

## 饲料中 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼生长、 体组成及血清生理指标的影响

马晶晶<sup>1</sup>, 王际英<sup>1</sup>, 孙建珍<sup>1,2</sup>, 郝甜甜<sup>1,2</sup>, 张德瑞<sup>3</sup>, 张利民<sup>1\*</sup>

(1. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东省海洋生态修复重点实验室, 山东 烟台 264006;

2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

3. 山东升索渔用饲料研究中心, 山东 烟台 265500)

**摘要:** 为研究饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼生长、体组成和血液生理指标的影响, 实验配制等氮、等能的 5 种不同 DHA/EPA 值(0.64、0.97、1.18、1.59 和 1.91)的饲料, 每个比值设 3 个重复, 饲养周期 56 d。结果显示:(1) 随着饲料 DHA/EPA 值的升高, 星斑川鲷幼鱼增重率(WGR)、饲料效率(FE)、蛋白质效率(PER)均呈先上升后下降的趋势( $P < 0.05$ )。当饲料 DHA/EPA 值为 0.97~1.59 时实验鱼增重最快, 饲料效率最高。蛋白质效率则在 DHA/EPA 值为 0.97~1.18 时达到最高。蛋白质沉积率(protein retention efficiency, PRE)与饲料 DHA/EPA 值呈显著二次回归关系( $y = -1.5895x^2 + 2.8583x + 45.184; R^2 = 0.9108, x =$  饲料 DHA/EPA 值,  $y =$  PRE), 当饲料 DHA/EPA 值大于 0.90 时呈下降趋势。肝体比(HSI)呈先下降后小幅回升的趋势( $P < 0.05$ ), 在饲料 DHA/EPA 值为 1.18 时达到最低, 为 2.85%, 脾脏指数(SSI)呈显著上升趋势( $P < 0.05$ ), 于饲料 DHA/EPA 值为 1.59 组最高(0.12%); (2) 肝脏粗脂肪含量随饲料 DHA/EPA 值的增加呈明显下降趋势( $P < 0.05$ ), 且在饲料 DHA/EPA 值为 1.18 时降到最低, 为 8.60%, 而后再显著上升, 但仍显著低于饲料 DHA/EPA 值为 0.64 时的水平(13.44%)。二次回归分析( $y = 5.1996x^2 - 15.652x + 20.866; R^2 = 0.6348, x =$  饲料 DHA/EPA 值,  $y =$  肝脏脂肪含量)显示, 当饲料中 DHA/EPA 值为 1.51 时肝脏脂肪含量最低。脂肪酸分析结果显示, 随着饲料 DHA/EPA 值的升高, 肝脏及肌肉中 EPA 含量均呈线性下降趋势( $P < 0.05$ ), 而 DHA 含量及 DHA/EPA 均呈直线上升趋势( $P < 0.05$ )。肝脏和肌肉组织 n-3 HUFA 总量不受饲料处理的影响( $P > 0.05$ ); (3) 血清总蛋白、球蛋白含量在饲料 DHA/EPA 值为 1.59 时显著高于其他各组( $P < 0.05$ ), 白蛋白在饲料 DHA/EPA 值为 0.64、0.97 和 1.59 水平最高。溶菌酶(LSZ)活性在饲料 DHA/EPA 值为 1.18 时达到峰值( $P < 0.05$ ), 为 2.76  $\mu\text{g/mL}$ 。谷丙转氨酶(ALT)活性在饲料 DHA/EPA 值  $< 1.91$  时无显著变化, 而当饲料 DHA/EPA 值  $> 1.18$  时, 血清谷草转氨酶(AST)活性提高了 65% 左右。研究表明, 在本实验条件下, 以增重率为参考指标, 采用二次回归( $y = -31.066x^2 + 77.26x + 76.541; R^2 = 0.9574, x =$  饲料 DHA/EPA 值,  $y =$  增重率)分析可得, 当饲料脂肪水平为 8.3% DM, n-3 HUFA 含量为 0.74% DM 时, 星斑川鲷幼鱼[初始体质量(31.70  $\pm$  0.12)g]对 DHA/EPA 值的最适需要量应为 1.24。

**关键词:** 星斑川鲷; DHA/EPA; 生长性能; 脂肪酸组成; 血清生理指标

**中图分类号:** S 963

**文献标志码:** A

收稿日期: 2013-10-16 修回日期: 2013-11-28

资助项目: 山东省优秀中青年科学家奖励基金(BS2010SW025 和 BS2013HZ018); 山东省水生动物营养与饲料泰山学者岗位(HYK201004); 国家海洋公益性行业专项(201205025); 海洋生物产业水生动物营养与饲料研发创新示范平台资金(201301002); 国家自然科学基金青年科学基金(31201973)

通信作者: 张利民, E-mail: zhanglimin@126.com

近几十年来,世界水产养殖产量增长势头迅猛,2004 到 2006 年间平均年增长率达 6.1%<sup>[1]</sup>,鱼粉已成为制约水产养殖业发展的关键因素<sup>[2]</sup>。随着世界鱼粉资源的枯竭与鱼粉价格的飙升,研究植物蛋白源或脂肪源替代鱼粉及鱼油已成为保障水产养殖业持续健康发展的重要举措<sup>[3]</sup>。然而,植物脂肪源或蛋白源均缺乏海水鱼类正常生长所需要的 n-3 高不饱和脂肪酸(n-3 HUFA),尤其是 EPA 和 DHA<sup>[4]</sup>。研究发现,海水鱼生物膜磷脂中 DHA 和 EPA 存在一定的比例关系,比例失调(尤其 DHA/EPA 值过低)会对其神经系统产生负面影响,导致海水鱼应激能力下降、死亡率升高<sup>[5]</sup>。因此,海水鱼饲料不但要考虑 DHA 和 EPA 的含量,还要充分考虑二者的适宜比例。

星斑川鲷(*Platichthys stellatus*, Pallas 1788)是一种经济价值较高的冷温性鱼类,具有生长速度快、广温、广盐、出肉率高等优点,是继牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)之后最有潜力的养殖海水鱼类之一。Lee 等<sup>[6]</sup>研究了星斑川鲷幼鱼必需脂肪酸的总需求量,尚未见有对其 DHA/EPA 值需要量的研究。目前有关海水鱼类 DHA/EPA 值适宜添加量的研究多见于仔稚鱼活饵料(轮虫和卤虫)中。Rodríguez 等<sup>[7]</sup>研究发现,DHA/EPA 值为 1.5 的轮虫投喂组金头鲷(*Sparus aurata*)仔稚鱼生长速度高于 DHA/EPA 值为 0.6 的轮虫投喂组。对虱目鱼(*Chanos chanos*)仔鱼的研究发现,投喂 DHA/EPA 值高于 1 的轮虫或卤虫可保证其正常生长及较高的存活率<sup>[8]</sup>。Copeman 等<sup>[5]</sup>发现,降低轮虫中 DHA/EPA 值会对美洲黄盖鲷(*Limanda ferruginea*)仔稚鱼神经功能产生负面效应,进而影响其生长及存活。然而,目前有关海水鱼幼鱼配合饲料中 DHA/EPA 适宜添加量的报道仍较少。鉴于此,本实验以星斑川鲷幼鱼为研究对象,探讨饲料 DHA/EPA 值对其生长、体组成及血清生理指标的影响,以期对星斑川鲷幼鱼配合饲料的研究及生产实践提供科学参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验饲料的配制

在满足星斑川鲷幼鱼各营养素需求前提下,以白鱼粉和酪蛋白为蛋白源,采用精制鱼油 EPA<sub>48</sub>、DHA<sub>66</sub>(表 2)和大豆油调节饲料 n-3

HUFA 含量为 0.74% DM, DHA/EPA 值分别为 0.64、0.97、1.18、1.59 和 1.91 的 5 种等氮等能的实验饲料,分别命名为 R<sub>0.64</sub>、R<sub>0.97</sub>、R<sub>1.18</sub>、R<sub>1.59</sub> 和 R<sub>1.91</sub>。所有原料分析营养成分后,粉碎过 80 目筛,按配比称量后混匀,经螺旋挤压机加工成 2.5 mm × 3 mm 的颗粒,室温晾干,于 -20 °C 冰箱中保存、备用。实验饲料配方及营养组成分别见表 1 和表 2。

### 1.2 实验鱼的养殖

养殖实验在山东海洋资源与环境研究院全封闭水循环系统进行。实验用星斑川鲷由威海某养殖场提供,为当年人工繁殖的同一批鱼苗,初始体质量为(31.70 ± 0.12) g。正式实验前,星斑川鲷在养殖系统中适应 2 周。然后随机分成 5 组,每组设 3 个重复,每个重复 20 尾鱼,分别放养于高 70 cm、直径为 80 cm 的圆形养殖桶中,控制水深 40 cm 左右。微流水养殖(0.4 L/min),保证溶氧 > 5 mg/L,氨氮、亚硝酸氮均 < 0.1 mg/L,水温(19 ± 0.5) °C, pH 7.8 ~ 8.6,盐度 28 ~ 30 g/L。每天饱食投喂两次(08:00 和 16:00)。饲料投喂 30 min 后,从系统自带的排水口将残饵排出,数颗粒,计算残饵量。实验周期为 56 d。

### 1.3 样品采集与测定

实验分组前随机取 10 尾星斑川鲷幼鱼用于初始含量分析。实验结束前停食 24 h,所有实验鱼经 MS 222(60 mg/kg)麻醉后称重并量体长。从每个养殖桶中随机取 3 尾实验鱼用作全鱼样品的采集,剩余 17 尾实验鱼用于血清、肝脏及背肌样品的采集,血清样品直接混匀,背肌及肝脏组织则采用 DS-1 型组织捣碎匀浆机捣碎后混匀,所有样品均于 -80 °C 保存备用。计算增重率(weight gain rate, WGR)、饲料效率(feed efficiency, FE)、蛋白质效率(protein efficiency ratio, PER)、蛋白质沉积率(protein retention efficiency, PRE)摄食率(daily feed intake, DFI)、肝体比(hepatosomatic index, HSI)、脏体比(visceral index, VSI)、肥满度(condition factor, CF)和脾脏指数(spleensomatic index, SSI)等指标,计算公式如下:

$$\text{增重率 (WGR, \%)} = 100 \times (\text{终末体质量} - \text{初始体质量}) / \text{初始体质量}$$

$$\text{饲料效率 (FE, \%)} = 100 \times \text{增重} / \text{饲料消耗量}$$

$$\text{蛋白质效率 (PER)} = \text{增重} / (\text{摄食量} \times \text{饲料粗蛋白含量 \%})$$

蛋白质沉积率(PRE,%) = 100 × 体组织粗蛋白沉积量 / (摄食量 × 饲料粗蛋白含量%)

摄食率(DFI,%/d) = 100 × 摄食量 / [(初始体质量 + 终末体质量) / 2 × 56]

肝体比(HSI,%) = 100 × 肝脏质量 / 鱼体质量

脏体比(VSI,%) = 100 × 内脏质量 / 鱼体质量

饱满度(CF,g/cm<sup>3</sup>) = 100 × 体质量 / (体长)<sup>3</sup>

脾脏指数(SSI,%) = 100 × 脾脏质量 / 鱼体质量

饲料及组织样品水分测定采用恒温干燥法

(105℃),粗蛋白测定采用杜马斯(LECO,FP-528)燃烧定氮法,粗脂肪测定采用索氏抽提法,粗灰分测定采用马弗炉灼烧法(550℃)。血清谷丙转氨酶(alanine aminotransferase,ALT)、谷草转氨酶(aspartate aminotransferase,AST)、总蛋白(total protein,TP)、白蛋白(albumin,ALB)均采用全自动生化分析仪(7020,日本日立)进行测定,所用试剂盒由北京利德曼生化技术有限公司提供。球蛋白(globulin,GLB)含量为血清总蛋白与白蛋白之差,血清溶菌酶(lysozyme,LSZ)活性采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定。

表1 实验饲料配方及营养成分分析  
Tab.1 Formulation and nutrient composition of the experimental diets

原料(g/100 g) ingredients	组别 groups				
	R <sub>0.64</sub>	R <sub>0.97</sub>	R <sub>1.18</sub>	R <sub>1.59</sub>	R <sub>1.91</sub>
白鱼粉 <sup>1</sup> white fishmeal	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
酪蛋白 casein	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
糊精 dextrin	24.50	24.50	24.50	24.50	24.50
鱼油 DHA <sub>66</sub> <sup>2</sup> fish oil DHA <sub>66</sub>	0.00	0.40	0.64	0.84	1.00
鱼油 EPA <sub>48</sub> <sup>3</sup> fish oil EPA <sub>48</sub>	1.09	0.65	0.40	0.18	0.00
大豆油 soybean oil	7.91	7.95	7.96	7.98	8.00
矿物质 <sup>4</sup> mineral premix	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
维生素 <sup>5</sup> vitamin premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
羧甲基纤维素钠 CMC	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
氯化胆碱 choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
总计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>营养成分/% DM</b>					
粗蛋白 crude protein	53.36	53.58	53.46	53.73	53.40
粗脂肪 crude lipid	8.32	8.42	8.59	8.26	8.05
粗灰分 crude ash	5.83	5.77	5.90	6.05	6.08
DHA/EPA 值 DHA/EPA ratio	0.64	0.97	1.18	1.59	1.91
n-3 HUFA%	0.74	0.75	0.77	0.71	0.70
能量/(kJ/g) gross energy	19.83	19.91	19.69	19.75	19.62

注:1. 白鱼粉常规组成:蛋白71.4%,脂肪8%,脂肪酸组成见表2。2,3. 精制鱼油,购自河北海源康健生物技术有限公司,脂肪酸组成见表2。4. 矿物质预混料(mg/kg 饲料):MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,3568.0 mg;NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O,25568.0 mg;KCl,3020.5 mg;KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,8.3 mg;CoCl<sub>2</sub>,28.0 mg;ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,353.0 mg;Ca-lactate,15968.0 mg;CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O,9.0 mg;KI,7.0 mg;MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O,63.1 mg;Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>,1.5 mg;C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>Fe·5H<sub>2</sub>O,1533.0 mg;NaCl,100.0 mg;NaF,4.0 mg。5. 维生素预混料(mg/kg 饲料):维生素A,38.0 mg;维生素D<sub>3</sub>,13.2 mg;α-生育酚,210.0 mg;硫胺素,115.0 mg;核黄素,380.0 mg;盐酸吡哆醇,88.0 mg;泛酸,368.0 mg;烟酸,1030.0 mg;生物素,10.0 mg;叶酸,20.0 mg;维生素B<sub>12</sub>,1.3 mg;肌醇4000.0 mg;抗坏血酸,500.0 mg

Notes:1. White fishmeal:71.4% protein,8% lipid;2,3. EPA or DHA enriched fish oil;purchased from HEBEI HAIYUAN Health Biological Science and Technology Co.,Ltd.,China. Their fatty acid compositions are shown in Tab.2.4. Mineral mixture(mg/kg diet):MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,3568.0;NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O,25568.0;KCl,3020.5;KAl(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,8.3;CoCl<sub>2</sub>,28.0;ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O,353.0;Ca-lactate,15968.0;CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O,9.0;KI,7.0;MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O,63.1;Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>,1.5;C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>Fe·5H<sub>2</sub>O,1533.0 NaCl,100.0;NaF,4.0.5. Vitamin mixture(mg/kg diet):retinol acetate,38.0;cholecalciferol,13.2;alpha-tocopherol,210.0;thiamin,115.0;riboflavin,380.0;pyridoxine HCl,88.0;pantothenic acid,368.0;niacin acid,1030.0;biotin,10.0;folic acid,20.0;vitamin B<sub>12</sub>,1.3;inositol,4000.0;ascorbic acid,500.0

表 2 鱼油、鱼粉及实验饲料脂肪酸组成(总脂肪酸)  
 Tab.2 Fatty acid composition of fish oil, fishmeal and experimental diets( total fatty acids) %

脂肪酸 fatty acids	鱼油 EPA <sub>48</sub> fish oil EPA <sub>48</sub>	鱼油 DHA <sub>66</sub> fish oil DHA <sub>66</sub>	白鱼粉 white fishmeal	R <sub>0.64</sub>	R <sub>0.97</sub>	R <sub>1.18</sub>	R <sub>1.59</sub>	R <sub>1.91</sub>
C14:0			5.26	0.93	0.90	0.90	0.82	0.86
C15:0			0.76	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11
C16:0	0.18		22.66	13.26	13.09	13.49	12.59	12.74
C17:0			0.64	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12
C18:0	0.55	0.12	3.87	4.73	4.66	4.84	4.65	4.7
C20:0	0.33	0.22	0.53	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26
C22:0		0.35	0.17	0.28	0.28	0.28	0.30	0.30
C16:1n-7	0.29		4.86	0.80	0.78	0.76	0.72	0.74
C18:1n-9	4.15	0.30	10.58	21.12	21.26	21.27	21.34	21.42
C18:1n-7	1.39		2.82	0.4	0.39	0.4	0.37	0.39
C20:1n-7	3.21	1.08	1.72	0.79	0.74	0.71	0.66	0.61
C22:1n-9	1.29	3.37	2	0.31	0.28	0.26	0.24	0.25
C18:2n-6	0.96	0.15	1.82	38.45	39.01	38.8	39.61	39.25
C18:3n-6	0.19			0.21	0.20	0.20	0.20	0.20
C20:3n-6	0.37	0.21	0.72	0.20	tr	tr	tr	tr
ARA	2.38	1.24	1.07	0.42	0.45	0.49	0.47	0.51
C18:3n-3	0.89	0.14	1.43	3.57	3.60	3.60	3.67	3.63
C20:2n-9	2.52		2.33	0.25	0.21	0.18	0.14	0.12
C20:3n-3	0.26	0.15	0.11	0.13	tr	tr	tr	tr
EPA	47.94	12.17	8.97	5.22	4.39	3.95	3.18	2.89
DPA	2.27	5.84	0.77	0.29	0.32	0.35	0.36	0.32
DHA	23.98	65.93	19.7	3.33	4.25	4.66	5.05	5.51
Σ SFA	1.06	0.69	33.89	19.68	19.42	20.01	18.84	19.09
Σ MUFA	10.33	4.75	21.98	23.43	23.45	23.39	23.34	23.41
Σ n-6 PUFA	3.9	1.60	3.61	39.47	39.8	39.68	40.44	40.11
Σ n-3 PUFA	75.34	84.23	30.98	12.54	12.56	12.56	12.26	12.35
n-3 HUFA	74.45	84.09	29.55	8.97	8.96	8.96	8.59	8.72
DHA/EPA	0.50	5.42	2.20	0.64	0.97	1.18	1.59	1.91

注:表格中“tr”表示脂肪酸含量低于 0.1%,以下各表同

Notes: data noted with “tr” means the fatty acid contents were lower than 0.1% total fatty acids, the same as the following

脂肪酸分析中油脂提取参照 Folch 等<sup>[9]</sup>的方法。脂肪酸测定参照 Metcalfe 等<sup>[10]</sup>的方法并略作改进:称取 100 mg 左右的样品于 50 mL 带盖消化管中,加 2 mL 正己烷,3 mL 甲酰氯,轻微振荡,70 ℃水浴甲酯化 2 h,冷却至室温,然后加入 6% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 5 mL,正己烷 2 mL,充分振荡,取上液即为甲酯化的脂肪酸,采用气相色谱仪(GC-2010,日本岛津)火焰离子化检测器(FID)检测。色谱条件为:进样口温度 260 ℃,载气纯度为 99.99% 高纯氮,色谱柱规格 100 m × 0.25 mm × 0.20 μm(SP-2560, Supelco, Bellefonte, PA, 美国),柱流速 1.8 mL/min,柱前压 357.4 kPa,柱起始温度 140 ℃,保持 5 min,以 4 ℃/min 升至 240 ℃,保

持 10 min。分流进样 1 μL,分流比 90:1。FID 温度 260 ℃。采用 Supelco 37 种脂肪酸甲酯混标(Supelco, Bellefonte, PA, 美国)识别样品脂肪酸,采用面积归一法计算脂肪酸相对百分含量。

#### 1.4 数据统计与分析

采用 EXCEL 2000 和 SPSS 11.5 进行统计,数据采用平均值 ± 标准差(mean ± SD)的形式表示,显著水平为 0.05。对于差异显著组采用 Duncan's 多重比较分析组间的差异显著程度。对实验数据进行 Levene's 方差齐性检验,若方差不齐,则反正弦或平方根反正弦变化后再统计。采用二次回归( $y = ax^2 + bx + c$ )拟合星斑川鲷幼鱼增重率(WGR, y)同饲料中 DHA/EPA 值(x)的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼生长及饲料利用效果的影响

在整个养殖实验期间,各实验组未出现死鱼现象,存活率均为100%(表3)。实验鱼初始平均体质量为(31.70 ± 0.12)g,各处理间无显著差异( $P > 0.05$ ),终末体质量(FBW)仅在 R<sub>1.91</sub>组有显著降低( $P < 0.05$ )。当饲料 DHA/EPA 值在 0.97 ~ 1.59 之间时,增重率(WGR)稳定在 122.71% 左右,分别比 R<sub>0.64</sub>和 R<sub>1.91</sub>组提高了 7.92% 和 11.57%。摄食率(DFI)在 R<sub>1.18</sub>和 R<sub>1.59</sub>

组最高,其他各组间无显著差异( $P > 0.05$ )(表3)。二次回归分析( $y = -31.066x^2 + 77.26x + 76.541$ ;  $R^2 = 0.9574$ ,  $x =$  饲料 DHA/EPA 值,  $y =$  WGR; 图1)显示,当饲料 DHA/EPA 值为 1.24 时,星斑川鲷幼鱼生长性能达到最佳。各实验组饲料效率(FE)与 WGR 变化趋势一致。蛋白质效率(PER)在 R<sub>0.97</sub>和 R<sub>1.18</sub>组达到最高,PRE 在各组间无显著性差异( $P > 0.05$ ),但与饲料 DHA/EPA 值存在明显二次回归关系( $y = -1.5895x^2 + 2.8583x + 45.184$ ;  $R^2 = 0.9108$ ,  $x =$  饲料 DHA/EPA 值,  $y =$  PRE; 图2),表明当饲料 DHA/EPA 值为 0.90 时,实验鱼 PRE 最高。在各形体指

表3 各实验组星斑川鲷幼鱼生长、饲料利用及形体指标分析  
Tab.3 Mean growth, feed utilization and morphometric index of *P. stellatus* fed with diets containing different DHA/EPA ratios

	组别 groups				
	R <sub>0.64</sub>	R <sub>0.97</sub>	R <sub>1.18</sub>	R <sub>1.59</sub>	R <sub>1.91</sub>
<b>生长指标 growth performance</b>					
初始体质量/g IBW	31.61 ± 0.10	31.74 ± 0.13	31.69 ± 0.93	31.65 ± 0.10	31.77 ± 0.19
终末体质量/g FBW	67.65 ± 0.85 <sup>ab</sup>	70.46 ± 2.07 <sup>a</sup>	69.95 ± 1.95 <sup>ab</sup>	70.58 ± 1.37 <sup>a</sup>	66.56 ± 0.09 <sup>b</sup>
增重率/% WGR	113.70 ± 2.17 <sup>b</sup>	122.03 ± 3.05 <sup>a</sup>	123.12 ± 1.41 <sup>a</sup>	122.98 ± 1.20 <sup>a</sup>	109.98 ± 1.01 <sup>b</sup>
摄食率/%/d DFI	1.03 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.03 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.08 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.09 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.02 ± 0.03 <sup>b</sup>
<b>饲料利用指标 feed utilization</b>					
饲料效率/% FE	125.84 ± 1.92 <sup>b</sup>	134.51 ± 0.55 <sup>a</sup>	133.60 ± 2.51 <sup>a</sup>	130.53 ± 1.01 <sup>ab</sup>	127.69 ± 3.38 <sup>b</sup>
蛋白质效率 PER	2.60 ± 0.04 <sup>b</sup>	2.78 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.76 ± 0.03 <sup>a</sup>	2.59 ± 0.09 <sup>b</sup>	2.55 ± 0.06 <sup>b</sup>
蛋白质沉积率/% PRE	46.23 ± 0.99	46.71 ± 1.50	46.37 ± 3.00	45.42 ± 3.18	44.98 ± 1.98
<b>形体指标 morphometric index</b>					
肝体比/% HSI	3.00 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.93 ± 0.01 <sup>ab</sup>	2.85 ± 0.03 <sup>c</sup>	2.96 ± 0.05 <sup>ab</sup>	2.88 ± 0.04 <sup>bc</sup>
脏体比/% VSI	3.93 ± 0.28	4.19 ± 0.12	4.19 ± 0.14	3.89 ± 0.21	4.19 ± 0.14
肥满度/% CF	2.72 ± 0.09	2.52 ± 0.08	2.69 ± 0.08	2.70 ± 0.05	2.70 ± 0.17
脾脏指数/% SSI	0.08 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.09 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.10 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.12 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.11 ± 0.00 <sup>ab</sup>

注:表中数据以平均值 ± 标准差表示( $n = 3$ ),同行数值后不同上标英文字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),以下各表同

Notes: Values (means ± SD) ( $n = 3$ ) in the same row with different superscripts show significant difference ( $P < 0.05$ ), the same as the following

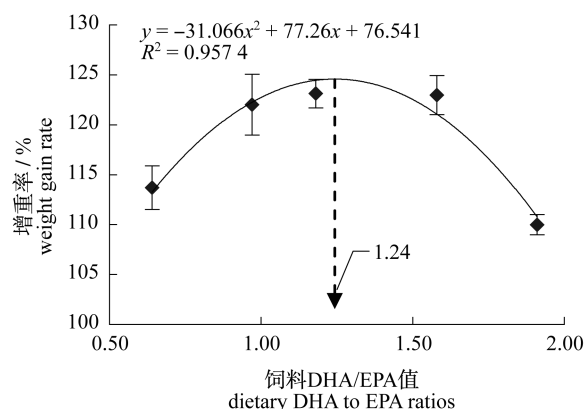


图1 实验鱼增重率 WGR 与饲料 DHA/EPA 二元回归关系  
Fig.1 Quadratic regression analysis of fish weight gain rate (WGR) and dietary DHA/EPA ratios

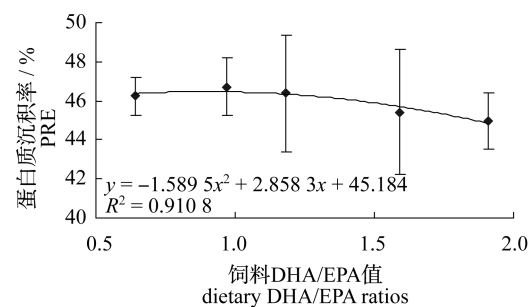


图2 实验鱼蛋白质沉积率 PRE 与饲料 DHA/EPA 值二元回归关系

Fig.2 Quadratic regression analysis of fish protein retention efficiency (PRE) and dietary DHA/EPA ratios

标中,饲料 DHA/EPA 值未对星斑川鲷幼鱼脏体比(HSI)、肥满度(VSI)产生影响,随饲料 DHA/EPA 值的升高,肝体比呈先下降后上升的趋势,脾脏指数(SSI)有显著上升趋势( $P < 0.05$ )。

## 2.2 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼肌肉、肝脏和全鱼常规营养组成的影响

肌肉水分含量为 77.82%~78.24%,各组之间差异不显著( $P > 0.05$ )。粗蛋白水平以  $R_{0.64}$  组和  $R_{1.59}$  组最高,其他各组间差异不显著( $P > 0.05$ ) (表 4)。粗脂肪含量  $R_{1.59}$  组最高,其他各组间无显著差异( $P > 0.05$ )。粗灰分含量以  $R_{0.97}$  组最高, $R_{1.91}$  组最低,其他各组无显著差异( $P > 0.05$ );对于肝脏组织:水分以  $R_{1.18}$  组最高, $R_{1.91}$  组最低。各组间肝脏粗蛋白、粗灰分及肝糖原含

量均不受饲料处理的显著影响( $P > 0.05$ )。

肝脏粗脂肪含量与 HSI 变化趋势一致(图 3),当饲料 DHA/EPA 值 $\leq 1.18$  时呈显著下降趋势( $P < 0.05$ ),之后有所上升,但均与  $R_{0.97}$  组无显著差异( $P > 0.05$ )。回归分析( $y = 5.1996x^2 - 15.652x + 20.866$ ;  $R^2 = 0.6348$ ,  $x =$  饲料 DHA/EPA 值,  $y =$  肝脏脂肪含量;图 4)显示,当饲料中 DHA/EPA 值为 1.51 时,肝脏脂肪含量达到最低;在全鱼组成中:粗灰分含量无显著变化,水分含量在各组间浮动范围较小,粗蛋白以  $R_{1.18}$  组最高,其他各组差异不显著( $P > 0.05$ ),粗脂肪含量在  $R_{1.59}$  组达到最高, $R_{0.97}$  组最低,其他各组差异不显著( $P > 0.05$ )。

表 4 不同实验饲料投喂组星斑川鲷幼鱼组织常规营养成分分析(%湿重)  
Tab.4 Tissue proximate composition of *P. stellatus* fed with different experimental diets (wet weight) %

	组别 groups				
	$R_{0.64}$	$R_{0.97}$	$R_{1.18}$	$R_{1.59}$	$R_{1.91}$
<b>肌肉 dorsal muscle</b>					
水分 moisture	77.85 ± 0.44	78.24 ± 0.16	77.86 ± 0.59	77.82 ± 0.32	78.18 ± 0.12
粗蛋白 crude protein	20.07 ± 0.23 <sup>a</sup>	19.96 ± 0.11 <sup>bc</sup>	19.80 ± 0.13 <sup>c</sup>	20.06 ± 0.14 <sup>a</sup>	19.99 ± 0.17 <sup>bc</sup>
粗脂肪 crude lipid	1.32 ± 0.29 <sup>ab</sup>	0.90 ± 0.09 <sup>b</sup>	1.15 ± 0.17 <sup>b</sup>	1.60 ± 0.87 <sup>a</sup>	1.10 ± 0.25 <sup>b</sup>
粗灰分 crude ash	4.99 ± 0.16 <sup>ab</sup>	5.19 ± 0.21 <sup>a</sup>	4.84 ± 0.17 <sup>bc</sup>	4.95 ± 0.05 <sup>bc</sup>	4.75 ± 0.26 <sup>c</sup>
<b>肝脏 liver</b>					
水分 moisture	63.40 ± 2.99 <sup>ab</sup>	65.63 ± 1.77 <sup>ab</sup>	66.44 ± 1.58 <sup>a</sup>	64.63 ± 2.27 <sup>ab</sup>	63.29 ± 2.87 <sup>b</sup>
粗蛋白 crude protein	6.02 ± 0.62	5.86 ± 0.33	5.65 ± 0.14	5.59 ± 0.29	5.86 ± 0.29
粗脂肪 crude lipid	13.44 ± 1.03 <sup>a</sup>	10.15 ± 0.40 <sup>bc</sup>	8.60 ± 1.32 <sup>c</sup>	10.90 ± 1.81 <sup>b</sup>	9.16 ± 0.14 <sup>bc</sup>
粗灰分 crude ash	0.89 ± 0.05	0.90 ± 0.06	0.94 ± 0.04	0.96 ± 0.04	0.95 ± 0.07
肝糖原 liver glycogen	17.56 ± 0.63	18.42 ± 0.98	17.75 ± 1.06	17.39 ± 1.83	17.59 ± 0.75
<b>全鱼 whole fish</b>					
水分 moisture	73.94 ± 0.32 <sup>bc</sup>	74.08 ± 0.22 <sup>b</sup>	73.42 ± 0.46 <sup>cd</sup>	73.59 ± 0.30 <sup>c</sup>	74.64 ± 0.30 <sup>a</sup>
粗蛋白 crude protein	16.44 ± 0.28 <sup>ab</sup>	16.44 ± 0.18 <sup>ab</sup>	16.78 ± 0.44 <sup>a</sup>	16.57 ± 0.07 <sup>ab</sup>	16.27 ± 0.40 <sup>bc</sup>
粗脂肪 crude lipid	5.63 ± 0.33 <sup>ab</sup>	5.06 ± 0.12 <sup>c</sup>	5.42 ± 0.52 <sup>abc</sup>	5.77 ± 0.42 <sup>a</sup>	5.09 ± 0.39 <sup>bc</sup>
粗灰分 crude ash	3.22 ± 0.15	3.19 ± 0.20	3.11 ± 0.19	3.10 ± 0.07	3.04 ± 0.19

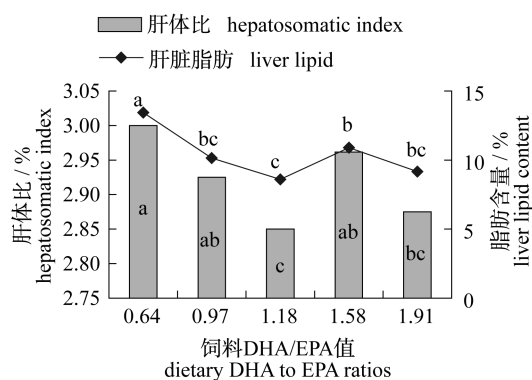


图 3 不同实验组鱼体肝体比与肝脏脂肪含量

Fig.3 Hepatosomatic index and liver lipid content in fish fed with different experimental diets

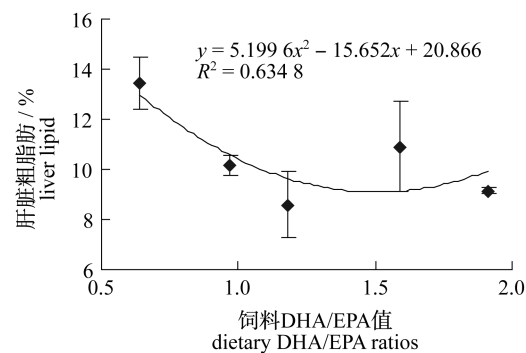


图 4 实验鱼肝脏粗脂肪含量与饲料 DHA/EPA 值二元回归关系

Fig.4 Quadratic regression analysis of fish liver lipid content and dietary DHA/EPA ratios

### 2.3 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼肝脏、肌肉脂肪酸组成的影响

饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼肝脏脂肪酸组成的影响 总饱和脂肪酸( $\Sigma$ SFA)含量为 16.26%~19.76%,其中 C16:0 含量为 13.04%~15.93%,占 80%左右,两者最高值均出现在 R<sub>0.97</sub>组, $\Sigma$ SFA 和 C16:0 则在 R<sub>1.91</sub>组呈现最低(表 5)。C14:0 含量变化趋势与 $\Sigma$ SFA 相同,其他成分如 C15:0 和 C18:0 含量均不受饲料处理的显著影响( $P > 0.05$ );单不饱和脂肪酸总量( $\Sigma$ MUFA)为 44.75%~49.62%,不受饲料 DHA/EPA 值的影响( $P > 0.05$ )。其主要成分为 C18:1n-9,占 $\Sigma$ MUFA 总量的 76%左右,在 R<sub>1.59</sub>组达到最低,其他各组间无显著差异( $P > 0.05$ )。

各实验组 C16:1n-7、C18:1n-7 含量差异不显著( $P > 0.05$ ); $\Sigma$ n-6 PUFA 与 C18:2n-6 含量变化趋势一致,均以 R<sub>0.64</sub>组最低,R<sub>1.91</sub>组最高,并随饲料中 DHA/EPA 值的升高呈线性上升趋势( $\Sigma$ n-6 PUFA,  $R^2 = 0.9724$ ; C18:2n-6,  $R^2 = 0.9596$ )。ARA 含量于 R<sub>1.18</sub>组最高,其他各组间无显著差异( $P > 0.05$ );各组间 $\Sigma$ n-3 PUFA 与 $\Sigma$ n-3 HUFA 均无显著差异( $P > 0.05$ )。EPA 含量随着实验饲料 EPA 含量的减少呈显著下降趋势( $P < 0.05$ ),各组 DPA 含量相对稳定,DHA 含量呈线性上升趋势( $P < 0.05$ )。各组实验鱼肝脏 DHA/EPA 值随着饲料 DHA/EPA 值的增加呈直线上升趋势( $R^2 = 0.9521$ )(图 5)。

表 5 不同实验饲料投喂组星斑川鲷幼鱼肝脏脂肪酸组成分析(%总脂肪酸)  
Tab.5 Liver fatty acid composition of *P. stellatus* fed with different experimental diets(total fatty acids) %

脂肪酸 fatty acids	组别 groups				
	R <sub>0.64</sub>	R <sub>0.97</sub>	R <sub>1.18</sub>	R <sub>1.59</sub>	R <sub>1.91</sub>
C14:0	2.07 ± 0.03 <sup>ab</sup>	2.12 ± 0.08 <sup>a</sup>	1.83 ± 0.10 <sup>b</sup>	1.96 ± 0.24 <sup>ab</sup>	1.82 ± 0.19 <sup>b</sup>
C15:0	0.16 ± 0.00	0.17 ± 0.01	0.14 ± 0.02	0.15 ± 0.03	0.14 ± 0.04
C16:0	15.04 ± 1.15 <sup>ab</sup>	15.93 ± 0.49 <sup>a</sup>	14.22 ± 0.43 <sup>ab</sup>	14.39 ± 1.90 <sup>ab</sup>	13.04 ± 1.33 <sup>c</sup>
C16:1n-7	10.84 ± 0.09	10.60 ± 0.24	9.33 ± 1.31	9.58 ± 1.88	8.89 ± 1.57
C18:0	1.48 ± 0.16	1.55 ± 0.13	1.54 ± 0.02	1.39 ± 0.20	1.30 ± 0.15
C18:1n-7	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.00	0.14 ± 0.01	0.13 ± 0.00	0.13 ± 0.01
C18:1n-9	37.53 ± 1.27 <sup>a</sup>	36.24 ± 0.40 <sup>a</sup>	36.84 ± 0.36 <sup>a</sup>	34.22 ± 1.38 <sup>b</sup>	35.84 ± 1.62 <sup>ab</sup>
C18:2n-6	17.41 ± 0.23 <sup>b</sup>	18.08 ± 0.08 <sup>ab</sup>	18.94 ± 0.95 <sup>ab</sup>	20.98 ± 3.45 <sup>ab</sup>	21.58 ± 2.67 <sup>a</sup>
C18:3n-3	1.22 ± 0.01 <sup>b</sup>	1.23 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1.26 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.38 ± 0.17 <sup>ab</sup>	1.36 ± 0.16 <sup>ab</sup>
C20:2n-9	1.01 ± 0.09	1.05 ± 0.09	1.16 ± 0.15	1.31 ± 0.40	1.39 ± 0.15
C20:3n-3	0.22 ± 0.01	0.23 ± 0.02	0.26 ± 0.03	0.28 ± 0.08	0.30 ± 0.04
ARA	0.30 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.36 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.45 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.42 ± 0.06 <sup>ab</sup>	0.40 ± 0.03 <sup>ab</sup>
EPA	2.51 ± 0.03 <sup>a</sup>	2.17 ± 0.12 <sup>b</sup>	2.01 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.86 ± 0.20 <sup>bc</sup>	1.56 ± 0.11 <sup>c</sup>
DPA	0.57 ± 0.03	0.49 ± 0.07	0.60 ± 0.04	0.53 ± 0.07	0.55 ± 0.07
DHA	2.92 ± 0.11 <sup>c</sup>	3.13 ± 0.20 <sup>bc</sup>	3.91 ± 0.03 <sup>a</sup>	4.07 ± 0.49 <sup>a</sup>	4.22 ± 0.47 <sup>ab</sup>
$\Sigma$ SFA	18.74 ± 1.33 <sup>ab</sup>	19.76 ± 0.70 <sup>a</sup>	17.75 ± 0.50 <sup>ab</sup>	17.89 ± 2.35 <sup>ab</sup>	16.26 ± 1.64 <sup>b</sup>
$\Sigma$ MUFA	49.62 ± 1.05	48.61 ± 0.16	48.07 ± 1.35	44.75 ± 3.51	44.87 ± 2.36
$\Sigma$ n-6 PUFA	17.71 ± 0.26 <sup>b</sup>	18.43 ± 0.09 <sup>ab</sup>	19.44 ± 1.02 <sup>ab</sup>	21.47 ± 3.55 <sup>ab</sup>	22.04 ± 2.74 <sup>a</sup>
$\Sigma$ n-3 PUFA	7.44 ± 0.16	7.25 ± 0.41	8.02 ± 0.10	8.14 ± 0.92	7.98 ± 0.78
$\Sigma$ n-3 HUFA	6.00 ± 0.16	5.79 ± 0.39	6.51 ± 0.07	6.47 ± 0.73	6.33 ± 0.61
DHA/EPA	1.16 ± 0.32 <sup>c</sup>	1.44 ± 0.02 <sup>d</sup>	1.95 ± 0.02 <sup>c</sup>	2.18 ± 0.08 <sup>b</sup>	2.70 ± 0.12 <sup>a</sup>

饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼肌肉脂肪酸组成的影响 各实验组饱和脂肪酸( $\Sigma$ SFA)含量为 19.36%~21.44%,单不饱和脂肪酸

( $\Sigma$ MUFA)含量为 24.34%~25.99%,n-6 多不饱和脂肪酸( $\Sigma$ n-6 PUFA)含量为 25.52%~27.95%,n-3 多不饱和脂肪酸( $\Sigma$ n-3 PUFA)含量

为 20.86%~22.69%,以上脂肪酸总和及其包含的单一脂肪酸均不受饲料处理的显著影响( $P > 0.05$ )(表 6)。n-3 高不饱和脂肪酸总量( $\Sigma$  n-3 HUFA)在各组间无显著差异,但其中 EPA 含量

呈直线下滑趋势( $P < 0.05$ ),DHA 呈上升趋势( $P < 0.05$ ),DHA/EPA 值随饲料 DHA/EPA 值的增加呈直线上升趋势( $R^2 = 0.8715$ )(图 6)。

表 6 不同实验饲料投喂组星斑川鲷幼鱼肌肉脂肪酸组成分析(%总脂肪酸)

Tab.6 Dorsal muscle fatty acid composition of *P. stellatus* fed with different experimental diets (total fatty acids)

脂肪酸 fatty acids	组别 groups					%
	R <sub>0.64</sub>	R <sub>0.97</sub>	R <sub>1.18</sub>	R <sub>1.59</sub>	R <sub>1.91</sub>	
C14:0	1.52 ± 0.24	1.30 ± 0.06	1.37 ± 0.22	1.40 ± 0.14	1.25 ± 0.00	
C15:0	0.18 ± 0.03	0.16 ± 0.01	0.16 ± 0.04	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.02	
C16:0	13.44 ± 0.52	14.31 ± 1.04	13.14 ± 1.32	14.11 ± 1.33	14.16 ± 1.19	
C16:1n-7	2.80 ± 0.48	2.20 ± 0.28	2.27 ± 0.33	2.31 ± 0.51	2.14 ± 0.31	
C17:0	0.15 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.15 ± 0.03	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.00	
C18:0	3.93 ± 0.88	4.93 ± 0.53	4.21 ± 0.57	4.52 ± 1.35	5.25 ± 1.22	
C18:1n-9	19.44 ± 1.16	18.20 ± 0.91	17.74 ± 2.11	19.05 ± 1.83	18.61 ± 0.49	
C18:1n-7	2.45 ± 0.23	2.34 ± 0.19	2.23 ± 0.32	2.38 ± 0.07	2.24 ± 0.03	
C18:2n-6	26.78 ± 1.86	24.41 ± 0.28	24.51 ± 4.99	26.81 ± 2.81	24.71 ± 1.36	
C20:1n-7	1.97 ± 0.28	1.94 ± 0.68	1.86 ± 0.63	1.96 ± 0.21	2.42 ± 0.39	
C18:3n-3	2.75 ± 0.52	2.63 ± 1.11	5.86 ± 6.21	2.54 ± 0.55	2.58 ± 0.09	
C20:2n-9	0.33 ± 0.15	0.19 ± 0.04	0.22 ± 0.07	0.24 ± 0.09	0.17 ± 0.01	
C20:3n-3	0.17 ± 0.01	0.21 ± 0.07	0.19 ± 0.05	0.23 ± 0.06	0.18 ± 0.03	
ARA	0.85 ± 0.18	1.07 ± 0.06	1.02 ± 0.14	0.98 ± 0.21	1.14 ± 0.00	
EPA	7.32 ± 0.74 <sup>a</sup>	6.84 ± 0.52 <sup>ab</sup>	6.14 ± 0.50 <sup>bc</sup>	5.73 ± 0.71 <sup>bc</sup>	5.68 ± 0.03 <sup>c</sup>	
DPA	1.03 ± 0.07	1.01 ± 0.02	0.95 ± 0.11	0.89 ± 0.09	0.90 ± 0.01	
DHA	10.08 ± 1.88 <sup>b</sup>	12.08 ± 0.87 <sup>ab</sup>	11.46 ± 0.97 <sup>ab</sup>	11.47 ± 2.39 <sup>ab</sup>	13.11 ± 0.25 <sup>a</sup>	
$\Sigma$ SFA	19.57 ± 1.11	21.31 ± 1.64	19.36 ± 1.84	20.77 ± 2.62	21.44 ± 2.32	
$\Sigma$ MUFA	24.99 ± 1.75	24.87 ± 1.78	24.34 ± 3.37	25.99 ± 2.48	25.61 ± 0.45	
$\Sigma$ n-6 PUFA	27.70 ± 1.77	25.52 ± 0.30	27.95 ± 1.94	27.89 ± 2.71	26.00 ± 1.35	
$\Sigma$ n-3 PUFA	21.32 ± 2.31	22.69 ± 1.99	22.01 ± 0.97	20.86 ± 2.68	22.45 ± 0.39	
$\Sigma$ n-3 HUFA	18.43 ± 2.68	19.93 ± 1.40	18.54 ± 1.55	18.09 ± 3.19	19.69 ± 0.27	
DHA/EPA	1.37 ± 0.12 <sup>d</sup>	1.77 ± 0.02 <sup>c</sup>	1.87 ± 0.06 <sup>bc</sup>	1.99 ± 0.16 <sup>b</sup>	2.31 ± 0.03 <sup>a</sup>	

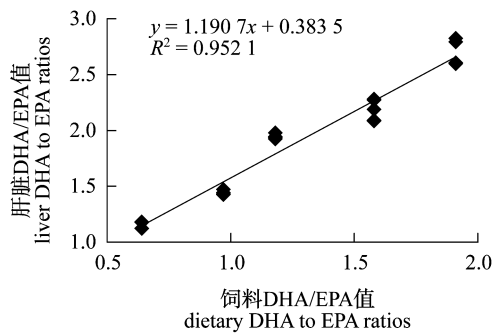


图 5 肝脏与饲料 DHA/EPA 值相关关系图

Fig.5 Relationship of DHA/EPA ratios between fish liver and experimental diets

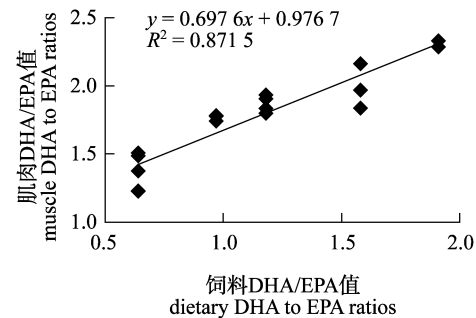


图 6 肌肉与饲料 DHA/EPA 值相关关系图

Fig.6 Relationship of DHA/EPA ratios between fish muscle and experimental diets



## 2.4 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼血清生理指标的影响

血清总蛋白(TP)和球蛋白(GLB)均在 R<sub>1.59</sub>组时达到最高,分别为 29.65 和 19.60 g/L,最低值均出现在 R<sub>1.91</sub>组,分别为 17.25 和 9.6 g/L。白蛋白(ALB)在 R<sub>0.64</sub>、R<sub>0.97</sub>和 R<sub>1.59</sub>水平显著高于 R<sub>1.18</sub>和 R<sub>1.91</sub>组(表 7)。白蛋白与球蛋白比值(A/G ratio)保持在 0.65 左右,不受饲料 DHA/EPA 值的影响( $P > 0.05$ )。R<sub>1.18</sub>组溶菌酶(LSZ)活性

最高(2.76 μg/mL),与 R<sub>0.64</sub>、R<sub>0.97</sub>、R<sub>1.59</sub>和 R<sub>1.91</sub>组相比分别增加了 91.67%、75.80%、86.49% 和 64.29%。R<sub>1.91</sub>组谷丙转氨酶(ALT)活性最高,比 R<sub>0.64</sub>、R<sub>0.97</sub>、R<sub>1.18</sub>和 R<sub>1.59</sub>组分别提高了 37.88%、42.81%、61.76% 和 54.65%,但此 4 组间未见明显差异( $P > 0.05$ )。R<sub>1.18</sub>、R<sub>1.59</sub>和 R<sub>1.91</sub>组谷草转氨酶(AST)活性(109.47 ~ 137.10 IU/L)约为 R<sub>0.64</sub>组(78.57 IU/L)和 R<sub>0.97</sub>组(74.13 IU/L)的 1.65 倍( $P < 0.05$ )。

表 7 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼血清非特异性免疫指标的影响

Tab.7 Effect of DHA to EPA ratios on serum physiological parameters of juvenile starry flounder

指标 parameters	组别 groups				
	R <sub>0.64</sub>	R <sub>0.97</sub>	R <sub>1.18</sub>	R <sub>1.59</sub>	R <sub>1.91</sub>
总蛋白/(g/L) TP	24.00 ± 3.11 <sup>b</sup>	24.23 ± 1.84 <sup>b</sup>	21.40 ± 0.71 <sup>bc</sup>	29.65 ± 0.35 <sup>a</sup>	17.25 ± 0.35 <sup>c</sup>
白蛋白/(g/L) ALB	8.53 ± 0.68 <sup>ab</sup>	9.53 ± 0.23 <sup>a</sup>	7.53 ± 0.90 <sup>b</sup>	9.43 ± 1.07 <sup>a</sup>	7.60 ± 0.46 <sup>b</sup>
球蛋白/(g/L) GLB	17.05 ± 0.49 <sup>b</sup>	15.65 ± 0.49 <sup>c</sup>	13.35 ± 0.78 <sup>d</sup>	19.60 ± 0.42 <sup>a</sup>	9.60 ± 0.28 <sup>e</sup>
白蛋白/球蛋白 A/G ratio	0.56 ± 0.10	0.65 ± 0.07	0.70 ± 0.17	0.62 ± 0.20	0.72 ± 0.14
溶菌酶/(μg/mL) LSZ	1.44 ± 0.35 <sup>b</sup>	1.57 ± 0.61 <sup>b</sup>	2.76 ± 0.15 <sup>a</sup>	1.48 ± 0.32 <sup>b</sup>	1.68 ± 0.34 <sup>b</sup>
谷丙转氨酶/(IU/L) ALT	59.95 ± 0.35 <sup>b</sup>	57.88 ± 1.66 <sup>b</sup>	51.10 ± 0.28 <sup>b</sup>	53.45 ± 6.65 <sup>b</sup>	82.66 ± 2.84 <sup>a</sup>
谷草转氨酶/(IU/L) AST	78.57 ± 6.13 <sup>a</sup>	74.13 ± 8.17 <sup>a</sup>	109.47 ± 13.80 <sup>b</sup>	130.40 ± 15.92 <sup>b</sup>	137.10 ± 25.02 <sup>b</sup>

## 3 讨论

### 3.1 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼生长性能的影响

本实验中,实验鱼存活率均为 100%,饲料效率(FE)、蛋白质效率(PER)均与本实验室以往研究<sup>[11]</sup>一致,但实验鱼增重率(WGR)(113.70%~122.98%)明显低于 Ding 等<sup>[12]</sup>的研究结果(198.1%~215.7%),这可能是因为本实验饲料中鱼粉含量(20%)明显低于前者(48%),使饲料中含有的诱食因子及未知生长因子含量也显著降低,导致鱼体摄食率下降(1.02%~1.09%),进而影响鱼体生长。

海水鱼类对 *n-3* HUFA 需要量与 DHA/EPA 值有关主要是因为 EPA 和 DHA 对不同生长阶段海水鱼类的生理作用不同。目前 DHA/EPA 值需要量的研究多见于仔稚鱼<sup>[5,7-8]</sup>,但近几年来,随着配合饲料生产技术的进步,饲料 DHA/EPA 值的研究也已逐步开展。Hossain 等<sup>[13]</sup>研究发现,银鲳幼鱼(*Pampus argenteus*)达到最佳生长性能时对 DHA 需求量高于 EPA,且 DHA/EPA 值需要量为 1.26; Wu 等<sup>[14]</sup>报道当饲料中 DHA/EPA 值大于 1 时石斑鱼生长性能达到最佳; Seoka

等<sup>[15]</sup>等研究了 DHA/EPA 值对海水仔稚鱼及幼鱼生长性能的重要性,并发现为保证鱼体正常生长,饲料 DHA/EPA 值必须保持在 1 以上。与以上研究结果一致,在本实验中,各处理组实验鱼增重率随饲料 DHA/EPA 值的升高呈现先上升后下降的趋势,二次回归分析可得,星斑川鲷幼鱼(31.70 ± 0.12)g 对 DHA/EPA 值的最适需要量为 1.24,表明在提高星斑川鲷幼鱼生长性能方面,DHA 作用更优于 EPA。

### 3.2 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼肝脏脂肪沉积和组织脂肪酸组成的影响

Moreira 等<sup>[16]</sup>指出鱼类肝体比的升高主要归因于肝脏脂肪沉积及肝糖原含量的增加, Berger 等<sup>[17]</sup>研究发现鱼体肝脏增大主要由肝脏脂肪、糖原沉积增加或肝脏蛋白消耗引起。在本实验中,各组肝糖原及肝脏粗蛋白含量均无显著差异,且肝体比与肝脏脂肪含量变化趋势一致(图 3),表明星斑川鲷幼鱼肝体比主要受肝脏脂肪含量的影响。

与已有研究结果<sup>[18]</sup>一致,本实验中,实验鱼肝脏脂肪沉积受饲料 DHA/EPA 值的影响最为显著,最大降幅达 56%,表明星斑川鲷幼鱼肝脏是反映饲料脂肪变化的敏感器官。二次回归分析显

示,当饲料 DHA/EPA 值为 1.51 时肝脏脂肪含量达到最低。研究表明,脂肪代谢过程是脂肪合成代谢和分解代谢的一种动态平衡。当合成代谢增强或分解代谢下降时,就会打破机体原有的平衡而导致脂肪沉积量的增加,甚至导致脂肪过度沉积<sup>[19]</sup>。HUFA 能抑制脂类合成,促进脂类分解,降低肝脂和血脂。其中 DHA 除可通过抑制脂肪包被蛋白(perilipin)的表达加速脂肪分解外<sup>[20]</sup>,还可抑制肝脏细胞核固醇调节元件结合蛋白(SREBP-1)的基因表达,是肝脏脂肪合成的关键抑制因子<sup>[21]</sup>。因此在本实验中,饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼肝脏脂肪沉积的降低作用主要可归因于肝脏中 DHA 含量的线性升高。

在脂肪酸组成上,实验鱼肝脏和肌肉组织 DPA 含量均高于饲料中的含量,表明星斑川鲷幼鱼组织中存在着 EPA 向 DHA 转化的可能性,这可能是星斑川鲷幼鱼肌肉和肝脏 DHA/EPA 值均高于饲料中比值的主要原因<sup>[22]</sup>。与 Ma 等<sup>[23]</sup>的研究相似,本实验中星斑川鲷肌肉中 DHA、EPA 沉积量高于肝脏,可能是因为肌肉和肝脏可选择性利用 C18:2n-6 作为  $\beta$ -氧化的底物<sup>[24]</sup>,减少了 n-3 HUFA 作为能量的消耗,进而增加其在组织内的沉积。同时肝脏对 C18:1n-9 的选择性吸收<sup>[25]</sup>稀释了这种作用,因此肝脏内 DHA 和 EPA 的沉积量低于肌肉组织。

### 3.3 饲料 DHA/EPA 值对星斑川鲷幼鱼血液生理指标的影响

硬骨鱼类脾脏是红细胞、中性白细胞和粒细胞生长、贮存与成熟的主要器官,在造血和免疫反应方面都起着重要作用,其重量变化与机体免疫状况密切相关<sup>[26]</sup>。同时,脾脏指数还可作为衡量脾脏发育状况的一项重要指标<sup>[27]</sup>。本实验中,随着饲料 DHA/EPA 值的升高,星斑川鲷幼鱼脾脏指数呈现显著上升趋势,表明饲料 DHA/EPA 值能促进星斑川鲷幼鱼脾脏生长,进而增强鱼体免疫力,这在实验鱼血清生理指标的研究中得到了证实。

总蛋白是血清的重要组成部分,其主要成分为白蛋白和球蛋白,在免疫反应中发挥重要作用。球蛋白的主要组分  $\gamma$ -球蛋白为血液免疫功能蛋白的主要来源。白蛋白对于维持机体渗透压必不可少,同时还以血浆载体和多结合域非特异性配合基的形式发挥作用。血清总蛋白和球蛋白水平

通常被认为是反映鱼体自身免疫应答强弱的关键指标<sup>[28]</sup>。在本实验中,血清总蛋白、白蛋白及球蛋白含量均在 R<sub>1.59</sub>组达到最高,且分别比最低组增加了 71.88%、25.23% 和 104.17%,随着 DHA/EPA 值的继续升高,三者均有显著下降。各处理组血清白蛋白与球蛋白比值(A/G ratio)未受饲料 DHA/EPA 值的影响。以上结果表明,适宜饲料 DHA/EPA 值能使血清中溶菌物质和杀菌物质含量升高,机体体液免疫反应增强,但比值过高或过低均会产生抑制作用。

溶菌酶被认为来源于白细胞,主要通过溶解细菌细胞壁、刺激细菌吞噬作用在自身免疫反应中发挥重要作用,是机体应对细菌病原体感染的重要防御屏障<sup>[29]</sup>。研究发现,高剂量 n-3 多不饱和酸同样可增强鱼体细菌吞噬活性及抗体产量<sup>[30]</sup>,且 DHA 作用优于 EPA<sup>[31]</sup>。据此,在增强细胞吞噬作用方面,DHA/EPA 值同血清溶菌酶之间存在协同作用。在本实验中,当饲料 DHA/EPA 值为 1.18 时,星斑川鲷幼鱼血清溶菌酶活力达到最高,进一步验证了以上观点。

谷丙转氨酶(ALT)和谷草转氨酶(AST)活性一直以来被用作脊椎动物肝功能的指示指标。在本实验中,当饲料 DHA/EPA 值小于 1.59 时,血清 ALT 活性在各组间无显著差异。AST 在 DHA/EPA 大于 1.18 时的活性升高了 1.65,表明饲料 DHA/EPA 值过高会破坏星斑川鲷肝脏细胞膜的完整性,致使肝脏细胞内谷丙转氨酶和谷草转氨酶大量释放入血液。目前仅见 n-3HUFA 缺乏升高谷草转氨酶活性的研究<sup>[6,32-33]</sup>,有关饲料 DHA/EPA 值对实验鱼谷丙转氨酶、谷草转氨酶活性的影响尚未见相关报道,因此其影响机制有待进一步研究。另外,与以往研究结果<sup>[12]</sup>一致,本实验中血清谷草转氨酶(AST)活性及其变化幅度均高于谷丙转氨酶(ALT),表明星斑川鲷幼鱼血清谷草转氨酶(AST)比谷丙转氨酶(ALT)活跃。

衷心感谢王世信、黄炳山、孙永智、乔洪金、李宝山、宋志东、柳旭东、李培玉、蔡江先等在实验饲料制备、养殖管理、样品采集及论文撰写过程中给予的大力帮助!

### 参考文献:

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of world fisheries and aquaculture

- [R]. Rome;FAO,2012.
- [2] Tacon A G J, Metian M. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects [J]. Aquaculture, 2008, 285(1-4): 146-158.
- [3] Watanabe T. Strategies for further development of aquatic feeds [J]. Fishery Science, 2002, 68(2): 242-252.
- [4] Tocher D R. Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish [J]. Aquaculture Research, 2010, 41(5): 717-732.
- [5] Copeman L A, Parrish C C, Brown J A, et al. Effects of docosahexaenoic, eicosapentaenoic and arachidonic acids on the early growth, survival, lipid composition and pigmentation of yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*): A live food enrichment experiment [J]. Aquaculture, 2002, 210(1-4): 285-304.
- [6] 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(1-4): 269-281.
- [7] Rodríguez C, Pérez J A, Díaz M. Influence of the EPA/DHA ratio in rotifers on gilthead seabream (*Sparus aurata*) larval development [J]. Aquaculture, 1997, 150(1): 77-89.
- [8] Gapasin R S J, Duray M N. Effects of DHA-enriched live food on growth, survival and incidence of opercular deformities in milkfish (*Chanos chanos*) [J]. Aquaculture, 2001, 193(1): 49-63.
- [9] Folch J, Lees M, Sloane-stanley G H. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues [J]. The Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.
- [10] Metcalfe L D, Schmitz A A, Pelka J R. Rapid preparation of fatty acids esters from lipids for gas chromatographic analysis [J]. Analytical Chemistry, 1966, 38(3): 514-515.
- [11] Zhang D R, Zhang L M, Wang J Y, et al. Effect of dairy-yeast prebiotic on growth performance and antioxidant capability of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 3(4): 34-42. [张德瑞, 张利民, 王际英, 等. 乳制品-酵母益生元对星斑川鲷幼鱼生长性能和抗氧化能力的影响. 渔业科学进展, 2013, 3(4): 34-42.]
- [12] Ding L Y, Zhang L M, Wang J Y, et al. Effect of dietary lipid level on growth performance, feed utilization, body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*) [J]. Aquaculture Research, 2010, 41(10): 1470-1478.
- [13] Hossain M A, Almatar S M, James C M. Effect of dietary lipid levels on growth performance, feed utilization and body composition of juvenile silver pomfret, *Pampus argenteus* (Euphrasen, 1788) [J]. Asia-Pacific Journal of Life Sciences, 2011, 4(2): 1-16.
- [14] Wu F C, Ting Y Y, Chen H Y. Docosahexaenoic acid is superior to eicosapentaenoic acid as the essential fatty acid for growth of grouper, *Epinephelus malabaricus* [J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132(1): 72-79.
- [15] Seoka M, Kurata M, Tamagawa R, et al. Dietary supplementation of salmon roe phospholipid enhances the growth and survival of Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* larvae and juveniles [J]. Aquaculture, 2008, 275(1-4): 225-234.
- [16] Moreira I S, Peres H, Couto A, et al. Temperature and dietary carbohydrate level effects on performance and metabolic utilization of diets in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles [J]. Aquaculture, 2008, 274(1): 153-160.
- [17] Berger A, Halver J E. Effect of dietary protein, lipid and carbohydrate content on the growth, feed efficiency and carcass composition of striped bass, *Morone saxatilis* (Walbaum), fingerlings [J]. Aquaculture Research, 1987, 18(4): 345-356.
- [18] Likimani T A, Wilson R P. Effects of diet on lipogenic enzyme activities in channel catfish hepatic and adipose tissue [J]. The Journal of Nutrition, 1982, 112(1): 112-117.
- [19] Cheng H L, Xia D Q, Wu T T. Fatty liver and regulation of lipids metabolism in fish [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2006, 18(4): 294-298. [程汉良, 夏德全, 吴婷婷. 鱼类脂类代谢调控与脂肪肝. 动物营养学报, 2006, 18(4): 294-298.]
- [20] Wang Y C, Kuo W H, Chen C Y, et al. Docosahexaenoic acid regulates serum amyloid A protein to promote lipolysis through down regulation of perilipin [J]. The Journal of Nutrition Biochemistry, 2010, 21(4): 317-324.
- [21] Jump D B, Botolin D, Wang Y, et al. Docosahexaenoic acid (DHA) and hepatic gene transcription [J]. Chemistry and Physics of Lipids, 2008, 153(1): 3-13.

- [22] Codabaccus B M, Bridle A R, Nichols P D, *et al.* An extended feeding history with a stearidonic acid enriched diet from parr to smolt increases n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids biosynthesis in white muscle and liver of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) [J]. *Aquaculture*, 2011, 322 - 323: 65 - 73.
- [23] Ma J J, Shao Q J, Xu Z R, *et al.* Effect of Dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth, body composition and fatty acid profiles of juvenile black seabream, *Acanthopagrus schlegeli* (Bleeker) [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2013, 44 (3): 311 - 325.
- [24] Eroldoğan T O, Yılmaz A H, Turchini G M, *et al.* Fatty acid metabolism in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*): Effects of n-6 PUFA and MUFA in fish oil replaced diets [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2013, 39(4): 941 - 955.
- [25] Montero D, Robaina L, Caballero M J, *et al.* Growth, feed utilization and flesh quality of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fed diets containing vegetable oils; A time-course study on the effect of re-feeding period with a 100% fish oil diet [J]. *Aquaculture*, 2005, 248(1-4): 121 - 134.
- [26] Lu M M, Chen X X, Wu Z X, *et al.* Effect of fructooligosaccharides on non-specific immunity of *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, 29(2): 213 - 216. [卢明森, 陈孝焯, 吴志新, 等. 果寡糖对草鱼非特异性免疫功能的影响. 华中农业大学学报, 2010, 29(2): 213 - 216.]
- [27] Ye Y T, Lin S M, Luo L, *et al.* The effect of temperature and pH value on activities of Proteases and amylases from *Silurus meridionalis* and *Leiocassis longirostris* [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 1998, 13(2): 17 - 23. [叶元士, 林仕梅, 罗莉, 等. 温度、pH 对南方大口鲶、长吻鲈蛋白酶和淀粉酶活力的影响. 大连水产学院学报, 1998, 13(2): 17 - 23.]
- [28] Li X F, Liu W B, Lu K L, *et al.* Dietary carbohydrate/lipid ratios affect stress, oxidative status and non-specific immune responses of fingerling blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2012, 33(2): 316 - 323.
- [29] Misra C K. Comparative study on the effect of different immunostimulants on the immune system of *L. rohita* (Hamilton, 1822) [D]. Mumbai, India: CIFE(Inland Aquaculture) PhD thesis, 2004: 231.
- [30] Sheldon W M, Blazer V S. Influence of dietary lipid and temperature on bacterial activity of channel catfish macrophages [J]. *Journal of Aquatic Animal Health*, 1991, 3(2): 87 - 93.
- [31] Wu F C, Ting Y Y, Chen H Y. Dietary docosahexaenoic acid is more optimal than eicosapentaenoic acid affecting the level of cellular defense responses of the juvenile grouper *Epinephelus malabaricus* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2003, 14(3): 223 - 238.
- [32] Lee S M. Review of the lipid and essential fatty acid requirements of rockfish (*Sebastes schlegeli*) [J]. *Aquaculture Research*, 2001, 32(suppl. 1): 8 - 17.
- [33] Kim K D, Lee S M, Park H G, *et al.* Essentiality of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) [J]. *The Journal of World Aquaculture Society*, 2002, 33(4): 432 - 440.

## Effect of dietary DHA to EPA ratios on growth performance, body composition and serum physiological parameters in juvenile *Platichthys stellatus*

MA Jingjing<sup>1</sup>, WANG Jiying<sup>1</sup>, SUN Jianzhen<sup>1,2</sup>, HAO Tiantian<sup>1,2</sup>, ZHANG Derui<sup>3</sup>, ZHANG Limin<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecological Restoration, Shandong Marine Resources and Environment Research Institute, Yantai 264006, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Shengsuo Fishery Feed Research Centre of Shandong Province, Yantai 265500, China)

**Abstract:** An 8-week feeding trial was conducted in a recirculated system to study the effect of dietary DHA to EPA ratios (0.64, 0.97, 1.18, 1.59 and 1.91), with 0.74% n-3 HUFA and 8.3% lipid in dry feed, on growth performance, body composition and blood physiological parameters in juvenile starry flounder, *Platichthys stellatus*. The results showed that: (1) fish weight gain rate (WGR), feed efficiency (FE), as well as protein efficiency ratio (PER) increased and then decreased with higher DHA/EPA values ( $P < 0.05$ ). Quadratic regression ( $y = -1.5895x^2 + 2.8583x + 45.184$ ;  $R^2 = 0.9108$ ,  $x =$  dietary DHA/EPA ratios,  $y =$  PRE) showed PRE decreases significantly beyond the DHA/EPA ratio of 0.90. Splenosomatic index (SSI) was enhanced by dietary DHA/EPA ratios and showed highest values of 0.12% in DHA/EPA ratio of 1.59, whereas hepatosomatic index (HSI) was decreased and then increased by dietary DHA/EPA ratios ( $P < 0.05$ ), with the lowest value being in DHA/EPA ratio of 1.18 (2.85%). (2) Liver lipid was obviously decreased (from 13.44% to 8.60%) by dietary DHA/EPA ratios lower than 1.18, and then increased slightly. Quadratic analysis ( $y = 5.1996x^2 - 15.652x + 20.866$ ;  $R^2 = 0.6348$ ,  $x =$  dietary DHA/EPA ratios,  $y =$  liver lipid content) suggests the optimum DHA/EPA ratio is 1.51 based on liver lipid deposition. Liver and muscle EPA contents were reduced linearly, however, DHA contents as well as DHA/EPA ratios were elevated linearly by dietary DHA/EPA ratios. Exclusively, total content of n-3 HUFA in both tissues were unaffected by dietary treatments. (3) Among all serum physiological parameters, both total protein and globulin showed their highest values at the DHA/EPA ratio of 1.59, while fish fed diets with DHA/EPA ratios of 0.64, 0.97 and 1.59 presented higher albumin content. Lysozyme (LSZ) reached the top in fish fed diet with dietary DHA/EPA ratio of 1.18. Alanine aminotransferase (ALT) remained unchanged when the dietary DHA/EPA ratios were lower than 1.91, while dietary DHA/EPA ratios higher than 1.18 increased the aspartate aminotransferase (AST) activities by about 65% ( $P < 0.05$ ). In conclusion, under the present experimental conditions, based on fish weight gain rate (WGR), quadratic regression analysis ( $y = -31.066x^2 + 77.26x + 76.541$ ;  $R^2 = 0.9574$ ,  $x =$  dietary DHA/EPA ratios,  $y =$  weight gain rate) shows that the optimum DHA/EPA ratio for juvenile starry flounder [initial body weight,  $(31.70 \pm 0.12)$  g] is 1.24.

**Key words:** *Platichthys stellatus*; DHA/EPA; growth performance; fatty acid profile; serum physiological parameters

**Corresponding author:** ZHANG Limin. E-mail: zhanglimin@126.com