰腺中的 C18:0 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 饲料 4# 组的 C14:0、C16:0 和总饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  SFA) 显著高于饲料 5# 组 ( $P < 0.05$ )。各组单不饱和脂肪酸 (MUFA) 含量差异较大, 总单不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  MUFA) 含量从高到低排序为: 饲料 2# 组  $>$  饲料 5# 组  $>$  饲料 1# 组  $>$  饲料 4# 组  $>$  饲料 3# 组。饲料 3# 和 4# 组的 EPA (C20:5n3)、DHA (C22:6n3)、总 n-3 多不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  n-3PUFA) 和总高度不饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  HUFA) 含量为各组最高,

表 3 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹常规成分的影响 (% 湿重)

Table 3 Effects of dietary fish oil replacement by vegetable oils on proximate composition in the tissue of adult male Chinese Mitten Crab (% wet weight)

项目 Items	饲料 1 # Feed 1 #	饲料 2 # Feed 2 #	饲料 3 # Feed 3 #	饲料 4 # Feed 4 #	饲料 5 # Feed 5 #
性腺 Gonad					
水分 Moisture	72.30 ± 0.61	73.23 ± 0.90	72.38 ± 0.33	72.74 ± 0.71	72.95 ± 0.57
总脂 Total lipids	1.24 ± 0.12	1.18 ± 0.09	1.01 ± 0.07	1.01 ± 0.09	1.07 ± 0.12
蛋白 Protein	17.29 ± 0.48	17.43 ± 0.20	17.40 ± 0.28	17.60 ± 0.28	17.76 ± 0.15
灰分 Ash	1.69 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.59 ± 0.05 <sup>ab</sup>	1.66 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1.56 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.56 ± 0.04 <sup>b</sup>
肝胰腺 Hepatopancreas					
水分 Moisture	41.03 ± 1.55 <sup>ab</sup>	45.58 ± 2.85 <sup>ab</sup>	39.74 ± 2.42 <sup>b</sup>	43.52 ± 1.48 <sup>ab</sup>	47.15 ± 1.96 <sup>a</sup>
总脂 Total lipids	44.64 ± 1.10 <sup>b</sup>	46.61 ± 2.26 <sup>ab</sup>	50.21 ± 0.85 <sup>a</sup>	44.78 ± 2.30 <sup>b</sup>	37.69 ± 1.58 <sup>c</sup>
蛋白 Protein	8.02 ± 0.48	7.98 ± 0.43	7.73 ± 0.09	7.76 ± 0.21	7.76 ± 0.40
灰分 Ash	0.62 ± 0.08 <sup>b</sup>	0.44 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.52 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.90 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.90 ± 0.12 <sup>a</sup>
肌肉 Muscle					
水分 Moisture	78.09 ± 0.80	78.68 ± 0.77	78.07 ± 0.57	79.27 ± 0.55	78.86 ± 0.48
总脂 Total lipids	0.90 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.84 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.94 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.97 ± 0.01 <sup>a</sup>
蛋白 Protein	17.84 ± 0.89	17.33 ± 0.38	17.73 ± 0.39	17.50 ± 0.55	17.98 ± 0.36
灰分 Ash	1.44 ± 0.04 <sup>ab</sup>	1.33 ± 0.07 <sup>b</sup>	1.32 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.41 ± 0.04 <sup>ab</sup>	1.54 ± 0.02 <sup>a</sup>

同行数据不含相同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ 。

Values in the same row with different letter mean significant difference ( $P < 0.05$ ).

且显著高于饲料 2# 和 5# 组 ( $P < 0.05$ ); 而各饲料组总多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  PUFA) 和总 n-6 多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  n-6PUFA) 含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ) (表 5)。

#### 2.4 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹肌肉脂肪酸组成的影响

雄蟹肌肉中总饱和脂肪酸 ( $\sum$  SFA) 含量随鱼油替代水平升高而显著降低 ( $P < 0.05$ ), 与其中主要脂肪酸 C16:0 的变化趋势一致, 而另一种主要脂肪酸 C18:0 的含量则无显著差异 ( $P > 0.05$ )。各饲料组的总单不饱和脂肪酸 ( $\sum$  MUFA) 含量也无显著差异 ( $P > 0.05$ )。就多不饱和脂肪酸 (PUFA) 而言, 各饲料组 ARA (C20:4n6) 含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 总 n-6 多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  n-6PUFA) 与 C18:2n6 变化趋势相同, 呈现随鱼油替代水平升高而升高的趋势; 饲料 4# 组的 EPA 和总 n-3 多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  n-3PUFA) 含量最高, 且显著高于饲

料 5# 组 ( $P < 0.05$ ); 总多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  PUFA) 从高到低排序依次为: 饲料 4# 组 > 饲料 5# 组 > 饲料 1# 组 > 饲料 3# 组 > 饲料 2# 组 (表 6)。

### 3 讨论

#### 3.1 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹常规成分的影响

本研究结果显示, 育肥 60 d 后各实验组雄蟹性腺中水分、粗脂肪和粗蛋白含量均无显著差异。这可能与雄蟹性腺中总脂含量较低, 精巢发育对饲料中的脂肪含量要求不高有关 (王群等 2002, 2004, Wu et al. 2007a); 同时, 成熟雄性性腺中常规生化成分含量相对稳定, 不容易受饲料和养殖条件影响 (Wu et al. 2007a)。因此, 育肥饲料中鱼油替代水平对性腺总脂含量无显著影响。此外, 育肥饲料中高比例鱼油替代水平导致雄体性腺中灰分含量有所下

表 4 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹性腺中脂肪酸组成的影响 (% 总脂肪酸)

Table 4 Effects of dietary fish oil replacement by vegetable oils on fatty acid composition in the gonad of adult male Chinese Mitten Crab (% of total fatty acids)

脂肪酸 Fatty acids	饲料 1 # Feed 1 #	饲料 2 # Feed 2 #	饲料 3 # Feed 3 #	饲料 4 # Feed 4 #	饲料 5 # Feed 5 #
C14:0	0.20 ± 0.01	0.23 ± 0.04	0.22 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.16 ± 0.01
C16:0	9.35 ± 0.21 <sup>ab</sup>	9.77 ± 0.41 <sup>a</sup>	9.35 ± 0.27 <sup>ab</sup>	9.05 ± 0.31 <sup>ab</sup>	8.47 ± 0.20 <sup>b</sup>
C17:0	0.34 ± 0.02	0.36 ± 0.06	0.33 ± 0.02	0.34 ± 0.01	0.31 ± 0.01
C18:0	6.17 ± 0.21	6.30 ± 0.25	6.08 ± 0.32	6.39 ± 0.29	6.32 ± 0.20
C20:0	0.28 ± 0.03	0.27 ± 0.01	0.37 ± 0.02	0.35 ± 0.04	0.31 ± 0.02
C22:0	0.34 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.28 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.41 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.44 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.38 ± 0.05 <sup>ab</sup>
∑ SFA	16.67 ± 0.27	16.86 ± 0.60	16.48 ± 0.32	16.46 ± 0.49	15.70 ± 0.44
C14:1n5	0.16 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.24 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.14 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>b</sup>
C16:1n7	1.92 ± 0.12 <sup>ab</sup>	2.06 ± 0.23 <sup>a</sup>	1.98 ± 0.18 <sup>a</sup>	1.51 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.50 ± 0.06 <sup>b</sup>
C18:1n9	18.15 ± 0.35	18.60 ± 0.56	18.80 ± 0.60	18.20 ± 0.86	20.18 ± 0.87
C18:1n7	3.85 ± 0.17 <sup>a</sup>	3.50 ± 0.12 <sup>ab</sup>	3.14 ± 0.18 <sup>bc</sup>	2.98 ± 0.15 <sup>c</sup>	2.97 ± 0.09 <sup>c</sup>
C20:1n7	0.76 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.77 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.67 ± 0.06 <sup>ab</sup>	0.61 ± 0.03 <sup>b</sup>
C22:1n9	0.43 ± 0.02	0.37 ± 0.02	0.40 ± 0.04	0.47 ± 0.03	0.46 ± 0.02
C24:1n9	2.49 ± 0.14 <sup>ab</sup>	1.86 ± 0.20 <sup>b</sup>	2.91 ± 0.31 <sup>a</sup>	2.59 ± 0.12 <sup>a</sup>	2.87 ± 0.24 <sup>a</sup>
∑ MUFA	27.60 ± 0.31	26.72 ± 0.97	28.06 ± 0.84	26.72 ± 1.30	28.28 ± 0.79
C18:2n6	9.95 ± 0.66	9.53 ± 1.06	10.56 ± 0.68	10.53 ± 0.79	11.45 ± 0.94
C18:3n3	1.16 ± 0.03	1.23 ± 0.15	1.26 ± 0.21	1.31 ± 0.11	1.29 ± 0.13
C20:2n6	1.93 ± 0.08	1.92 ± 0.05	1.93 ± 0.06	1.97 ± 0.07	2.12 ± 0.16
C20:4n6	13.92 ± 0.92	13.80 ± 1.06	13.85 ± 0.97	15.42 ± 1.69	14.41 ± 1.11
C20:5n3	16.65 ± 0.23	16.50 ± 0.54	15.56 ± 0.89	15.20 ± 0.84	14.74 ± 0.69
C22:6n3	7.47 ± 0.12 <sup>a</sup>	7.05 ± 0.30 <sup>ab</sup>	7.02 ± 0.22 <sup>ab</sup>	6.29 ± 0.23 <sup>bc</sup>	6.64 ± 0.06 <sup>c</sup>
∑ PUFA	51.07 ± 0.42	49.92 ± 0.43	50.16 ± 0.55	50.71 ± 1.23	50.65 ± 0.67
∑ n-3PUFA	25.28 ± 0.29 <sup>a</sup>	24.77 ± 0.68 <sup>ab</sup>	23.83 ± 0.85 <sup>ab</sup>	22.80 ± 0.95 <sup>b</sup>	22.67 ± 0.57 <sup>b</sup>
∑ n-6PUFA	25.79 ± 0.42 <sup>b</sup>	25.15 ± 0.61 <sup>b</sup>	26.33 ± 0.53 <sup>ab</sup>	27.91 ± 0.94 <sup>a</sup>	27.98 ± 0.44 <sup>a</sup>
∑ HUFA	38.04 ± 0.97	37.35 ± 1.50	36.43 ± 1.31	36.90 ± 1.96	35.79 ± 1.60
DHA/EPA	0.45 ± 0.01	0.43 ± 0.01	0.45 ± 0.02	0.42 ± 0.02	0.45 ± 0.02
n-3/n-6	0.98 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.99 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.91 ± 0.05 <sup>ab</sup>	0.82 ± 0.05 <sup>b</sup>	0.81 ± 0.03 <sup>b</sup>

同行数据不含相同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ ; ∑ 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; ∑ n-3PUFA: 总 n-3 多不饱和脂肪酸; ∑ n-6PUFA: 总 n-6 多不饱和脂肪酸; ∑ HUFA: 总高不饱和脂肪酸; DHA/EPA: DHA 与 EPA 比值。

Values in the same row with different letter mean significant difference ( $P < 0.05$ ). ∑ SFA: ∑ Saturated fatty acids; ∑ MUFA: ∑ Mono unsaturated fatty acids; ∑ PUFA: ∑ Poly unsaturated fatty acids; ∑ n-3PUFA: ∑ n-3 Poly unsaturated fatty acids; ∑ n-6PUFA: ∑ n-6 Poly unsaturated fatty acids; ∑ HUFA: ∑ High unsaturated fatty acids; DHA/EPA: Ratio of DHA to EPA.

降, 推测与性腺中的多不饱和脂肪酸 (PUFA) 组成影响矿物质离子的运输和积累, 但其具体原因仍有待进一步研究。

肝胰腺是甲壳动物重要的脂类吸收和储存器官 (Wu et al. 2007b), 其脂类成分更容易受到饲料的影响 (Wu et al. 2007a)。本研究中,



表 5 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹肝胰腺中脂肪酸组成的影响 (% 总脂肪酸)

Table 5 Effects of dietary fish oil replacement by vegetable oils on fatty acid composition in the hepatopancreas of adult male Chinese Mitten Crab (% of total fatty acids)

脂肪酸 Fatty acids	饲料 1 # Feed 1 #	饲料 2 # Feed 2 #	饲料 3 # Feed 3 #	饲料 4 # Feed 4 #	饲料 5 # Feed 5 #
C14:0	1.04 ± 0.08 <sup>b</sup>	0.98 ± 0.10 <sup>b</sup>	1.36 ± 0.14 <sup>a</sup>	1.36 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.83 ± 0.08 <sup>b</sup>
C15:0	0.32 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.31 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.34 ± 0.06 <sup>a</sup>	0.33 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.21 ± 0.01 <sup>b</sup>
C16:0	18.04 ± 1.15 <sup>ab</sup>	17.94 ± 0.60 <sup>ab</sup>	18.88 ± 0.49 <sup>ab</sup>	20.40 ± 0.16 <sup>a</sup>	17.47 ± 1.35 <sup>b</sup>
C17:0	0.20 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.26 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.16 ± 0.02 <sup>b</sup>
C18:0	1.64 ± 0.08	1.62 ± 0.13	1.64 ± 0.05	1.63 ± 0.05	1.53 ± 0.08
C20:0	0.11 ± 0.01	0.09 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.10 ± 0.01
C22:0	0.07 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.06 ± 0.01 <sup>ab</sup>
∑ SFA	21.41 ± 1.35 <sup>ab</sup>	21.22 ± 0.85 <sup>ab</sup>	21.64 ± 0.72 <sup>ab</sup>	24.14 ± 0.28 <sup>a</sup>	20.42 ± 1.56 <sup>b</sup>
C14:1n5	0.07 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.05 ± 0.01 <sup>b</sup>
C16:1n7	5.59 ± 0.43 <sup>ab</sup>	5.85 ± 0.21 <sup>ab</sup>	5.56 ± 0.68 <sup>ab</sup>	6.71 ± 0.70 <sup>a</sup>	4.51 ± 0.61 <sup>b</sup>
C17:1n7	0.32 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.34 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.38 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.39 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.28 ± 0.04 <sup>b</sup>
C18:1n9	33.66 ± 1.14 <sup>ab</sup>	36.40 ± 2.23 <sup>a</sup>	31.10 ± 1.66 <sup>b</sup>	30.93 ± 0.99 <sup>b</sup>	36.97 ± 1.39 <sup>a</sup>
C18:1n7	1.71 ± 0.16	1.79 ± 0.10	1.89 ± 0.07	1.90 ± 0.04	1.77 ± 0.10
C20:1n7	0.18 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.30 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.21 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.19 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.14 ± 0.01 <sup>b</sup>
C22:1n9	0.21 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.22 ± 0.02	0.20 ± 0.01	0.23 ± 0.02
∑ MUFA	40.63 ± 0.29 <sup>bc</sup>	44.94 ± 2.07 <sup>a</sup>	39.44 ± 0.95 <sup>c</sup>	40.42 ± 0.87 <sup>bc</sup>	43.54 ± 0.46 <sup>ab</sup>
C18:2n6	25.46 ± 2.45	22.46 ± 0.58	23.28 ± 1.35	22.01 ± 1.18	24.63 ± 0.75
C18:3n3	3.23 ± 0.11	3.04 ± 0.19	3.23 ± 0.29	2.95 ± 0.11	3.22 ± 0.16
C20:2n6	0.68 ± 0.11 <sup>ab</sup>	0.84 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.59 ± 0.08 <sup>b</sup>	0.55 ± 0.06 <sup>b</sup>	0.62 ± 0.07 <sup>ab</sup>
C20:4n6	0.80 ± 0.20	0.87 ± 0.10	0.88 ± 0.19	0.82 ± 0.09	0.65 ± 0.05
C20:5n3	2.01 ± 0.15 <sup>ab</sup>	1.79 ± 0.11 <sup>b</sup>	2.45 ± 0.20 <sup>a</sup>	2.40 ± 0.13 <sup>a</sup>	1.75 ± 0.13 <sup>b</sup>
C22:6n3	3.29 ± 0.25 <sup>ab</sup>	2.84 ± 0.17 <sup>b</sup>	3.95 ± 0.18 <sup>a</sup>	3.97 ± 0.20 <sup>a</sup>	2.83 ± 0.27 <sup>b</sup>
∑ PUFA	35.52 ± 1.74	31.48 ± 1.25	34.42 ± 0.84	32.74 ± 1.06	33.88 ± 1.82
∑ n-3PUFA	8.53 ± 0.46 <sup>ac</sup>	7.28 ± 0.64 <sup>c</sup>	9.63 ± 0.55 <sup>a</sup>	9.31 ± 0.24 <sup>ab</sup>	7.81 ± 0.51 <sup>bc</sup>
∑ n-6PUFA	27.00 ± 2.20	24.20 ± 0.63	24.79 ± 1.12	23.43 ± 1.03	26.07 ± 2.12
∑ HUFA	6.11 ± 0.55 <sup>ab</sup>	5.50 ± 0.34 <sup>b</sup>	7.28 ± 0.49 <sup>a</sup>	7.18 ± 0.21 <sup>a</sup>	5.36 ± 0.46 <sup>b</sup>
DHA/EPA	1.64 ± 0.03	1.58 ± 0.03	1.63 ± 0.10	1.67 ± 0.15	1.61 ± 0.05
n-3/n-6	0.33 ± 0.04	0.30 ± 0.02	0.39 ± 0.04	0.40 ± 0.02	0.31 ± 0.05

同行数据不含相同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ ; ∑ 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; ∑ n-3PUFA: 总 n-3 多不饱和脂肪酸; ∑ n-6PUFA: 总 n-6 多不饱和脂肪酸; ∑ HUFA: 总高不饱和脂肪酸; DHA/EPA: DHA 与 EPA 比值。

Values in the same row with different letter mean significant difference ( $P < 0.05$ ). ∑ SFA: ∑ Saturated fatty acids; ∑ MUFA: ∑ Mono unsaturated fatty acids; ∑ PUFA: ∑ Poly unsaturated fatty acids; ∑ n-3PUFA: ∑ n-3 Poly unsaturated fatty acids; ∑ n-6PUFA: ∑ n-6 Poly unsaturated fatty acids; ∑ HUFA: ∑ High unsaturated fatty acids; DHA/EPA: Ratio of DHA to EPA.

雄蟹肝胰腺中的总脂含量随替代水平的升高(0 ~ 50%)而上升, 这与幼蟹(常国亮等 2008,

赵亚婷等 2013)和凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)(刘穗华等 2010)的研究结果相一

表 6 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹肌肉中脂肪酸组成的影响 (% 总脂肪酸)

Table 6 Effects of dietary fish oil replacement by vegetable oils on fatty acid composition in the muscle of adult male Chinese Mitten Crab (% of total fatty acids)

脂肪酸 Fatty acids	饲料 1 # Feed 1 #	饲料 2 # Feed 2 #	饲料 3 # Feed 3 #	饲料 4 # Feed 4 #	饲料 5 # Feed 5 #
C14:0	0.12 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.12 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>c</sup>
C15:0	0.16 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.10 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>c</sup>
C16:0	10.77 ± 0.18 <sup>a</sup>	11.05 ± 0.11 <sup>a</sup>	10.77 ± 0.18 <sup>a</sup>	10.04 ± 0.23 <sup>b</sup>	10.07 ± 0.25 <sup>b</sup>
C17:0	0.48 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.43 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.41 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.42 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.37 ± 0.01 <sup>b</sup>
C18:0	6.36 ± 0.18	6.21 ± 0.08	6.04 ± 0.14	6.22 ± 0.12	6.12 ± 0.19
C20:0	0.22 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.20 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.20 ± 0.01
C22:0	0.16 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.12 ± 0.01	—	0.14 ± 0.02
∑ SFA	18.27 ± 0.27 <sup>a</sup>	18.31 ± 0.17 <sup>a</sup>	17.77 ± 0.24 <sup>ab</sup>	17.09 ± 0.25 <sup>b</sup>	17.03 ± 0.45 <sup>b</sup>
C14:1n5	0.07 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.10 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.11 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>a</sup>
C16:1n7	1.56 ± 0.11	1.34 ± 0.28	1.35 ± 0.10	1.14 ± 0.16	1.07 ± 0.14
C17:1n7	0.27 ± 0.04	0.29 ± 0.03	0.23 ± 0.03	0.23 ± 0.04	0.19 ± 0.02
C18:1n9	18.08 ± 0.81 <sup>b</sup>	19.24 ± 0.36 <sup>ab</sup>	19.75 ± 0.38 <sup>a</sup>	18.98 ± 0.35 <sup>ab</sup>	19.98 ± 0.31 <sup>a</sup>
C18:1n7	2.58 ± 0.06 <sup>ab</sup>	2.84 ± 0.12 <sup>a</sup>	2.53 ± 0.07 <sup>b</sup>	2.58 ± 0.12 <sup>ab</sup>	2.41 ± 0.04 <sup>b</sup>
C22:1n9	0.27 ± 0.02	0.32 ± 0.05	0.26 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.27 ± 0.02
∑ MUFA	22.85 ± 0.66	24.32 ± 0.43	24.36 ± 0.31	23.37 ± 0.51	24.24 ± 0.40
C18:2n6	13.11 ± 0.57 <sup>b</sup>	13.23 ± 0.75 <sup>b</sup>	14.52 ± 0.27 <sup>ab</sup>	15.12 ± 0.83 <sup>a</sup>	15.43 ± 0.38 <sup>a</sup>
C18:3n3	1.86 ± 0.10	1.53 ± 0.13	1.55 ± 0.11	1.74 ± 0.13	1.61 ± 0.12
C20:2n6	1.30 ± 0.03	1.11 ± 0.03	1.17 ± 0.10	1.24 ± 0.01	1.30 ± 0.10
C20:4n6	4.37 ± 0.29	3.90 ± 0.38	3.75 ± 0.35	3.59 ± 0.33	3.80 ± 0.27
C20:5n3	21.16 ± 0.19 <sup>ab</sup>	21.11 ± 0.26 <sup>ab</sup>	21.11 ± 0.36 <sup>ab</sup>	22.16 ± 0.38 <sup>a</sup>	20.73 ± 0.49 <sup>b</sup>
C22:6n3	13.60 ± 0.31	13.30 ± 0.56	12.76 ± 0.24	13.39 ± 0.18	13.36 ± 0.44
∑ PUFA	55.40 ± 0.73 <sup>ac</sup>	54.18 ± 0.75 <sup>c</sup>	54.85 ± 0.34 <sup>bc</sup>	57.24 ± 0.86 <sup>a</sup>	56.22 ± 0.34 <sup>ab</sup>
∑ n-3PUFA	36.62 ± 0.44 <sup>ab</sup>	35.94 ± 0.64 <sup>ab</sup>	35.42 ± 0.24 <sup>b</sup>	37.29 ± 0.45 <sup>a</sup>	35.69 ± 0.52 <sup>b</sup>
∑ n-6PUFA	18.78 ± 0.33 <sup>bc</sup>	18.24 ± 0.52 <sup>c</sup>	19.43 ± 0.23 <sup>ac</sup>	19.95 ± 0.59 <sup>ab</sup>	20.53 ± 0.21 <sup>a</sup>
∑ HUFA	39.13 ± 0.40 <sup>a</sup>	38.31 ± 0.44 <sup>ab</sup>	37.62 ± 0.42 <sup>b</sup>	39.14 ± 0.29 <sup>a</sup>	37.88 ± 0.56 <sup>ab</sup>
DHA/EPA	0.64 ± 0.01	0.63 ± 0.03	0.61 ± 0.02	0.60 ± 0.01	0.65 ± 0.03
n-3/n-6	1.95 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1.98 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.82 ± 0.02 <sup>bc</sup>	1.87 ± 0.05 <sup>ac</sup>	1.74 ± 0.04 <sup>c</sup>

同行数据不含相同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ ; ∑ 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; ∑ n-3PUFA: 总 n-3 多不饱和脂肪酸; ∑ n-6PUFA: 总 n-6 多不饱和脂肪酸; ∑ HUFA: 总高不饱和脂肪酸; DHA/EPA: DHA 与 EPA 比值。

Values in the same row with different letter mean significant difference ( $P < 0.05$ ). ∑ SFA: ∑ Saturated fatty acids; ∑ MUFA: ∑ Mono unsaturated fatty acids; ∑ PUFA: ∑ Poly unsaturated fatty acids; ∑ n-3PUFA: ∑ n-3 Poly unsaturated fatty acids; ∑ n-6PUFA: ∑ n-6 Poly unsaturated fatty acids; ∑ HUFA: ∑ High unsaturated fatty acids; DHA/EPA: Ratio of DHA to EPA.

致。可能是由于饲料中 MUFA 含量的提高, 促进了中性脂肪酸(如甘油三酯等)在肝胰腺中的合成和沉积(Brousseau et al. 1995, Ribeiro et

al. 2008), 而饲料 4#和 5#组肝胰腺总脂含量的降低, 则可能是由于饲料中过高的 C18:2n6 影响了雄体肝胰腺中的脂肪沉积。肝胰腺中的水

分和灰分含量变化与总脂含量变化相反, 分析认为是由于总脂百分含量的升高, 从而使得肝胰腺中水分和灰分的相对百分含量降低。

各组雄蟹肌肉的水分和蛋白含量均无显著差异, 但肌肉总脂含量随鱼油替代水平的升高而上升, 这与阙有清等 (2012) 用配合饲料替代杂鱼饲喂中华绒螯蟹的研究结果相似。肌肉中总脂水平的上升可能是由于饲料中单不饱和脂肪酸 (MUFA) 和饱和脂肪酸 (SFA) 促进了中性脂肪的合成和沉积 (Brousseau et al. 1995, 常国亮等 2008)。

### 3.2 饲料中植物油替代鱼油对成体雄蟹组织中脂肪酸组成的影响

由于鱼油和植物油中的脂肪酸组成不同 (熊秋芳等 2014), 因此植物油替代鱼油势必会造成饲料中脂肪酸组成的变化。本研究中, 雄蟹精巢中的 C16:0、C16:1n7、C22:6n3 和总 n-3 多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  n-3 PUFA) 含量随着饲料中含量的下降而下降, 总 n-6 多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  n-6 PUFA) 含量随着饲料中含量的上升出现了上升趋势, 这与张稳等 (2014) 对三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 的研究结果相一致。说明育肥饲料中脂肪酸组成对雄蟹性腺的脂肪酸组成具有一定的影响。但其 C18:0、C18:1n9、C18:2n6、C20:4n6 和 C20:5n3 等饲料中变化较大的脂肪酸在各饲料组间并无显著差异, 暗示了雄蟹性腺的这些脂肪酸组成可能具有较强的保守性。性腺中的 ARA (C20:4n6)、EPA (C20:5n3) 和 DHA (C22:6n3) 的百分含量明显高于饲料中对应脂肪酸的百分含量, 则可能是由于这三种脂肪酸对成体雄蟹繁殖性能具有重要的作用 (Wu et al. 2007a, 2011)。

肝胰腺脂肪酸组成在一定程度上受饲料脂肪酸含量的影响 (Wu et al. 2011), 但本研究中肝胰腺的各脂肪酸变化趋势与先前研究的结果差异较大 (常国亮等 2008, 赵亚婷等 2013)。其中, 饲料中的饱和脂肪酸 (SFA) 随替代水平的上升而下降, 但肝胰腺中的 SFA 却在 3# 和 4# 饲料组出现了上升趋势, 这可能是因为饱

和脂肪酸 (SFA) 是主要的供能脂肪酸 (张稳等 2014), 雄蟹需在体内储存饱和脂肪酸 (SFA) 为其生存活动提供所需能量 (陈彦良等 2014)。同样, 包括油酸 (C18:1n9) 在内的单不饱和脂肪酸 (MUFA) 和亚油酸 (C18:2n6) 在这两组出现了下降。分析其原因可能有两点: (1) 单不饱和脂肪酸 (MUFA) 和亚油酸相比其他脂肪酸更容易被  $\beta$  氧化利用 (Henderson et al. 1985), 淡水甲壳动物对 C18:2n6 的利用能力较强, 可优先利用其进行氧化供能 (D'Abramo 1998); (2) 中华绒螯蟹具有将亚油酸转化为 ARA (C20:4n6) 的能力 (Wu et al. 2010), 饲料中缺乏高不饱和脂肪酸 (HUFA) 激发了中华绒螯蟹脂肪酸去饱和酶和碳链延长酶的基因表达 (刘泽华等 2016), 提高了中华绒螯蟹将亚油酸转化为 ARA 的能力, 故饲料 3# 和 4# 组肝胰腺中亚油酸含量相对较低。因此, 肝胰腺作为中华绒螯蟹脂质代谢的调控中心, 对于饲料中的脂肪酸组成改变具有一定的响应机制, 如利用 C18:2n6 合成 ARA, 将过量的单不饱和脂肪酸 (MUFA) 的 C18:2n6 氧化等功能, 从而减少饲料中脂肪酸组成改变带来的影响 (常国亮等 2008)。

与其他甲壳动物的研究结果类似 (González-Félix et al. 2003a, b, 郭占林等 2010), 雄体成蟹肌肉中的 C16:0、C18:1n9、C18:2n6 和总 n-6 多不饱和脂肪酸 ( $\sum$  n-6 PUFA) 含量与饲料中对应脂肪酸的变化趋势相同, 但各组肌肉中的 ARA、EPA 和 DHA 的含量差异较小。这说明中华绒螯蟹肌肉的脂肪酸组成在一定程度上受饲料脂肪酸组成的影响, 但其高不饱和脂肪酸 (HUFA) 组成具有一定的保守性, 这是由于肌肉组织需要积累相对较多的高不饱和脂肪酸 (HUFA) 来维持细胞膜正常的生理功能 (常国亮等 2008, Wu et al. 2010)。

综上所述, 豆油与菜籽油比例为 1:1 的混合植物油部分或全部替代饲料中的鱼油, 对成体雄蟹组织中水分和蛋白含量并无显著影响,

饲料中 50% 的鱼油替代水平有利于雄蟹肝胰腺和肌肉中的脂肪沉积; 精巢、肝胰腺和肌肉脂肪酸组成在一定程度上均受到饲料中脂肪酸组成的影响, 随着鱼油替代水平的提高, 精巢和肌肉中亚油酸百分含量显著上升。

## 参 考 文 献

- AOAC. 1995. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists. 16th ed. Arlington: Association of Analytical Communities International.
- Brousseau M E, Ordovas J M, Osada J et al. 1995. Dietary monounsaturated and polyunsaturated fatty acid are comparable in their effects on hepatic apolipoprotein mRNA abundance and liver lipid concentration when substituted for saturated fatty acid in cynomolgus monkeys. *Journal of Nutrition*, 125(3): 425–436.
- Brown P B, Hart S D. 2011. Soybean oil and other n-6 polyunsaturated fatty acid-rich vegetable oils // Turchini G M, Ng W K, Tocher D R. *Fish Oil Replacement and Alternation Lipid Sources in Aquaculture Feeds*. Boca Roton: Chemical Rubber Company Press, 133–160.
- D'Abramo L R. 1998. Nutritional requirements of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*: Comparisons with species of penaeid shrimp. *Review in Fisheries Science*, 6(1/2): 153–163.
- Folch J, Lees M, Sloane-Stanley G H. 1957. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues. *Journal of Biological Chemistry*, 226(1): 497–509.
- Glencross B D, Turchini G M. 2011. Fish oil replacement in starter, grow-out, and finishing feed for farmed aquatic animal // Turchini G M, Ng W K, Tocher D R. *Fish oil replacement and alternation lipid sources in aquaculture feeds*. Boca Roton: Chemical Rubber Company Press, 373–404.
- González-Félix M L, Gatlin D M, Lawrence A L, et al. 2003a. 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. *Aquaculture Nutrition*, 9(2): 115–122.
- González-Félix M L, Lawrence A L, Gatlin D M, et al. 2003b. Nutritional evaluation of fatty acid for the open thelycum shrimp, *Litopenaeus vannamei*: I. Effect of dietary linoleic and linolenic acid at different concentrations and ratios on juvenile shrimp growth, survival and fatty acid composition. *Aquaculture Nutrition*, 9(2): 105–113.
- Gunstone F D. 2011. *The world's oils and fat* // Turchini G M, Ng W K, Tocher D R. *Fish Oil Replacement and Alternation Lipid Sources in Aquaculture Feeds*. Boca Roton: Chemical Rubber Company Press, 61–98.
- He J, Wu X G, Li J Y, et al. 2014. Comparison of the culture performance and profitability of wild-caught and captive pond-reared Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) juveniles reared in grow-out ponds: Implications for seed selection and genetic selection programs. *Aquaculture*, 434(20): 48–56.
- Henderson R J, Sargent J R. 1985. Chain-length specificities of mitochondrial and peroxisomal beta-oxidation of fatty acids in livers of rainbow trout. *Comparative Biochemistry and Physiology: Part B*, 82(1): 79–85.
- Nasopoulou C, Zabetakis I. 2012. Benefits on fish oil replacement by plant originated oils in compounded fish feeds: a review. *LWT-Food Science and Technology*, 47(2): 217–224.
- Pickova J, Mørkøre T. 2007. Alternate oils in fish feeds. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(3): 256–263.
- Ribeiro P A P, Logato P V R, Paulad A D G, et al. 2008. Effect of different oils in the diet on lipogenesis and the lipid profile of Nile tilapias. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 37(8): 1331–1337.
- Shao L C, Wang C, He J, et al. 2013. Hepatopancreas and gonad quality of chinese mitten crabs fattened with natural and formulated diets. *Journal of Food Quality*, 36(3): 217–227.
- Sui L Y, Sun H X, Wu X G, et al. 2011. Effect of dietary HUFA on tissue fatty acid composition and reproductive performance of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards) broodstock. *Aquaculture International*, 19(2): 269–282.
- Turchini G M, Francis D S, Senadheera S P S D, et al. 2011. Fish oil replacement with different vegetable oils in Murray cod: evidence of an “omega-3 sparing effect” by other dietary fatty acids. *Aquaculture*, 315(3/4): 250–259.
- Turchini G M, Torstensen B E, Ng W K. 2009. Fish oil replacement in finfish nutrition. *Reviews in Aquaculture*, 1(1): 10–57.
- Wen X B, Chen L Q, Ai C X, et al. 2001. Variation in lipid

- composition of Chinese mitten-handed crab, *Eriocheir sinensis* during ovarian maturation. *Comparative Biochemistry and Physiology: B*, 130(1): 95–104.
- Wu X G, Cheng Y X, Nan T Z, et al. 2007a. Effect of dietary supplementation of phospholipid and highly unsaturated fatty acids on reproductive performance and offspring quality of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) broodstock. *Aquaculture*, 273(4): 602–613.
- Wu X G, Cheng Y X, Sui L Y, et al. 2007b. Biochemical composition from pond-reared and lake-stocked adult *Eriocheir sinensis*. *Aquaculture Research*, 38(14):1459–1467.
- Wu X G, Wang Z K, Cheng Y X, et al. 2010. 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). *Aquaculture Research*, 42(3): 457–468.
- Wu X G, Wang Z K, Cheng Y X, et al. 2011. Effect of dietary phospholipid and highly unsaturated fatty acids on the precocity, survival and growth of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). *Aquaculture Research*, 42(3): 457–468.
- 常国亮, 吴旭干, 成永旭, 等. 2008. 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. *海洋与湖沼*, 39(3): 276–283.
- 陈彦良, 李二超, 禹娜, 等. 2014. 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. *中国水产科学*, 21(3): 511–521.
- 高先楚, 王锡昌, 顾赛麒, 等. 2014. 蟹性腺中的脂质对性腺香气的作用. *广东农业科学*, 41(2): 128–132.
- 郭占林, 李嘉尧, 甘信辉, 等. 2010. 不同脂肪源对红螯光壳螯虾幼虾生长、消化酶活性及其肌肉生化组成的影响. *中国水产科学*, 17(5): 996–1004.
- 刘穗华, 曹俊明, 黄燕华, 等. 2010. 植物油替代鱼油对凡纳滨对虾的生长性能和肝体比的影响. *华南农业大学学报*, 31(4): 95–99.
- 刘泽华, 吴旭干, 龙晓文, 等. 2016. 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. *水生生物学报*, 40(4): 767–778.
- 农业部渔业渔政管理局. 2015. 2015 年中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社.
- 阙有清, 杨志刚, 纪连元, 等. 2012. 配合饲料替代杂鱼对中华绒螯蟹生长发育、体成分及脂肪酸组成的影响. *水产学报*, 36(10): 1612–1623.
- 王群, 赵云龙, 陈立侨. 2002. 中华绒螯蟹雄性生殖系统生化组成及精子代谢. *水产学报*, 26(5): 411–416.
- 王群, 赵云龙, 马强, 等. 2004. 中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 雄性生殖系统发育过程中生化成分的季节变化. *海洋与湖沼*, 35(4): 351–357.
- 吴旭干, 成永旭, 沈斌, 等. 2004. 饲料中磷脂和高度不饱和脂肪酸对中华绒螯蟹育肥和卵巢发育的影响. *上海师范大学学报: 自然科学版*, 33(增刊): 33–41.
- 吴旭干, 汪倩, 楼宝, 等. 2014. 育肥时间对三疣梭子蟹卵巢发育和营养品质的影响. *水产学报*, 38(2): 170–182.
- 熊秋芳, 张效明, 文静, 等. 2014. 菜子油与不同食用植物油营养品质的比较—兼论油菜品质的遗传改良. *中国粮油学报*, 29(6): 122–128.
- 张稳, 谢奉军, 金敏, 等. 2014. 饲料中 n-3 高不饱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. *动物营养学报*, 26(5): 1254–1264.
- 赵磊, 龙晓文, 吴旭干, 等. 2016. 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. *动物营养学报*, 28(2): 455–467.
- 赵亚婷, 吴旭干, 常国亮, 等. 2013. 饲料中 DHA 含量对中华绒螯蟹幼蟹生长、脂类组成和低氧胁迫的影响. *水生生物学报*, 6(6): 1133–1144.