

文章编号:1000-0615(2009)04-0639-11

## *n*-3 高不饱和脂肪酸对黑鲷幼鱼生长及脂肪代谢的影响

马晶晶<sup>1,2</sup>, 邵庆均<sup>1</sup>, 许梓荣<sup>1</sup>, 周凡<sup>1</sup>,  
钟观运<sup>1</sup>, 宋文新<sup>1</sup>, Owari Ngandali Bergo<sup>1</sup>

(1. 浙江大学动物科学学院, 浙江 杭州 310029;

2. 山东省海洋水产研究所, 山东 烟台 264006)

**摘要:**研究了饲料中不同水平 *n*-3 HUFA (0.79%, 0.83%, 0.85%, 0.88%, 0.92%, 0.94%; DHA/EPA = 2.8/1) 对黑鲷幼鱼生长及脂肪代谢的影响。结果显示:(1) 黑鲷幼鱼肝体指数 (HSI) 及腹脂率 (IPF ratio) 随饲料中 *n*-3 HUFA 含量的增加而减小, 且于 0.92% 和 0.94% 组时显著低于其他各组; 脂肪细胞直径呈减小趋势, 其中 0.94% 组显著小于 0.85% 组; 肌肉脂肪含量受 *n*-3 HUFA 的影响显著, 于 0.88% 组时达到最低。各组全鱼水份和脂肪含量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。肝脏、肌肉及腹腔脂肪组织饱和脂肪酸 ( $\Sigma$ SFA) 和 C16:0 含量均随饲料 *n*-3 HUFA 水平增加呈下降趋势, 而  $\Sigma$ *n*-3 HUFA 呈显著上升趋势。各组织中 DHA/EPA 不受饲料脂肪酸组成的影响。以增重率为参考指标, 二次回归分析结果表明, 黑鲷幼鱼 [(8.08 ± 0.09) g] 获得最佳增重时对饲料中 *n*-3 HUFA 的需要量为 0.87% DM; (2) 黑鲷幼鱼肝脏脂肪酸合成酶 (FAS) 活性及基因表达水平均在 *n*-3 HUFA > 0.92% 时有显著下降 ( $P < 0.05$ ); 腹腔脂肪激素敏感脂肪酶 (HSL) 活性及基因表达水平均随饲料中 *n*-3 HUFA 的添加呈升高趋势 ( $P < 0.05$ ), 且高含量 *n*-3 HUFA (0.94%) 可使 HSL 活性增加近一倍。结果表明, 饲料中 *n*-3 HUFA 通过同步调控脂肪合成与分解两个过程影响黑鲷幼鱼脂肪代谢。

**关键词:** 黑鲷; *n*-3 高不饱和脂肪酸; 生长; 脂肪代谢; 脂肪酸合成酶; 激素敏感脂肪酶

**中图分类号:** S 963

**文献标识码:** A

脂类在鱼类营养中起重要作用, 可以为鱼类生长提供能量和必需脂肪酸<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 海水鱼类转化 18 碳不饱和脂肪酸为 *n*-3 HUFA 的能力有限, 必须在饲料中补充适量的 *n*-3 HUFA 才能保证其正常生长和发育<sup>[3-5]</sup>。迄今为止, 研究者已经确定了真鲷 (*Pagrus major*)<sup>[6]</sup>、鲈 (*Lateolarax japonicus*)<sup>[7]</sup>、大菱鲆 (*Scophthalmus maximus* L.)<sup>[8]</sup>、牙鲆 (*Paralichthys loivaceus*)<sup>[9]</sup>、金头鲷 (*Sparus aurata*)<sup>[10]</sup>、黄带鲂 (*Caranx delicatissimus*)<sup>[11]</sup> 和军曹鱼 (*Rachycentron canadum*)<sup>[12]</sup> 等对 *n*-3 HUFA 或 EPA、DHA 的需要量。

黑鲷 (*Sparus macrocephalus*) 是我国东南沿海及日本、东南亚等国家海水养殖的名贵经济鱼类。

目前有关黑鲷的营养研究较少, 本实验室已经研究出了黑鲷幼鱼的蛋白质<sup>[13]</sup>、蛋能比<sup>[14]</sup>、矿物质磷<sup>[15]</sup>和维生素 C<sup>[16]</sup>等的需要量。本试验通过在饲料中添加深海鱼油和玉米油, 研究 *n*-3 HUFA (DHA/EPA = 2.8/1) 对黑鲷幼鱼生长、体组成及血浆生化指标的影响, 从而确定黑鲷幼鱼 [(8.08 ± 0.09) g] 的最适 *n*-3 HUFA 需要量。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

黑鲷幼鱼由浙江省海洋水产研究所提供, 采用玉米油和鱼油调和饲料脂肪酸含量, 配制 EPA/DHA 固定 (2.8/1)、*n*-3 HUFA 含量不同的试验饲料 Diet 1 ~ 6。饲料原料经粉碎过 80 目

筛,混合后制成直径为3 mm的硬颗粒饲料,经空  
调抽湿、风扇干燥72 h后保存于-20 ℃备用。试  
验饲料配方及营养成分分析见表1。

表1 试验饲料配方及营养成分分析  
Tab.1 Formulation and nutrient composition of the experimental diets g/100g dry diet

原料 ingredients (g/100 g)	饲料号 Diets no.					
	Diet 1	Diet 2	Diet 3	Diet 4	Diet 5	Diet 6
白鱼粉 white fishmeal	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
酪蛋白 casein	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00
α-淀粉 α-starch	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50	18.50
α-纤维素 α-cellulose	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
羧甲基纤维素 carboxymethyl cellulose	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
维生素预混料 vitamin premix <sup>a</sup>	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
矿物质预混料 mineral premix <sup>b</sup>	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
玉米油 corn oil	10.50	10.15	9.80	9.45	9.10	8.75
鱼油 marine fish oil <sup>c</sup>	0.00	0.35	0.70	1.05	1.40	1.75
营养成分分析 nutrient composition( % DM)						
粗蛋白 crude protein	49.13	49.75	49.66	49.52	49.69	49.85
粗脂肪 crude lipid	10.18	10.14	10.14	10.11	10.10	10.11
粗灰分 crude ash	10.80	10.39	10.34	10.35	10.34	10.49
20:5n-3 (EPA) <sup>d</sup>	0.20	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25
22:6n-3 (DHA) <sup>e</sup>	0.58	0.61	0.62	0.65	0.68	0.69
DHA/EPA <sup>f</sup>	2.8/1	2.8/1	2.8/1	2.8/1	2.8/1	2.8/1
n-3 HUFA <sup>g</sup>	0.79	0.83	0.85	0.88	0.92	0.94

注:<sup>a</sup> 维生素添加剂(mg/kg 饲料):α-生育酚,20;二硫氢酸钠维生素 K,5;维生素 B<sub>1</sub>,5;泛酸钙,10;烟碱酸,100;维生素 B<sub>6</sub>,5;叶酸,2;维生素 B<sub>12</sub>,0.05;生物素,0.5;氨基苯酸,50;肌醇,500;氯化胆碱,500;维生素 C,150;维生素 A,10 000 IU/kg 饲料;维生素 D<sub>3</sub>,2 000 IU/kg 饲料。<sup>b</sup> 矿物质添加剂(mg/kg 饲料):硫酸钴,0.4;硫酸铜,5.0;柠檬酸铁,40;氧化镁,100;硫酸锰,10;NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O,5.0;ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,40。<sup>c</sup> 深海鱼油,购自浙江海力生集团(挪威进口鱼油);EPA/DHA=1:1。<sup>d,e,f,g</sup> 据饲料中脂类水平及脂肪酸含量估算

Notes: <sup>a</sup> Vitamin premix (mg/kg diet): alpha tocopherol, 20; Na menadione bisulfate, 5; riboflavin, 5; calcium pantothenate, 10; nicotinic acid, 100; folic acid, 2; cyanocobalamin, 0.05; biotin, 0.5; p-aminobenzoic acid, 50; inositol, 500; choline chloride, 500; ascorbic acid, 150; (IU/kg diet): retinal, 10 000; cholecalciferol, 2 000. <sup>b</sup> Mineral premix (mg/kg diet): cobalt sulfate, 0.4; copper sulfate, 5.0; ferric citrate, 40; magnesium oxide, 100; manganous sulfate, 10; monosodium phosphate, 5.0, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,40. <sup>c</sup> Marine fish oil: imported from Norway; EPA/DHA=1. <sup>d,e,f,g</sup> Dietary n-3 HUFA content was calculated according to the lipid content and fatty acid composition in the diet

## 1.2 饲养管理

饲养试验(56 d)在浙江省海洋水产研究所试验基地进行。两周暂养期结束后,选择体质健壮、规格整齐的黑鲷幼鱼[(8.08±0.09)g]360尾,随机分成6组,每组3个重复,分别放养入18个在室内水泥池(7.4 m×3.5 m×1.5 m,储水高度为0.7 m)中搭建的规格相同(1.5 m×1.0 m×1.0 m)的网箱中。水泥池中带有溢流及增氧系统,换水速率约为19 L/min。试验期间定期监测水质,连续充气使水中溶解氧保持在5 mg/L以上。试验期间水温保持在(28±1)℃,水体盐度为26~29 g/L。每天投喂2次,以饱食为原则,日投饵率维持在3%~5%,每3周称重一次,观

察其生长情况。

## 1.3 样品收集

试验结束后,停食24 h,所有试验鱼于取样前麻醉(MS 222,60 mg/kg)。从每个网箱中随机选取5尾试验鱼用作全鱼样品,再随机抽取5尾用于血浆样品采集;剩余10尾分别在称体重、量体长后解剖取肝脏、肌肉及腹腔脂肪。所有样品均用液氮浸泡后保存于-80 ℃冰箱中。

## 1.4 测定项目

生长及饲料利用效果计算 存活率(%)=100×试验结束时尾数/试验开始时尾数;增重率(WGR,%)=100×试验增重/试验初重;鱼的肝体指数(HSI,%)=100×肝脏重量/鱼体重;鱼体

肥满度(CF, %) = 100 × 鱼体重/体长<sup>3</sup>; 腹脂率(IPF ratio, %) = 100 × 试验鱼腹腔脂肪重/试验鱼体重; 饲料效率(FE) = 增重/饲料消耗量; 蛋白质效率比(PER) = 增重/(摄食量 × 饲料蛋白质含量)。

饲料及鱼体组成成分测定 水分测定采用恒温干燥法(105 °C)(GB/T 6435 - 86); 粗蛋白测定采用微量凯氏定氮法(GB/T 6432 - 94); 粗脂肪测定采用索氏抽提法(GB/T 6433 - 94); 粗灰分测定采用马福炉灼烧法(550 °C)(GB/T 6438 - 92); 脂肪酸含量采用气相色谱分析仪

(HP6890N 气相色谱仪)测定, 定量方式采用面积归一法, 脂肪酸数据以每种脂肪酸占总脂肪酸的百分比表示。

幼鱼脂肪细胞直径的测定 采用苏木精 - 伊红染色法。肝脏组织中 FAS 活性测定参照 Tian 等<sup>[17]</sup> 制定的方法, 腹腔脂肪中 HSL 活性测定参照金宗濂<sup>[18]</sup> 所介绍的方法。各试验组 FAS 及 HSL 基因表达测定所需特异性引物(表 2) 据本实验室已克隆的黑鲷 FAS 及 HSL 基因片段序列, 采用 Primer Premier 5.0 软件设计。

表 2 实时荧光定量 PCR 所需引物

Tab. 2 Specific primers for real-time PCR determination of FAS and HSL

基因 gene	引物序列 primer	扩增长度(bp) length	登录号 GenBank
FAS	上游: 5'-ACTCCTATGTGGCAGCATACAC-3' 下游: 5'-GTTTCAGCCTCAGACTCTTTACC-3'	73	EU781499
HSL	上游: 5'-TTCACCTCCAGCCATCCGA-3' 下游: 5'-TGCAACACCTATTCCCGACT-3'	99	EU780581
$\beta$ -actin	上游: 5'-AGCTATGAGCTGCCTGACG-3' 下游: 5'-ATGATGCTGTTGTAGGTGGTCT-3'	133	AY491380

## 1.5 数据分析

采用 EXCEL 2000 和 SAS 6.12 等软件进行统计, 统计数据采用平均数 ± 标准差的形式表示, 显著水平为 0.05。对于差异显著组采用 Duncan 氏多重比较。FAS 及 HSL 基因相对于 0.79% n-3 HUFA 组的表达水平以  $2^{-(\Delta CT \text{ 目的基因} - CT \beta\text{-actin})}$  表示。采用二次曲线回归模型分析黑鲷幼鱼对饲料中 n-3 HUFA 的适宜需要量。

## 2 结果

### 2.1 饲料中 n-3 HUFA 水平对黑鲷生长性能的影响

饲料 n-3 HUFA 对黑鲷幼鱼生长性能的影响见表 3。0.85% 和 0.88% 组黑鲷幼鱼末重显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ )。各组试验鱼存活率均保持在 95% 以上 ( $P > 0.05$ )。肝体指数 (HSI) 随饲料中 n-3 HUFA 水平升高呈显著降低 ( $P < 0.05$ ); 肥满度 (CF) 不受饲料 n-3 HUFA 水平的影响, 保持在 1.96 左右; 各试验组黑鲷幼鱼对饲料的利用效率 (FE) 较高 (0.73 ~ 0.78), 且各组间

无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 蛋白质效率 (PER) 最高值 (1.56) 出现在 0.88% 组, 最低值 (1.49) 出现在 0.94% 组 ( $P > 0.05$ ); 腹脂率 (IPF ratio) 及脂肪细胞直径均在饲料 n-3 HUFA  $> 0.88\%$  时有显著降低 ( $P < 0.05$ ), 其中腹脂率与 0.79% 组相比最大降低了 9.2%, 0.94% 组脂肪细胞直径比 0.88% 组减小了 26.6%。

以增重率为参考指标, 通过二次曲线 (图 1;  $y = -4619.622x^2 + 8014.041x - 3259.023$ ,  $r = 0.9397$ ;  $y$  表示 WGR,  $x$  表示饲料 n-3 HUFA%) 分析可知, 本试验条件下, 黑鲷幼鱼对饲料中 n-3 HUFA 的适宜需要量为 0.87% DM。

### 2.2 饲料中 n-3 HUFA 水平对黑鲷幼鱼体组织脂肪沉积的影响

饲料 n-3 HUFA 对黑鲷幼鱼体组织常规组成的影响见表 4。各处理组肌肉水分含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 肌肉脂肪含量较 0.79% 组均有显著降低 ( $P < 0.05$ ), 且于 0.88% 组时含量最低。全鱼组织中脂肪和水分含量均不受饲料中 n-3 HUFA 水平的影响。

表3 饲料中 *n*-3 HUFA 对黑鲷幼鱼生长及饲料利用效果的影响Tab. 3 Effect of dietary *n*-3 HUFA on growth performance and feed utilization in *Sparus macrocephalus*

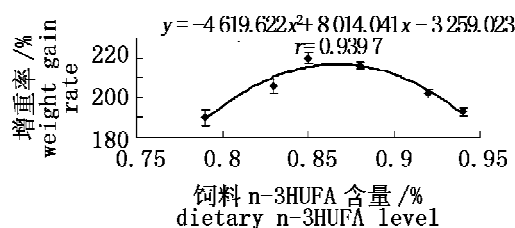
指标 parameters	<i>n</i> -3 HUFA (%)					
	0.79	0.83	0.85	0.88	0.92	0.94
初始体重 IBW (g)	8.03 ± 0.04	8.08 ± 0.04	8.10 ± 0.14	8.05 ± 0.07	8.13 ± 0.18	8.08 ± 0.11
终末体重 (g) FBW	23.3 ± 0.22 <sup>c</sup>	24.7 ± 0.17 <sup>b</sup>	25.9 ± 0.25 <sup>a</sup>	25.4 ± 0.37 <sup>a</sup>	24.6 ± 0.36 <sup>b</sup>	23.7 ± 0.12 <sup>c</sup>
存活率 (%) SR	95	95	100	100	100	98
肝体指数 (%) HSI	1.99 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.60 ± 0.10 <sup>b</sup>	1.84 ± 0.00 <sup>a</sup>	1.45 ± 0.06 <sup>b</sup>	1.50 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.21 ± 0.06 <sup>c</sup>
饱满度 (%) CF	1.97 ± 0.03	1.95 ± 0.03	2.00 ± 0.08	1.95 ± 0.03	1.94 ± 0.01	1.92 ± 0.03
腹脂率 (%) IPF ratio	2.69 ± 0.03 <sup>a</sup>	2.62 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.62 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.60 ± 0.05 <sup>a</sup>	2.50 ± 0.03 <sup>b</sup>	2.44 ± 0.02 <sup>b</sup>
饲料效率 FE	0.78 ± 0.06	0.78 ± 0.00	0.75 ± 0.02	0.76 ± 0.05	0.76 ± 0.04	0.73 ± 0.01
蛋白质效率比 PER	1.54 ± 0.12	1.54 ± 0.01	1.50 ± 0.03	1.56 ± 0.10	1.50 ± 0.07	1.49 ± 0.03
脂肪细胞直径 (μm) adipocyte	29.40 ± 8.40 <sup>ab</sup>	29.40 ± 4.18 <sup>ab</sup>	30.54 ± 3.65 <sup>a</sup>	29.20 ± 4.53 <sup>ab</sup>	25.96 ± 3.28 <sup>ab</sup>	21.57 ± 1.74 <sup>b</sup>

注:表中数据表示形式为平均数 ± 标准差 ( $n=3$ ),同行肩注相同小写字母者表示差异不显著 ( $P>0.05$ );同行肩注不同小写字母者,差异显著,以下各表同

Notes: Values are means ± S D of three replicate groups. Values in the same row with different superscript letters are significantly different, the same as following tables

表4 饲料中 *n*-3 HUFA 水平对黑鲷幼鱼体组织脂肪沉积的影响Tab. 4 Effect of dietary *n*-3 HUFA on tissue proximate composition in *Sparus macrocephalus*

指标 parameters	<i>n</i> -3 HUFA (%)					
	0.79	0.83	0.85	0.88	0.92	0.94
肌肉组织 dorsal muscle						
水分 (%) moisture	76.5 ± 0.48	77.2 ± 0.73	76.5 ± 0.06	77.0 ± 0.04	76.8 ± 0.18	77.1 ± 0.18
粗脂肪 (%) DM crude lipid	15.3 ± 0.60 <sup>a</sup>	13.1 ± 0.60 <sup>b</sup>	11.7 ± 0.27 <sup>cd</sup>	10.8 ± 0.57 <sup>d</sup>	12.1 ± 0.24 <sup>bc</sup>	12.3 ± 0.39 <sup>bc</sup>
全鱼组织 whole fish						
水分 (%) moisture	66.0 ± 1.95	67.5 ± 1.07	65.7 ± 2.05	65.3 ± 1.43	65.2 ± 1.08	65.5 ± 1.32
粗脂肪 (%) DM crude lipid	36.1 ± 6.04	30.7 ± 0.91	34.7 ± 3.47	36.3 ± 2.89	35.5 ± 2.48	35.1 ± 1.79

图1 饲料中 *n*-3 HUFA 水平对黑鲷幼鱼增重率 (WGR) 的影响Fig. 1 Effect of dietary *n*-3 HUFA on weight gain rate (WGR) of *Sparus macrocephalus*

### 2.3 饲料中 *n*-3 HUFA 水平对黑鲷幼鱼体组织脂肪酸组成的影响

肝脏 C16:0 同饱和脂肪酸 ( $\Sigma$  SFA) 含量变化趋势一致,随饲料中 *n*-3 HUFA 水平的升高呈显著下降;C18:1 $n$ -(6+9) 含量占单不饱和脂肪酸总量 ( $\Sigma$  MUFA) 的 67% 左右,随饲料 *n*-3 HUFA 水平 (0.79% ~ 0.88%) 升高呈线性增加 ( $r=0.9406$ ),当饲料 *n*-3 HUFA 含量 > 0.88% 时趋于平稳;黑鲷幼鱼肝脏组织中 DHA (C22:6 $n$ -3)

含量为 12.35% ~ 12.54%,约为 EPA (C20:5 $n$ -3) 含量 (4.63% ~ 4.72%) 的 2.7 倍。DHA 随饲料 *n*-3 HUFA 水平增加而增加,当饲料 *n*-3 HUFA 含量大于 0.83% 时保持在相对稳定水平;脂肪酸饱和指数 (SFA/USFA) 随饲料中 *n*-3 HUFA 的添加呈显著下降趋势 ( $P<0.05$ );*n*-3/*n*-6 比值随饲料中 *n*-3 HUFA 含量增加而显著降低 (10.85 ~ 9.30%);18:1 $n$ / $\Sigma$  *n*-3 HUFA 比值在各试验组之间变化幅度较小 (1.46% ~ 1.47%),仅 0.79% 试验组同 0.96% 试验组之间差异显著 ( $P<0.05$ ) (表 5)。

与肝脏组织相似,黑鲷幼鱼背肌  $\Sigma$  SFA 随饲料中 *n*-3 HUFA 含量升高呈下降趋势,当 *n*-3 HUFA > 0.83% 时各组之间差异不显著 ( $P>0.05$ )。C16:0 同  $\Sigma$  SFA 变化趋势相似,当 *n*-3 HUFA > 0.85% 时保持在相对稳定水平。随着饲料中 *n*-3 HUFA 的添加,C18:0 呈上升趋势,当饲料中 *n*-3 HUFA > 0.85% 时保持在 4.3% 左右;各试验组间 MUFA 及其主要脂肪酸 C18:1 $n$ -(6+9) 含量均无显著变化 ( $P>0.05$ ); $\Sigma$  *n*-3 PUFA 含

量随饲料中 *n*-3 HUFA 含量升高而升高,当 *n*-3 HUFA 含量大于 0.85% 时保持稳定。0.88% *n*-3 HUFA 试验组 C18:3*n*-3 含量(0.52%)显著高于 0.94% 组(0.48%); $\Sigma$  *n*-3 HUFA 含量随饲料中 *n*-3 HUFA 含量增加呈显著上升,其主要脂肪酸 EPA 含量在各组之间变化不显著( $P > 0.05$ ),而

DHA 随饲料中 *n*-3 HUFA 水平升高而增加( $P < 0.05$ );各试验组黑鲷幼鱼背肌 SFA/USFA 及 DHA/EPA 不受饲料 *n*-3 HUFA 水平的影响,分别保持在 10.84 和 2.86 左右。C18:1*n*/ $\Sigma$  *n*-3 HUFA 随饲料 *n*-3 HUFA 添加有下降趋势( $P < 0.05$ )(表 6)。

表 5 不同 *n*-3 HUFA 水平饲料对黑鲷幼鱼肝脏组织主要脂肪酸组成的影响  
Tab.5 Effect of dietary *n*-3 HUFA on liver major fatty acid composition in *Sparus macrocephalus* % area

脂肪酸种类 fatty acids	<i>n</i> -3 HUFA(%)					
	0.79	0.83	0.85	0.88	0.92	0.94
16:0	31.91 ± 0.02 <sup>a</sup>	31.82 ± 0.88 <sup>a</sup>	31.57 ± 0.00 <sup>b</sup>	31.36 ± 0.19 <sup>bc</sup>	31.05 ± 0.02 <sup>d</sup>	31.14 ± 0.03 <sup>cd</sup>
18:0	4.37 ± 0.03 <sup>ab</sup>	4.34 ± 0.01 <sup>ab</sup>	4.30 ± 0.05 <sup>b</sup>	4.34 ± 0.04 <sup>ab</sup>	4.40 ± 0.06 <sup>a</sup>	4.36 ± 0.03 <sup>ab</sup>
18:1 <i>n</i> -(6+9)	26.10 ± 0.11 <sup>d</sup>	26.30 ± 0.04 <sup>cd</sup>	26.44 ± 0.04 <sup>bc</sup>	26.60 ± 0.02 <sup>ab</sup>	26.77 ± 0.11 <sup>a</sup>	26.79 ± 0.15 <sup>a</sup>
18:3 <i>n</i> -3	0.54 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.53 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.57 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.53 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.58 ± 0.01 <sup>a</sup>
20:5 <i>n</i> -3(EPA)	4.64 ± 0.05 <sup>b</sup>	4.63 ± 0.01 <sup>b</sup>	4.67 ± 0.01 <sup>ab</sup>	4.64 ± 0.03 <sup>b</sup>	4.72 ± 0.01 <sup>a</sup>	4.69 ± 0.01 <sup>ab</sup>
22:6 <i>n</i> -3(DHA)	12.35 ± 0.06 <sup>c</sup>	12.44 ± 0.02 <sup>b</sup>	12.53 ± 0.05 <sup>a</sup>	12.51 ± 0.02 <sup>ab</sup>	12.54 ± 0.01 <sup>a</sup>	12.50 ± 0.01 <sup>ab</sup>
$\Sigma$ SFA	38.68 ± 0.09 <sup>a</sup>	38.55 ± 0.13 <sup>a</sup>	38.26 ± 0.08 <sup>b</sup>	38.11 ± 0.13 <sup>bc</sup>	37.82 ± 0.13 <sup>d</sup>	37.93 ± 0.07 <sup>cd</sup>
$\Sigma$ MUFA	39.47 ± 0.02	39.47 ± 0.05	39.47 ± 0.13	39.60 ± 0.02	39.62 ± 0.04	39.60 ± 0.11
$\Sigma$ <i>n</i> -3 PUFA	18.80 ± 0.00 <sup>d</sup>	18.90 ± 0.00 <sup>d</sup>	19.10 ± 0.00 <sup>c</sup>	19.10 ± 0.00 <sup>c</sup>	19.35 ± 0.07 <sup>a</sup>	19.20 ± 0.00 <sup>b</sup>
$\Sigma$ <i>n</i> -3 HUFA	17.91 ± 0.00 <sup>d</sup>	17.97 ± 0.05 <sup>d</sup>	18.13 ± 0.03 <sup>bc</sup>	18.10 ± 0.00 <sup>c</sup>	18.27 ± 0.00 <sup>a</sup>	18.19 ± 0.04 <sup>b</sup>
SFA/USFA	0.65 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.64 ± 0.00 <sup>b</sup>	0.63 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.63 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.62 ± 0.00 <sup>ab</sup>	0.62 ± 0.00 <sup>a</sup>
<i>n</i> -3/ <i>n</i> -6	10.95 ± 0.35 <sup>a</sup>	10.40 ± 0.42 <sup>ab</sup>	9.95 ± 0.21 <sup>bc</sup>	9.60 ± 0.14 <sup>cd</sup>	9.30 ± 0.00 <sup>d</sup>	9.40 ± 0.00 <sup>cd</sup>
18:1 <i>n</i> / $\Sigma$ <i>n</i> -3HUFA	1.46 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.46 ± 0.00 <sup>ab</sup>	1.46 ± 0.00 <sup>ab</sup>	1.47 ± 0.00 <sup>ab</sup>	1.47 ± 0.00 <sup>ab</sup>	1.47 ± 0.01 <sup>a</sup>
DHA/EPA	2.66 ± 0.04	2.69 ± 0.00	2.68 ± 0.02	2.70 ± 0.02	2.66 ± 0.01	2.67 ± 0.00

表 6 不同 *n*-3 HUFA 水平饲料对黑鲷幼鱼背肌主要脂肪酸组成的影响  
Tab.6 Effect of dietary *n*-3 HUFA on muscle major fatty acid composition in *Sparus macrocephalus* % area

脂肪酸种类 fatty acids	<i>n</i> -3 HUFA(%)					
	0.79	0.83	0.85	0.88	0.92	0.94
16:0	30.83 ± 0.14 <sup>a</sup>	30.78 ± 0.01 <sup>ab</sup>	30.72 ± 0.06 <sup>bc</sup>	30.46 ± 0.04 <sup>d</sup>	30.55 ± 0.01 <sup>cd</sup>	30.59 ± 0.04 <sup>cd</sup>
18:0	4.22 ± 0.01 <sup>b</sup>	4.22 ± 0.02 <sup>b</sup>	4.21 ± 0.02 <sup>b</sup>	4.29 ± 0.04 <sup>ab</sup>	4.33 ± 0.05 <sup>a</sup>	4.28 ± 0.05 <sup>ab</sup>
18:1 <i>n</i> -(6+9)	25.13 ± 0.13	25.14 ± 0.01	25.18 ± 0.06	25.05 ± 0.06	25.23 ± 0.07	25.20 ± 0.08
18:3 <i>n</i> -3	0.48 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.50 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.50 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.52 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.50 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.48 ± 0.01 <sup>b</sup>
20:5 <i>n</i> -3(EPA)	5.08 ± 0.05	5.15 ± 0.02	5.13 ± 0.05	5.10 ± 0.01	5.14 ± 0.07	5.10 ± 0.03
22:6 <i>n</i> -3(DHA)	14.53 ± 0.05 <sup>b</sup>	14.56 ± 0.02 <sup>b</sup>	14.58 ± 0.04 <sup>b</sup>	14.69 ± 0.02 <sup>a</sup>	14.73 ± 0.00 <sup>a</sup>	14.69 ± 0.03 <sup>a</sup>
$\Sigma$ SFA	37.26 ± 0.14 <sup>a</sup>	37.11 ± 0.01 <sup>ab</sup>	37.03 ± 0.09 <sup>b</sup>	36.92 ± 0.01 <sup>b</sup>	36.95 ± 0.06 <sup>b</sup>	37.00 ± 0.06 <sup>b</sup>
$\Sigma$ MUFA	37.48 ± 0.04	37.48 ± 0.00	37.49 ± 0.00	37.31 ± 0.07	37.33 ± 0.17	37.43 ± 0.18
$\Sigma$ <i>n</i> -3 PUFA	21.78 ± 0.16 <sup>c</sup>	21.95 ± 0.01 <sup>bc</sup>	21.98 ± 0.15 <sup>bc</sup>	22.12 ± 0.01 <sup>ab</sup>	22.23 ± 0.05 <sup>a</sup>	22.12 ± 0.05 <sup>ab</sup>
$\Sigma$ <i>n</i> -3 HUFA	21.00 ± 0.13 <sup>c</sup>	21.15 ± 0.02 <sup>bc</sup>	21.15 ± 0.11 <sup>bc</sup>	21.29 ± 0.02 <sup>ab</sup>	21.40 ± 0.06 <sup>a</sup>	21.29 ± 0.02 <sup>ab</sup>
SFA/USFA	0.61 ± 0.00	0.60 ± 0.00	0.60 ± 0.00	0.60 ± 0.00	0.60 ± 0.00	0.60 ± 0.00
<i>n</i> -3/ <i>n</i> -6	11.00 ± 0.24	11.03 ± 0.01	11.02 ± 0.27	10.54 ± 0.36	10.63 ± 0.05	10.82 ± 0.24
18:1 <i>n</i> / $\Sigma$ <i>n</i> -3HUFA	1.20 ± 0.00 <sup>a</sup>	1.19 ± 0.00 <sup>abc</sup>	1.19 ± 0.00 <sup>ab</sup>	1.18 ± 0.00 <sup>d</sup>	1.18 ± 0.01 <sup>cd</sup>	1.18 ± 0.00 <sup>bcd</sup>
DHA/EPA	2.86 ± 0.02	2.83 ± 0.02	2.85 ± 0.02	2.88 ± 0.00	2.87 ± 0.04	2.88 ± 0.02

腹腔脂肪组织  $\Sigma$  SFA 及其主要成分 C16:0 含量均随饲料 *n*-3 HUFA 梯度增加显著减少( $P < 0.05$ ),但 18:0 含量则呈显著上升趋势; $\Sigma$  MUFA 及 C18:1*n*-(6+9) 含量均随饲料中 *n*-3 HUFA 水平升高显著增加( $P < 0.05$ ); $\Sigma$  *n*-3 PUFA 含量随饲料中 *n*-3 HUFA 水平升高呈上升趋势,并于 0.88% 组后无显著变化。其中 0.92% *n*-3 HUFA

组和 0.94% *n*-3 HUFA 组  $\Sigma$  *n*-3 含量显著高于其它各组,但二者无显著差异( $P > 0.05$ )。C18:3*n*-3 随饲料 *n*-3 HUFA 含量增加呈显著上升,并于 0.94% 组达到最高(0.80%);黑鲷幼鱼腹腔脂肪组织  $\Sigma$  *n*-3 HUFA 与饲料中 *n*-3 HUFA 水平呈正相关关系,且 0.94% 试验组含量显著高于 0.79% 组。试验饲料对黑鲷幼鱼腹腔脂肪组织中 EPA

含量无显著性影响( $P > 0.05$ ), 饲料中  $n-3$  HUFA 含量为 0.94% 时脂肪组织中 DHA 含量显著高于 0.79% 组, 其它各组间差异不显著。腹腔脂肪组织(IPF)中 SFA/USFA 随饲料中  $n-3$  HUFA 水平

升高呈显著降低(0.72% ~ 0.66%)。C18:1n/Σ  $n-3$  HUFA 和 DHA/EPA 不受试验处理的影响, 分别保持在 1.97 和 3.60 左右(表 7)。

表 7 不同  $n-3$  HUFA 水平饲料对黑鲟幼鱼腹腔脂肪组织(IPF)主要脂肪酸组成的影响  
Tab.7 Effect of dietary  $n-3$  HUFA on major fatty acid composition of IPF in *Sparus macrocephalus*

脂肪酸种类 fatty acids	$n-3$ HUFA(%)					
	0.79	0.83	0.85	0.88	0.92	0.94
16:0	32.49 ± 0.10 <sup>a</sup>	32.42 ± 0.01 <sup>a</sup>	31.89 ± 0.41 <sup>ab</sup>	31.29 ± 0.38 <sup>bc</sup>	30.90 ± 0.07 <sup>cd</sup>	30.36 ± 0.53 <sup>d</sup>
18:0	4.99 ± 0.04 <sup>ab</sup>	4.91 ± 0.02 <sup>b</sup>	4.91 ± 0.03 <sup>b</sup>	4.98 ± 0.07 <sup>ab</sup>	5.06 ± 0.09 <sup>a</sup>	5.10 ± 0.05 <sup>a</sup>
18:1n - (6 + 9)	22.24 ± 0.12 <sup>d</sup>	22.47 ± 0.02 <sup>cd</sup>	22.67 ± 0.05 <sup>bc</sup>	22.92 ± 0.13 <sup>ab</sup>	23.08 ± 0.10 <sup>a</sup>	22.94 ± 0.16 <sup>a</sup>
18:3n-3	0.63 ± 0.09 <sup>b</sup>	0.63 ± 0.05 <sup>b</sup>	0.68 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.70 ± 0.03 <sup>ab</sup>	0.72 ± 0.00 <sup>ab</sup>	0.80 ± 0.01 <sup>a</sup>
20:5n-3(EPA)	2.29 ± 0.04	2.32 ± 0.04	2.25 ± 0.13	2.37 ± 0.04	2.41 ± 0.07	2.38 ± 0.01
22:6n-3(DHA)	8.29 ± 0.05 <sup>b</sup>	8.30 ± 0.01 <sup>ab</sup>	8.38 ± 0.07 <sup>ab</sup>	8.36 ± 0.07 <sup>ab</sup>	8.42 ± 0.04 <sup>ab</sup>	8.62 ± 0.28 <sup>a</sup>
ΣSFA	39.15 ± 0.11 <sup>a</sup>	38.95 ± 0.04 <sup>a</sup>	38.49 ± 0.43 <sup>ab</sup>	37.95 ± 0.36 <sup>bc</sup>	37.73 ± 0.14 <sup>bc</sup>	37.27 ± 0.48 <sup>c</sup>
ΣMUFA	37.19 ± 0.05 <sup>c</sup>	37.34 ± 0.14 <sup>c</sup>	37.68 ± 0.30 <sup>bc</sup>	37.94 ± 0.21 <sup>ab</sup>	38.12 ± 0.21 <sup>ab</sup>	38.29 ± 0.25 <sup>a</sup>
Σ $n-3$ PUFA	12.66 ± 0.13 <sup>b</sup>	12.73 ± 0.13 <sup>b</sup>	12.84 ± 0.00 <sup>b</sup>	13.00 ± 0.09 <sup>ab</sup>	13.25 ± 0.11 <sup>a</sup>	13.37 ± 0.29 <sup>a</sup>
Σ $n-3$ HUFA	11.36 ± 0.01 <sup>c</sup>	11.41 ± 0.06 <sup>bc</sup>	11.44 ± 0.03 <sup>bc</sup>	11.60 ± 0.09 <sup>abc</sup>	11.73 ± 0.12 <sup>ab</sup>	11.89 ± 0.29 <sup>a</sup>
SFA/USFA	0.72 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.71 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.70 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.68 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.67 ± 0.00 <sup>c</sup>	0.66 ± 0.01 <sup>c</sup>
$n-3/n-6$	2.86 ± 0.08	2.85 ± 0.01	2.87 ± 0.00	2.85 ± 0.01	2.86 ± 0.07	2.89 ± 0.05
18:1n/Σ $n-3$ HUFA	1.96 ± 0.01	1.97 ± 0.01	1.98 ± 0.01	1.98 ± 0.00	1.97 ± 0.03	1.93 ± 0.06
DHA/EPA	3.62 ± 0.09	3.58 ± 0.07	3.73 ± 0.24	3.54 ± 0.02	3.49 ± 0.09	3.63 ± 0.13

2.4 饲料中  $n-3$  HUFA 含量对代谢关键酶活性及基因表达的影响

饲料中  $n-3$  HUFA 水平对黑鲟幼鱼脂肪代谢关键酶活性及基因表达的影响见图 2。肝脏 FAS 活性于饲料  $n-3$  HUFA > 0.88% 时有显著降低( $P < 0.05$ )。腹腔脂肪组织 HSL 活性随饲料  $n-3$  HUFA 水平的升高呈显著上升( $P < 0.05$ )。肝脏

FAS 基因表达水平随饲料中  $n-3$  HUFA 水平的增加呈先上升后下降, 转折点发生在 0.88% 组, 与 0.79% 组相比, 最大降低了 71%。腹腔脂肪组织 HSL 基因表达水平随饲料  $n-3$  HUFA 水平升高呈显著增加( $P < 0.05$ ), 与 0.79% 组相比增加了 68%。黑鲟幼鱼腹腔脂肪组织(IPF)中 FAS 活性极低, 难以测出。

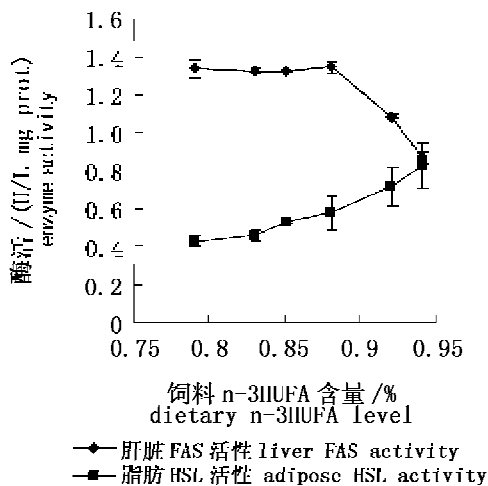


图 2 饲料  $n-3$  HUFA 水平对肝脏 FAS 及脂肪组织 HSL 活性的影响  
Fig.2 Effect of dietary  $n-3$  HUFA on activities of liver FAS and adipose HSL activities

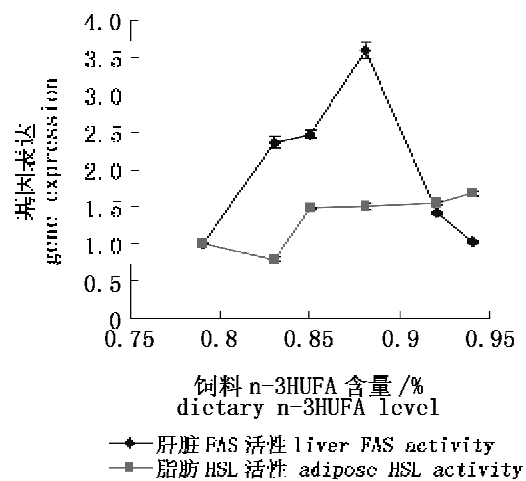


图 3 饲料  $n-3$  HUFA 水平对肝脏 FAS 及脂肪组织 HSL 活性的影响  
Fig.3 Effect of dietary  $n-3$  HUFA on liver FAS and adipose HSL gene expressions

### 3 讨论

#### 3.1 饲料中 *n-3* HUFA 对生长性能的影响

研究水产动物营养需要量通常使用的方法有折线法和二次曲线法<sup>[19]</sup>。Lee 等<sup>[20]</sup>研究发现,星斑川鲷(*Platichthys stellatus*)幼鱼增重率同饲料中 *n-3* HUFA 含量呈折线关系,随着饲料 *n-3* HUFA 含量的增加,增重率明显上升,当饲料中 *n-3* HUFA 含量高于 1.0% 时,组间差异不显著( $P > 0.05$ )。Kim 等<sup>[21]</sup>对牙鲆幼鱼的研究表明,牙鲆幼鱼增重率同饲料 *n-3* HUFA 含量呈二次曲线关系。本试验研究发现,黑鲷幼鱼增重率同饲料 *n-3* HUFA 含量之间呈明显的二次曲线关系。且本试验研究得到的黑鲷幼鱼对饲料 *n-3* HUFA 的适宜需要量在目前已报道的真鲷<sup>[22]</sup>,黄尾鲷<sup>[23]</sup>及大菱鲆<sup>[24-25]</sup>需要量(0.5% ~ 2.0%)范围之内,且与金头鲷<sup>[26]</sup>,岩鱼<sup>[27]</sup>及大菱鲆<sup>[28]</sup>的需要量(0.8% ~ 0.9%)相近,但低于轮虫饲喂期大菱鲆幼鱼的需要量(3.0% ~ 3.5%)<sup>[28]</sup>。

与 Ibeas 等<sup>[29]</sup>的研究结果一致,本试验未发现低水平 *n-3* HUFA 试验组黑鲷幼鱼有必需脂肪酸缺乏症状。在低水平时,补充 *n-3* HUFA 能促进黑鲷幼鱼的生长,但水平过高时,添加 *n-3* HUFA 则会对生长产生负作用,这种现象同 Stickney 等<sup>[30]</sup>, Takeuchi 等<sup>[31]</sup>, Satoh 等<sup>[32]</sup>, Lochman 等<sup>[33]</sup>, Furuita 等<sup>[34]</sup>的研究结果一致。究其原因,高水平 *n-3* HUFA 能抑制生长可能是组织中 EPA 和 DHA 的过量沉积破坏了生物膜结构中极性脂的平衡所致。与本试验结果相反, Lee 等在岩鱼<sup>[27]</sup>和星斑川鲷(*Sebastes schlegelii*)<sup>[30]</sup>的研究中并未发现过量 *n-3* HUFA 对生长的抑制作用。这种差异的具体机理目前还不清楚,可能与鱼体种类、饲料脂类的形式、脂肪氧化的条件及养殖环境有关。

#### 3.2 饲料中 *n-3* HUFA 对黑鲷体脂沉积的影响

饲料中 *n-3* HUFA 能显著降低试验鱼腹脂率(IPF ratio)及脂肪细胞直径,其降幅最大分别可至 98.2% 和 26.6%。由此推测,饲料中 *n-3* HUFA 对黑鲷幼鱼的降脂作用可能主要是通过抑制腹腔脂肪细胞体积的增大来实现的。对试验黑鲷幼鱼体成分的分析结果表明,饲料 *n-3* HUFA 能显著降低黑鲷幼鱼肌肉中的脂肪含量,最大降幅为 29.4%,但对全鱼组织中脂肪含量无显著影

响。这与 Om 等<sup>[36]</sup>对黑鲷的研究结果相似。

#### 3.3 饲料中 *n-3* HUFA 对脂肪酸组成的影响

对黑鲷幼鱼脂肪酸组成的研究显示,各组织中均含有较高水平的 C16:0 和 C18:1n-9,与对真鲷、灰鲮(*Mugil cephalus*)和金头鲷组织脂肪酸的分析结果类似<sup>[22, 29, 37]</sup>。该结果说明, C16:0 和 C18:1n-9 不仅是这些组织中的主要能量来源,而且更可能是可以选择性进入磷脂的首要非 PUFA。C18:1n-9 和 *n-3* HUFA 在调控 SFA/USFA 方面起着重要作用。Bell 等<sup>[38]</sup>研究发现,在脂肪酸的代谢转化中存在着三种途径,即 *n-3* (亚麻酸)、*n-6* (亚油酸)和 *n-9* (油酸)途径。*n-9* 系列脂肪酸含量的升高使各组织 SFA/USFA 保持恒定(约 0.6),但腹腔脂肪组织除外。随饲料 *n-3* HUFA 含量的增加,前三组腹腔脂肪组织 SFA/USFA 无显著差异,后三组有显著下降,证明第四组时饲料中 *n-3* HUFA 已满足黑鲷脂肪酸需要。饱和脂肪酸是体脂沉积的主要形式。表 4 ~ 表 7 中各组  $\Sigma$ SFA 均随饲料中 *n-3* HUFA 增加呈显著降低,从脂肪酸角度反应了饲料 *n-3* HUFA 对黑鲷幼鱼组织的降脂作用。比较各组织  $\Sigma$ *n-3* HUFA 可知,随饲料 *n-3* HUFA 含量的增加,组织中沉积的 *n-3* HUFA 也呈增加趋势,且沉积顺序为肌肉 > 肝脏 > 腹腔脂肪。不同组织 C18:1n/  $\Sigma$ *n-3* HUFA 顺序(肌肉 < 肝脏 < 腹腔脂肪)同样验证了 *n-3* HUFA 在黑鲷体内的沉积顺序。与以往研究不同,本试验中 C18:1n/  $\Sigma$ *n-3* HUFA 均大于 1,可能与试验鱼种类、体重及饲养条件有关。本试验中腹腔脂肪组织 DHA/EPA 高于饲料中的比值,表明 DHA 在腹腔组织中的沉积速度要优于 EPA,或与 EPA 向 DHA 的转化有关<sup>[39]</sup>。组织与饲料 DHA/EPA 的差异还可能是组织保留脂肪酸作为其基本组成成分的一种生化策略,在这种策略指引下,各组织分别对其初始 DHA/EPA 进行调整,以满足其各自的代谢与生理需要<sup>[29]</sup>。本研究结果显示,为满足黑鲷组织脂肪酸比值的需求,黑鲷幼鱼[(8.08 ± 0.09 g)]饲料中 DHA/EPA 至少应保持在 2.6 以上。

#### 3.4 饲料中 *n-3* HUFA 调控黑鲷幼鱼脂肪代谢机理探讨

在本试验中,饲料较高水平的 *n-3*HUFA (> 0.88%)对黑鲷幼鱼 FAS、HSL 活性及基因表达影响显著,低水平时则无显著影响,表明饲料 *n-3*

HUFA 对黑鲷 FAS 及 HSL 基因表达的调控具有浓度依赖性(dose-dependent),且该调控作用属于转录调控,这在 Huang 等<sup>[40]</sup>的研究中得到了证实。与高等陆生动物相似<sup>[41]</sup>,本试验研究结果显示,黑鲷 FAS 的活性及表达具有组织特异性。

饲料营养成分或添加剂对动物脂肪代谢的机理各异,总体分为对脂肪合成与脂肪分解两个过程的调控。Huang 等<sup>[40]</sup>认为甜菜碱通过抑制体内生脂酶活性的影响肥育猪的脂肪代谢。占秀安等<sup>[42]</sup>对肉鸡脂肪代谢的研究表明,L-肉碱通过改变肉鸡体内脂肪代谢相关酶(主要是脂肪分解酶)的活性,促进脂肪酸的氧化利用,而产生降低腹腔脂肪沉积的效果。Ibeas 等<sup>[43]</sup>的研究发现,随着饲料中 *n*-3 HUFA 水平的升高,金鲷幼鱼(11.5±0.2)g 肝脏脂肪沉积显著减少,这可能与饲料中 *n*-3 HUFA 对组织 FAS 的抑制作用有关<sup>[44-47]</sup>。本研究发现,*n*-3 HUFA 对黑鲷幼鱼的降脂作用主要是通过抑制黑鲷体内生脂酶(FAS)、提高脂肪分解酶(HSL)活性及基因表达来实现的,是对脂肪合成、分解两个过程同步调控的结果。

感谢王秀英、胡王龙、卓立应、聂月美等同学在试验指导及资料收集方面给予的支持和帮助,感谢浙江省海洋水产研究所及实验基地全体研究人员及同仁在试验设备及养殖管理方面给予的大力帮助。

#### 参考文献:

- [1] Sargent J, Henderson R J, Tocher D R. The lipids [C]// Halver J E, Ed. New York: Fish Nutrition, Academic Press, 1986: 154-218.
- [2] Parpoura A C R, Alexis M N. Effects of different dietary oils in sea bass (*Dicentrarchus labrax*) nutrition [J]. Aquac Int, 2001, 9: 463-476.
- [3] New M B. Aquaculture diets of postlarval marine fish of the super-family Percoidae, with special reference to sea basses, sea breams, groupers and yellowtail: a review [J]. Kuwait Bull Mar Sci, 1986, 7: 75-143.
- [4] Sargent J R, Bell J G, Henderson R J, et al. Origins and function of *n*-3 polyunsaturated fatty acids in marine organisms[M]// Ceve G, Palatauf F, Ed. Phospholipids; Characterization, Metabolism and Novel Biological Applications. American Oil Chemical Society Press, Champaign, IL, 1995:248-259.
- [5] Bell M V, Dick J R, Thrush M, et al. Decreased 20:4n-6/20:5n-3 ratio in sperm from cultured sea bass *Dicentrarchus labrax*, broodstock compared to wild fish[J]. Aquaculture, 1996, 144: 189-199.
- [6] Takeuchi T, Shiina Y, Watanabe T. Suitable levels of *n*-3 highly unsaturated fatty acids in diet for fingerlings of red sea bream [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1992, 58(3): 509-514.
- [7] van Ballaer E, Amat F, Hontoria F, et al. Preliminary results on the nutritional evaluation of omega 3-HUFA-enriched *Artemia nauplii* for larvae of the sea bass, *Dicentrarchus labrax* [J]. Aquaculture, 1989, 49: 223-229.
- [8] Izquierdo M S. Essential fatty acid requirement of cultured marine fish larvae [J]. Aquaculture Nutrition, 1996, 2: 183-191.
- [9] Kim K D, Lee S M. Requirement of dietary *n*-3 highly unsaturated fatty acids for juvenile flounder (*Paralichthys olivaceus*) [J]. Aquaculture, 2004, 229: 315-323.
- [10] Ibeas C, Izquierdo M S, Lorenzo A. Effect of different levels of *n*-3 highly unsaturated fatty acids on growth and fatty acid composition of juvenile gilthead seabream (*Sparus aurata*) [J]. Aquaculture, 1994, 127: 177-188.
- [11] Watanabe T, Takeuchi T, Arakawa T, et al. Requirement of juvenile striped jack *Longirostris delicatissimus* for *n*-3 highly unsaturated fatty acids [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1989, 55:1111-1117.
- [12] 刘兴旺,谭北平,麦康森,等. 饲料中不同水平 *n*-3 HUFA 对军曹鱼生长及脂肪酸组成的影响[J]. 水生生物学报,2007,31(2):190-195.
- [13] 王蕾蕾. 黑鲷幼鱼适宜蛋白需要量的研究[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2007:1-65.
- [14] 卓立应. 黑鲷幼鱼饲料中适宜蛋白能量比的研究[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2006:1-71.
- [15] 胡王龙. 饲料磷对黑鲷幼鱼生长和组织生化指标的影响[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2005.
- [16] 王秀英. 饲料维生素 C 对黑鲷仔鱼生长和体组织生化指标的影响[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文,2004:1-72.
- [17] Tian W X, Robert Y H, Wang Y S. Studies on the reactivity of the essential sulfhydryl groups as a conformational probe for the fatty acid synthetase of chicken liver [J]. The Journal of Biological



- Chemistry, 1985, 260 (20): 11375 -11387.
- [18] 金宗谦. 功能食品评价的原理和方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995: 107 -109.
- [18] 李爱杰. 水产动物营养与饲料科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 101 -105.
- [20] Lee S M, Lee J H, Kim K D. Effect of dietary essential fatty acids on growth, body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*) [J]. Aquaculture, 2003, 225, 269 -281.
- [21] Kim K D, Lee S M. Requirement of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids for juvenile flounder (*Paralichthys olivaceus*) [J]. Aquaculture, 2004, 229: 315 -323.
- [22] Takeuchi T, Toyota M, Satoh S, Watanabe. Requirement of juvenile red seabream *Pagrus major* for eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids[J]. Bull Jap Soc Sci Fish, 1990, 56: 1263 -1269.
- [23] Deshimaru O, Kuroki K, Yone Y. Suitable levels of lipids and rusodesoxycholic acid in diet for yellowtail[J]. Bull Jap Soc Sci Fish, 1982, 48: 1265 -1270.
- [24] Gatesoupe F J, Leger C, Boudon M, et al. Lipid feeding of turbot (*Scophthalmus maximus* L.): 2. Influence on growth of supplementation with methyl esters of linolenic acid and fatty acids of  $\omega$ 9 series [J]. Ann Hydrobiol, 1977, 8: 247 -254.
- [25] Leger C, Gatesoupe F J, Metailler R, et al. Effect of dietary fatty acids differing by chain lengths and  $\omega$  series on the growth and lipid composition of turbot *Scophthalmus maximus* L [J]. Comp Biochem Physiol, 1979, 64: 345 -350.
- [26] Kalogeropoulos N, Alexis M N, Henderson J J. Effect of dietary soybean and cod-liver oil levels on growth and body composition of gilthead bream (*Sparus aurata*) [J]. Aquaculture, 104: 293 -308.
- [27] Lee S M. Review of the lipid and essential fatty acid requirements of rockfish (*Sebastes schlegeli*) [J]. Aquac Res, 2001, 32(Suppl 1): 8 -17.
- [28] Furuita H, Konishi K, Takeuchi T. Effect of different levels of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid in *Artemia nauplii* on growth, survival and salinity tolerance of larvae of the Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* [J]. Aquaculture, 1999, 170: 59 -69.
- [29] Ibeas C, Cejas J, Gómez T, et al. Influence of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids levels on juvenile gilthead seabream (*Sparus aurata*) growth and tissue fatty acid composition [J]. Aquaculture, 1996, 142: 221 -235.
- [30] Stickney R R, Andrew J W. Effect of dietary lipids on growth, food conversion, lipid and fatty acid composition of channel catfish [J]. Journal of Nutrition, 1972, 102: 249 -258.
- [31] Takeuchi T, Watanabe T. Effect of excess amounts of essential fatty acids on growth of rainbow trout [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1979, 45: 1517 -1519.
- [32] Satoh S, Poe W E, Wilson R P. Effect of dietary n-3 fatty acids on weight gain and liver polar lipid fatty acid composition of fingerlings channel catfish [J]. Journal of Nutrition, 1989, 119: 23 -28.
- [33] Lochman R T, Gatlin D M. Essential fatty acid requirement of juvenile red drum (*Sciaenops ocellatus*) [J]. Fish Physiol Biochem, 1993, 12: 221 -235.
- [34] Furuita H, Tanaka H, Yamamoto T, et al. Effects of high levels of n-3 HUFA in broodstock diet on egg quality and egg fatty acid composition of Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus* [J]. Aquaculture, 2002, 201: 323 -333.
- [35] Lee S M. Review of the lipid and essential fatty acid requirements of rockfish (*Sebastes schlegeli*) [J]. Aquaculture Research, 2001, 32 (S-1): 8 -17.
- [36] Om A D, Nakaqawa H. Effect of dietary EPA and DHA fortification on lipolysis activity and physiological function in juvenile black sea bream *Acanthopagrus schlegeli* (Bleeker) [J]. Aquaculture Research, 2001, 32: 255 -262.
- [37] Argyropoulon V, Kalogeropoulos N, Alexis M. Effect of dietary lipids on growth and tissue fatty acid composition of grey mullet (*Mugil cephalus*) [J]. Comp Biochem and Physiol, 1992, 101: 129 -135.
- [38] Bell M V, Henderson R J, and Sargent J R. The role of polyunsaturated fatty acids in fish [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 1986, 4: 711 -719.
- [39] Izquierdo M S. Essential fatty acid requirements in Mediterranean finfish species [J]. Cah Options Mediterr, 2005, 63: 91 -102.
- [40] Huang Q C, Xu Z R, Han X Y, et al. Effect of dietary betaine supplementation on lipogenic enzyme activities and fatty acid synthase mRNA expression in finishing pigs [J]. Animal Feed Science and

- Technology, 2000, 140: 365-375.
- [41] Raclot T, Groscolas R, Langin D, *et al.* Site-specific regulation of gene expression by *n*-3 polyunsaturated fatty acids in rat white adipose tissues [J]. *Journal of Lipid Research*, 1997, 38: 1963-1971.
- [42] 占秀安,许梓荣. L-肉碱对肉鸡腹脂沉积的影响及作用机理探讨[J]. *中国粮油学报*, 2004, 19(5): 75-78.
- [43] Ibeas C, Cejas J, Gómez T, *et al.* Influence of dietary *n*-3 highly unsaturated fatty acids levels on juvenile gilthead seabream (*Sparus aurata*) growth and tissue fatty acid composition [J]. *Aquaculture*, 1996, 142: 221-235.
- [44] Clarke S D, Abraham S. Gene expression: nutrient control of pre-and post-transcriptional events [J]. *FASEB J*, 1992, 6: 3146-3152.
- [45] Clarke S D. Regulation of fatty acid synthase gene expression: an approach for reducing fat accumulation [J]. *Journal of Animal Science*, 1993, 71: 1957-1966.
- [46] Alvarez M J, Diez A, Lopez-Bote C, *et al.* Short-term modulation of lipogenesis by macronutrients in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) hepatocytes [J]. *British Journal of Nutrition*, 2000, 84: 619-628.
- [47] Dias J, Alvarez M J, Diez A, *et al.* Regulation of hepatic lipogenesis by dietary protein/energy in juvenile European seabass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. *Aquaculture*, 1998, 161: 169-186.

---

### 《水产学报》调整审稿费收取方式的通知

为了进一步提高刊物的服务水平,吸引水产科学领域优秀科研成果,本刊从2009年5月起,调整审稿费收取方式,不录用稿件将一律免收审稿费。

## Effects of dietary *n*-3 HUFA on growth performance and lipid metabolism in juvenile black sea bream, *Sparus macrocephalus*

MA Jing-jing<sup>1,2</sup>, SHAO Qing-jun<sup>1</sup>, XU Zi-rong<sup>1</sup>, ZHOU Fan<sup>1</sup>,  
ZHONG Guan-yun<sup>1</sup>, SONG Wen-xin<sup>1</sup>, Owari Ngandali Bergo<sup>1</sup>

(1. College of Animal Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China;  
2. Marine Fisheries Research Institute of Shandong Province, Yantai 264006, China)

**Abstract:** Six diets containing graded levels (0.79, 0.83, 0.85, 0.88, 0.92 and 0.94%) of *n*-3 highly unsaturated fatty acids (*n*-3 HUFA) with a constant DHA/EPA, were fed randomly to six groups (Diet 1 – 6) of fish with triplicate [average weight, (8.08 ± 0.09) g; 20 fish/replicate] to determine the effects of dietary *n*-3 HUFA on growth and lipid metabolism in juvenile black sea bream (*Sparus macrocephalus*). Results of the 8-week growth trial showed that: (1) Hepatosomatic index (HSI) and intraperitoneal fat (IPF) ratio of juvenile black sea bream decreased with the increase of dietary *n*-3 HUFA and the values in Diet 5 and 6 were significantly lower than those in other four groups ( $P < 0.05$ ). Adipocyte diameter in IPF was decreased by dietary *n*-3 HUFA and the significance occurred between Diet 3 and 6. Lipid content in muscle was significantly affected by dietary *n*-3 HUFA and reached the bottom in Diet 4. No significance was found in whole body proximate composition of juvenile black sea bream. Concerning the fatty acid composition,  $\sum$ SFA and the main constituent, C16:0 were negatively correlated with dietary *n*-3 HUFA, while  $\sum$ *n*-3 HUFA content was obviously increased among all the treatments. DHA to EPA ratios (DHA/EPA) in liver, dorsal muscle and IPF were unchanged with the supplementation of dietary *n*-3 HUFA. Quadratic analysis based on weight gain rate (WGR) indicated that dietary *n*-3 HUFA requirement for black sea bream was 0.87% DM. (2) Determination of fatty acid synthase (FAS) and hormone-sensitive lipase (HSL) activities showed that FAS activity kept constant in Diet 1 to 4, and then decreased significantly with further increment of dietary *n*-3 HUFA. HSL activity in IPF increased significantly with the elevation of dietary *n*-3 HUFA level and increased to almost two times in Diet 6 (0.94% *n*-3HUFA). Gene expression of FAS changed following the similar trend with FAS activity in liver; while expression of HSL in IPF was positively correlated with dietary *n*-3 HUFA level. In summary, we can deduce that *n*-3 HUFA regulation in lipid metabolism was realized by affecting the lipogenesis and lipolysis at the same time.

**Key words:** *Sparus macrocephalus*; *n*-3 highly unsaturated fatty acids (*n*-3 HUFA); growth performance; lipid metabolism; FAS; HSL