

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15117

## 吉富罗非鱼对饲料亚油酸的需要量

田娟<sup>1,2</sup>, 涂玮<sup>2</sup>, 文华<sup>2</sup>, 蒋明<sup>2</sup>, 吴凡<sup>2</sup>, 刘伟<sup>2</sup>, 杨长庚<sup>2</sup>, 黄凤<sup>2</sup>

1. 中国海洋大学 农业部水产动物营养与饲料重点实验室, 山东 青岛 266003;
2. 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 农业部淡水生物多样性保护与利用重点开放实验室, 湖北 武汉 430223

**摘要:** 选用初始体重为(60.98±3.82) g的吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)630尾, 随机分成7组(每组设3个重复, 每个重复30尾), 饲喂亚油酸含量分别为0.07%(对照组)、0.36%、0.61%、1.03%、2.00%、3.00%和4.15%的7种半纯化等能等氮饲料10周。结果表明, 鱼体增重率、饲料效率、蛋白质效率和蛋白质沉积率均在亚油酸水平为1.03%时较对照组差异显著( $P<0.05$ ), 且均在饲料亚油酸水平为2.00%时达到最大。经二次回归分析, 饲料亚油酸水平为2.49%和2.66%时吉富罗非鱼分别获得最大增重率和最高饲料效率。通过折线回归发现饲料亚油酸水平为1.02%时, 吉富罗非鱼获得最大蛋白沉积。肝体比和脏体比均随亚油酸水平的升高而升高, 当饲料亚油酸含量为0.61%~4.15%时显著高于对照组( $P<0.05$ )。亚油酸添加组的肌肉粗脂肪含量显著高于对照组( $P<0.05$ ); 当饲料亚油酸含量为1.03%~4.15%时, 肝和全鱼粗脂肪含量显著高于对照组( $P<0.05$ )。随饲料亚油酸水平升高, 血清甘油三酯和总胆固醇变化趋势一致, 呈现先下降后上升的趋势, 经二次回归分析亚油酸水平为1.63%时血清甘油三酯含量最低; 各亚油酸添加组的血清高密度脂蛋白胆固醇含量显著高于对照组, 且在饲料亚油酸含量为1.13%时达到最大( $P<0.05$ ); 当饲料亚油酸水平为1.03%~4.15%时, 血清低密度脂蛋白胆固醇含量显著低于对照组( $P<0.05$ )。随饲料中饱和脂肪酸( $\Sigma$ SFA)含量下降, 吉富罗非鱼肌肉和肝脏 $\Sigma$ SFA含量均呈下降的趋势; 随饲料亚油酸水平增加, 肌肉和肝脏的n-6多不饱和脂肪酸( $\Sigma$ n-6 PUFA)含量呈上升趋势, 肌肉和肝脏的 $\Sigma$ n-3 PUFA含量呈下降趋势。综上所述, 初始体重为(60.98±3.82) g的吉富罗非鱼饲料亚油酸需要量为1.02%~2.66%。

**关键词:** 吉富罗非鱼; 亚油酸; 必需脂肪酸; 需要量

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)01-0104-13

亚油酸( $C_{18:2n-6}$ , linoleic acid, LA)是一种多不饱和脂肪酸(PUFA), 被认为是人和动物体内的必需脂肪酸(EFA), 因其能降低血液胆固醇含量, 以及预防动脉粥样硬化而倍受重视<sup>[1]</sup>。其属于细胞膜脂类中的一种, 广泛分布于植物油中, 在罂粟籽油、红花籽油、葵花籽油和玉米油等中所占的比例均超过50%<sup>[2]</sup>。大部分淡水、温水鱼类同所有脊椎动物一样, 不能在体内从头合成PUFA, 但能将亚麻酸(18:3n-3)和亚油酸去饱和和延伸为长

链高度不饱和脂肪酸(LC-HUFA), 如花生四烯酸(20:4n-6, ARA)、二十碳五烯酸(20:5n-3, EPA)和二十二碳六烯酸(22:6n-3, DHA)<sup>[3]</sup>, 这一过程由亚油酸和亚麻酸通过交替的去饱和作用和延长碳链作用来完成, 其作用过程主要受去饱和酶和延长酶的调控<sup>[4]</sup>。

吉富品系罗非鱼(GIFT)是遗传性状改良后的尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*), 其含肉率较高, 必需氨基酸种类齐全且含量丰富, 肌肉中

收稿日期: 2015-03-25; 修订日期: 2015-06-18.

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-49); 农业部公益性行业科研专项经费项目(201003020).

作者简介: 田娟(1983-), 女, 博士研究生, 主要从事鱼类营养学研究. E-mail: tianjuan0303@163.com

通信作者: 文华, 博士, 研究员, 主要从事鱼类营养与饲料研究. E-mail: wenhua.hb@163.com

EPA、DHA 和必需微量元素均比较丰富,是一种具有较高营养价值和经济价值的鱼类<sup>[5]</sup>。目前关于罗非鱼对 EFA 的需要种类还存在着分歧。第一种观点认为,罗非鱼只需要 n-6 脂肪酸作为 EFA<sup>[3,6]</sup>;第二种观点认为,n-6 脂肪酸和 n-3 脂肪酸在罗非鱼中的作用效果是等同的<sup>[7-8]</sup>;第三种观点则认为,除 n-6 脂肪酸外,添加 n-3 脂肪酸对罗非鱼的生长有加成作用<sup>[9]</sup>。同时,分析已报道的罗非鱼 n-6 脂肪酸需要量的研究结果,发现罗非鱼对 n-6 脂肪酸的需要量与其品系有关。例如,齐氏罗非鱼(*Tilapia zillii*)获最大增重需 1%的亚油酸或 ARA<sup>[10]</sup>;奥尼罗非鱼(*O. aureus*×*O. niloticus*)为 1.14%<sup>[9]</sup>;而尼罗罗非鱼对亚油酸的需要量较低,为 0.5%<sup>[6]</sup>。另外,在对吉富罗非鱼其他营养素的研究发现,体重亦是影响其营养素需要量的一个重要因素,如脂肪<sup>[11]</sup>、磷<sup>[12]</sup>、烟酸<sup>[13]</sup>等,而上述关于罗非鱼 n-6 脂肪酸需要量的研究都是集中于体重<10 g 的幼鱼阶段。目前关于体重>50 g 罗非鱼对 n-6 脂肪酸需要量的研究还未见报道。因此,本研究以玉米油来调节饲料亚油酸水平,研究亚油酸水平对体重约 60 g 吉富罗非鱼生长性能、血清生化指标以及脂肪酸组成的影响,旨在确定体重>50 g 的吉富罗非鱼对饲料亚油酸的需要量。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料配制

实验饲料采用半纯化饲料,以酪蛋白、明胶和豆粕为蛋白源,糊精和面粉为糖源,玉米油(购自湖北省中昌植物油有限公司)和棕榈酸为脂肪源(棕榈酸即十六烷酸, C<sub>16:0</sub>, 其为罗非鱼肌肉里的最主要饱和脂肪酸<sup>[5]</sup>),所设计的饲料脂肪水平为 8%左右,满足罗非鱼对脂肪的需要量<sup>[14]</sup>,并确保各组饲料等氮等能。本实验采用单因子浓度梯度法配制 7 种不同亚油酸水平的实验饲料,玉米油的添加量分别为占饲料干重的 0%、0.5%、1.0%、2.0%、4.0%、6.0%和 8.0%,其添加水平的增减用棕榈酸来调平。根据饲料脂肪酸组成与饲料粗脂肪含量来计算,7 组饲料所含的亚油酸含量分别为 0.07%(对照组)、0.36%、0.61%、1.03%、

2.00%、3.00%和 4.15%。各原料粉碎过 60 目筛,称重后混匀,少量的成分采用逐级扩大法混合,用饲料机制成直径为 2 mm、长约 6 mm 的圆柱形颗粒,自然风干后,选取颗粒大小适宜的饲料用胶袋密封,置于冰柜中冷藏备用。所用实验饲料配方见表 1,玉米油和饲料脂肪酸组成见表 2。

### 1.2 实验鱼和饲养管理

实验鱼为广西罗非鱼国家级育种实验场繁育的 1 冬龄吉富罗非鱼,运回室内养殖车间后暂养于水泥池(半径 2 m,水深 0.6 m)。正式实验开始前用对照组饲料驯养 2 周,使其适应实验环境及实验饲料。正式实验时,鱼体饥饿 24 h 后,选取体质健壮、规格整齐,初始体重为(60.98±3.82) g 的实验鱼 630 尾,随机分为 7 组,每组设 3 个重复,每个重复 30 尾,饲养于水泥池中(半径 1.25 m,水深 0.6 m)。养殖实验持续 10 周,每天投喂 3 次(8:30、12:30 和 16:30 各 1 次),采用表观饱食投喂法,投饲率 3%~5%,根据鱼体生长摄食情况和水温等环境状况及时调整投饲量。每日记录水温、罗非鱼摄食行为和死亡数量等,每两天通过虹吸清理水泥池污物,池内连续通气保持常流水,养殖所用水为经过沙滤的湖水,养殖期间水温(28±4)°C,溶氧大于 5 mg/L。

### 1.3 样品采集

养殖实验开始前,实验鱼饥饿 24 h 后,随机选取 6 尾鱼,使用 MS-222 (100 mg/L)将样品鱼麻醉,保存于-80°C 的冰箱中,用于初始鱼体成分分析。养殖实验结束后,将鱼体饥饿 24 h,以水泥池为单位计数并称重。每池随机取 3 尾麻醉的样品鱼,先砍碎后再用绞肉机搅碎,进行混合均匀后,取约 50 g 肉泥用于测定全鱼基本营养成分组成。另外再取 3 尾样品鱼用于测定鱼体生长性能、血清生化指标和组织基本成分及脂肪酸组成。具体操作如下:先测量体重;再从尾静脉取血,全血在 4°C 下静置 4 h 后,以 3000 r/min 离心 10 min,制得血清;然后解剖取出内脏并称重,再分离出肝脏称重后保存;最后取肌肉(第一根背鳍至最后一根背鳍之间,侧线以上白肌)。将所有样品存放在-80°C 冰箱备用。

表 1 实验饲料配方及营养组成  
Tab. 1 Formula and proximate composition of the experimental diets

成分 ingredient	饲料亚油酸水平/% dietary LA level						
	0.07	0.36	0.61	1.03	2.00	3.00	4.15
酪蛋白 casein	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
明胶 glutin	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
豆粕 soybean meal	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0
糊精 dextrin	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5
面粉 wheat starch	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
玉米油 corn oil	0.0	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0
十六烷酸 palmitic acid	8.0	7.5	7.0	6.0	4.0	2.0	0.0
纤维素 cellulose	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98	9.98
丁基羟基甲苯 BHT	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
磷酸二氢钙 CaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
维生素 <sup>1)</sup> vitamin premix <sup>1)</sup>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
矿物质 <sup>2)</sup> mineral premix <sup>2)</sup>	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
氯化胆碱 choline chloride	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
合计 total	100	100	100	100	100	100	100
营养组成 proximate composition							
水分 moisture	12.14	12.12	12.06	12.10	12.21	11.80	12.12
粗蛋白 crude protein	28.75	28.60	28.90	28.48	28.84	28.24	28.82
粗脂肪 crude lipid	8.12	8.14	8.12	8.11	8.21	8.14	8.16
灰分 ash	3.66	3.86	3.75	3.42	3.93	3.89	3.78

注: 1) 维生素预混料由下列成分组成(mg/g 预混料): 硫胺素盐酸盐, 5; 核黄素, 10; 泛酸钙, 10; D-生物素, 0.6; 盐酸吡哆醇, 4; 叶酸, 1.5; 肌醇, 200; L-维生素 C-2-磷酸镁, 60; 烟酸, 6.05;  $\alpha$ -维生素 E 醋酸酯, 50; 维生素 K, 4; 视黄醇醋酸酯, 2000IU 和维生素 D<sub>3</sub>, 400IU, 再用微晶纤维素添加至 1 g. 2) 矿物质预混料由下列成分组成(mg/g 预混料): 磷酸二氢钙, 135.8; 乳酸钙, 327; 硫酸亚铁, 2.125; 硫酸镁, 137; 磷酸二氢钠, 87.2; 氯化钠, 43.5; 氯化铝, 0.15; 碘酸钾, 0.125; 氯化钾, 75; 氯化铜, 0.1; 硫酸锰, 0.80; 氯化钴, 1 和硫酸锌 3, 再用微晶纤维素添加至 1 g.

Notes: 1) the vitamin mixture supplied the following (mg/g mixture): thiamin hydrochloride, 5; riboflavin, 10; calcium pantothenate, 10; D-biotin, 0.6; pyridoxine hydrochloride, 4; folic acid, 1.5; inositol, 200; L-ascorbyl-2-monophosphate-Mg, 60; nicotinic acid, 6.05;  $\alpha$ -tocopheryl acetate, 50; menadione, 4; retinol acetate, 2000IU and cholecaliferol, 400 IU. All ingredients were diluted with Micro-cellulose to 1 g. 2) the mineral mixture supplied the following (mg/g diet): Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O, 135.8; Ca(CH<sub>3</sub>CHOHCOO)<sub>2</sub>·5H<sub>2</sub>O, 327; FeSO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O, 2.125; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 137; NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 87.2; NaCl, 43.5; AlCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, 0.15; KIO<sub>3</sub>, 0.125; KCl, 75; CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0.1; MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 0.80; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 1 and ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 3. All ingredients were diluted with micro-cellulose to 1 g.

表 2 玉米油及实验饲料脂肪酸组成(占总脂肪酸百分比)  
Tab. 2 Fatty acids composition of the experimental diets and corn oil (% by weight of total fatty acids)

脂肪酸 fatty acid	玉米油 corn oil	饲料亚油酸水平/% dietary LA level						
		0.07	0.36	0.61	1.03	2.00	3.00	4.15
C <sub>14:0</sub>	0.10	0.21	0.15	0.17	0.16	0.15	0.16	0.15
C <sub>16:0</sub>	15.23	97.79	92.52	87.44	78.93	59.04	38.69	15.18
C <sub>16:1n-7</sub>	0.10	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.10
C <sub>18:0</sub>	1.57	0.42	0.38	0.49	0.63	0.96	1.31	1.68
C <sub>18:1n-9</sub>	28.53	0.36	2.01	3.70	6.74	13.89	21.21	29.69
C <sub>18:2n-6</sub>	52.08	0.82	4.52	7.67	12.90	25.05	37.47	51.81
C <sub>18:3n-3</sub>	1.38	0.31	0.34	0.41	0.47	0.59	0.73	0.86
C <sub>20:0</sub>	0.20	0.03	0.03	0.05	0.08	0.14	0.21	0.30
C <sub>20:1n-9</sub>	0.21	0.02	0.02	0.04	0.06	0.12	0.17	0.23
ΣUFA	82.9	1.55	6.92	11.85	20.20	39.70	59.63	82.70

## 1.4 指标测定

**1.4.1 生长性能指标测定** 根据以下公式, 计算成活率(SR)、增重率(WGR)、饲料效率(FER)、蛋白质效率(PER)、蛋白沉积率(PRR)、肝体比(HSI)和脏体比(VSI)。

成活率(SR, %)=终尾数×100/初尾数

增重率(WGR, %)= $100 \times (W_t - W_0) / W_0$ ;

饲料效率(FER, %)= $100 \times (W_t - W_0) / W_f$ ;

蛋白质效率(PER, %)= $100 \times (W_t - W_0) / (W_f \times P)$

蛋白沉积率(PRR, %)= $100 \times (W_t \times P_t - W_0 \times P_0) / (W_f \times P)$

肝体比(HSI, %)= $100 \times W_h / W$ ;

脏体比(VSI, %)= $100 \times W_v / W$ ;

式中,  $W_t$ 代表终末平均体重(g),  $W_0$ 代表初始平均体重(g),  $W_f$ 为投喂饲料的总质量(g),  $P$ 为饲料中粗蛋白绝干含量(%),  $P_t$ 为终末鱼体的粗蛋白质量分数(%),  $P_0$ 为初始鱼体的粗蛋白质量分数(%),  $W$ 为样品鱼体重(g),  $W_h$ 为样品鱼体肝脏质量(g),  $W_v$ 为样品鱼体内脏质量(g)。

**1.4.2 常规营养成分测定** 饲料水分含量采用 105℃恒温干燥失重法测定(GB/T5009.3); 肌肉、肝和全鱼水分含量采用冷冻干燥法测定, 即, 使用 CHRIST 型冷冻干燥机冷冻干燥 48 h; 粗蛋白采用凯氏定氮法(GB/T 5009.5); 粗脂肪采用索氏抽提法(GB/T 5009.6); 粗灰分采用灼烧称重法(GB/T 5009.4)。

**1.4.3 脂肪酸组成的测定** 样品前处理: 称取约 0.5 g 冷冻干燥后的粉末样品, 加入 15 mL 混合溶剂(氯仿: 甲醇=2: 1)振荡提取 3 次, 每次 5 min; 过滤, 合并滤液, 将混合溶剂置于 60℃水浴旋转蒸发仪中挥发干。加 2 mL 0.5 mol/L 氢氧化钠甲醇溶液于滤液中, 60℃水浴 30 min, 冷却后, 接着加 2 mL 25%三氟化硼甲醇溶液, 60℃水浴 20 min, 冷却; 加 2 mL 正己烷和 2 mL 饱和氯化钠溶液, 振荡萃取, 静止分层。取上清液进行脂肪酸高效气相色谱分析。

测定方法: 采用日本岛津(Shimadzu) GC-2010 测定, 色谱条件: 色谱柱 CP-WAX 30M I.D.0.32 mm, 进样口温度: 250℃, 检测器温度: 250℃, 程序升

温: 100℃(3 min)—180℃/10℃—240℃/3℃(9 min), 载气(N<sub>2</sub>)流量: 3 mL/min, 燃气(H<sub>2</sub>)流量: 47 mL/min, 助燃气(Air)流量: 400 mL/min, 分流比为 1: 10, 进样量: 1.0 μL。采用峰面积归一法进行定量分析, 求得各脂肪酸在总脂肪酸中的相对百分含量。

**1.4.4 血清生化指标测定** 血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、甘油三酯(TG)和总胆固醇(TC)的含量由全自动生化分析仪(Sysmex-800)测定, 所用试剂均购自 Sysmex 公司。

## 1.5 数据分析

数据均以平均值±标准差( $\bar{x} \pm SD$ )表示, 用 SPSS16.0 统计软件中 One-way ANOVA 进行方差分析, 并用 Duncan's 进行多重比较, 当  $P < 0.05$  时, 认为差异显著。参照 Chou 等<sup>[15]</sup>的研究对增重率、饲料效率和血清甘油三酯含量作二次回归分析, 参照 Lin 等<sup>[16]</sup>的研究对蛋白质沉积率作折线回归分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼生长性能的影响

由表 3 可知, 初始体重为(60.98±3.82) g 的吉富罗非鱼经过 10 周的饲养, 其增重率、饲料效率与蛋白质效率随亚油酸水平升高均呈现先上升后下降的趋势, 均在亚油酸水平为 1.03%时, 较对照组差异显著( $P < 0.05$ ), 且均在饲料亚油酸水平为 2.00%时达到最大值; 各亚油酸添加组蛋白质沉积率较对照组显著升高( $P < 0.05$ )。鱼体肝体比和脏体比均随亚油酸水平升高而升高, 当饲料亚油酸水平达到 0.61%时显著高于对照组( $P < 0.05$ )。饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼的成活率无显著影响( $P > 0.05$ )。2.00%组和 3.00%组摄食量显著高于对照组( $P < 0.05$ ), 其他组与对照组无显著差异( $P > 0.05$ )。

通过二次回归分析得出, 增重率( $Y$ )与饲料亚油酸水平( $X$ )的关系为:  $Y = -12.679X^2 + 63.18X + 247.88$  ( $R^2 = 0.9268$ ), 由方程得出, 亚油酸水平为 2.49%时吉富罗非鱼获得最高增重率(图 1)。以饲料亚油酸水平为自变量( $X$ ), 以饲料效率为因变量

表 3 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼生长性能的影响

Tab. 3 Effects of dietary LA levels on growth performance and feed utilization of advanced juvenile GIFT *Oreochromis niloticus*

$n=3; \bar{x} \pm SD$

指标 index	饲料亚油酸水平/% dietary LA level						
	0.07	0.36	0.61	1.03	2.00	3.00	4.15
初体重/g initial weight	60.73±3.48	60.92±3.47	61.11±3.40	61.20±3.59	61.24±3.44	60.57±3.27	61.07±3.68
末体重/g final weight	210.95±4.55 <sup>a</sup>	221.54±7.54 <sup>ab</sup>	235.40±5.90 <sup>bc</sup>	247.37±7.16 <sup>c</sup>	261.53±0.71 <sup>d</sup>	247.74±12.83 <sup>cd</sup>	242.36±15.11 <sup>bcd</sup>
增重率/% WGR	247.02±11.25 <sup>a</sup>	263.59±9.60 <sup>ab</sup>	284.62±6.37 <sup>bc</sup>	302.74±7.48 <sup>cd</sup>	332.78±4.55 <sup>d</sup>	309.04±21.37 <sup>cd</sup>	296.78±21.69 <sup>c</sup>
饲料效率/% FER	56.93±4.30 <sup>a</sup>	61.39±2.65 <sup>ab</sup>	61.23±3.53 <sup>ab</sup>	67.55±6.46 <sup>bc</sup>	75.36±0.74 <sup>d</sup>	71.36±2.69 <sup>cd</sup>	69.07±2.31 <sup>cd</sup>
蛋白质效率/% PER	198.01±5.05 <sup>a</sup>	214.66±9.27 <sup>b</sup>	211.86±3.22 <sup>b</sup>	237.18±9.63 <sup>c</sup>	258.66±3.78 <sup>d</sup>	252.68±9.51 <sup>d</sup>	239.64±8.03 <sup>c</sup>
蛋白质沉积率/% PRR	33.96±0.42 <sup>a</sup>	36.17±0.96 <sup>b</sup>	39.74±1.09 <sup>c</sup>	42.94±0.89 <sup>d</sup>	42.31±0.75 <sup>d</sup>	39.99±0.67 <sup>c</sup>	39.49±1.31 <sup>c</sup>
脏体比/% VSI	7.66±0.47 <sup>a</sup>	8.12±0.55 <sup>ab</sup>	8.74±0.63 <sup>b</sup>	9.09±0.44 <sup>c</sup>	9.72±0.90 <sup>c</sup>	9.49±0.97 <sup>c</sup>	9.10±0.94 <sup>b</sup>
肝体比/% HSI	1.62±0.18 <sup>a</sup>	1.98±0.21 <sup>ab</sup>	2.27±0.18 <sup>b</sup>	2.44±0.25 <sup>bc</sup>	2.38±0.21 <sup>bc</sup>	2.46±0.21 <sup>c</sup>	2.42±0.13 <sup>c</sup>
成活率/% SR	100	100	97.78±3.84	97.78±1.92	98.89±1.92	100	98.89±1.92
摄食量/kg feed intake	7.45±0.29 <sup>a</sup>	7.85±0.06 <sup>ab</sup>	7.70±0.24 <sup>ab</sup>	7.57±0.21 <sup>ab</sup>	7.95±0.14 <sup>b</sup>	7.96±0.21 <sup>b</sup>	7.75±0.20 <sup>ab</sup>

注: 同行上标字母不同代表不同亚油酸水平间显著差异( $P<0.05$ ).

Note: Different letters in the same row indicate significant difference among different dietary LA levels ( $P<0.05$ ).

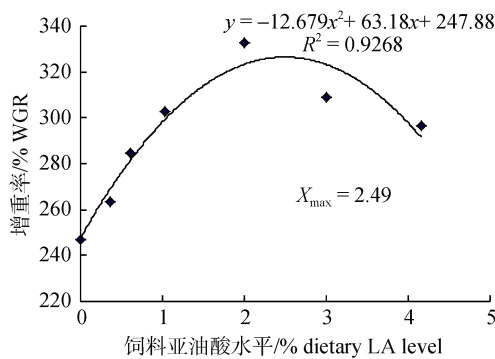


图 1 饲料亚油酸水平与增重率二次回归分析

Fig. 1 Quadratic regression analysis between weight gain rate(WGR) and dietary LA level

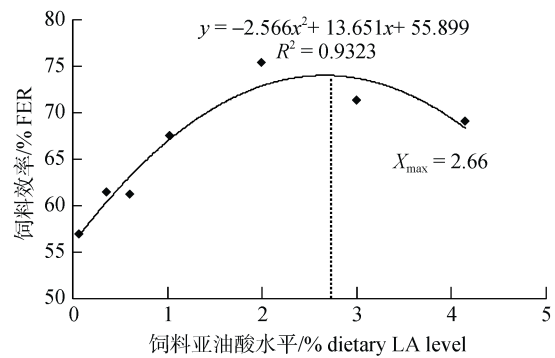


图 2 饲料亚油酸水平与饲料效率二次回归分析

Fig. 2 Quadratic regression analysis between feed efficiency rate(FER) and dietary LA level

(Y) 得回归方程:  $Y = -2.566X^2 + 13.651X + 55.899$  ( $R^2 = 0.932$ ), 得出饲料亚油酸水平为 2.66%时, 吉富罗非鱼获得最佳饲料效率(图 2)。以饲料亚油酸水平为自变量(X), 以蛋白质效率为因变量(Y)作折线回归, 得回归方程:  $Y = 9.6478X + 33.213$  ( $R^2 = 0.9844$ )和  $Y = -1.2187X + 44.283$  ( $R^2 = 0.9189$ )。通过折线法求得两直线相交值, 即饲料亚油酸水平为 1.02%时, 吉富罗非鱼获得最大蛋白沉积率(图 3)。

### 2.2 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼体成分的影响

由表 4 可知, 0.36%组、0.61%组和 1.03%组全鱼粗蛋白和水分含量较对照组显著升高( $P<0.05$ ), 其他组粗蛋白含量与对照组无显著差异( $P>0.05$ ), 2.00%组水分含量较对照组显著降低

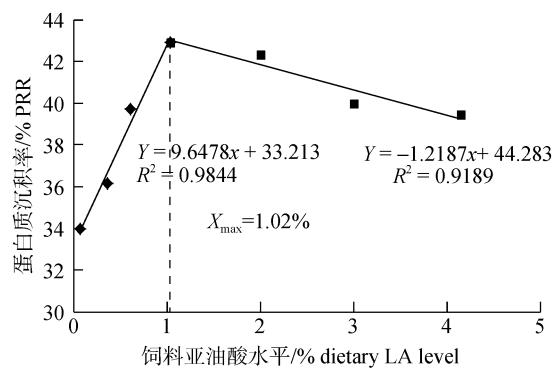


图 3 饲料亚油酸水平对蛋白沉积率影响的折线回归分析

Fig. 3 Broken-line regression analysis between dietary LA level and protein reservation rate(PRR)

( $P<0.05$ ); 0.36%组和 0.61%组粗脂肪含量较对照组显著降低( $P<0.05$ ), 其他组显著高于对照组

表 4 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼体成分的影响  
 Tab. 4 Effect of dietary LA levels on the composition of whole body, muscle and liver of advanced juvenile GIFT *Oreochromis niloticus*

$n=3; \bar{x} \pm SD; \%$

指标 index	饲料亚油酸水平/% dietary LA level						
	0.07	0.36	0.61	1.03	2.00	3.00	4.15
全鱼 whole body							
粗蛋白 crude protein	16.26±0.08 <sup>a</sup>	16.77±0.14 <sup>b</sup>	16.82±0.14 <sup>b</sup>	16.57±0.14 <sup>b</sup>	16.24±0.14 <sup>a</sup>	16.14±0.10 <sup>a</sup>	16.30±0.15 <sup>a</sup>
粗脂肪 crude lipid	7.94±0.40 <sup>b</sup>	6.78±0.22 <sup>a</sup>	6.40±0.27 <sup>a</sup>	8.83±0.23 <sup>c</sup>	11.87±0.14 <sup>d</sup>	9.91±0.32 <sup>c</sup>	9.82±0.33 <sup>c</sup>
水分 moisture	67.58±0.81 <sup>b</sup>	69.49±1.30 <sup>c</sup>	69.18±0.83 <sup>c</sup>	69.00±0.18 <sup>c</sup>	65.77±0.58 <sup>a</sup>	68.78±0.62 <sup>bc</sup>	67.11±0.79 <sup>ab</sup>
灰分 ash	2.58±0.24 <sup>bc</sup>	2.60±0.06 <sup>bc</sup>	2.73±0.23 <sup>c</sup>	2.78±0.03 <sup>c</sup>	2.68±0.24 <sup>bc</sup>	2.23±0.07 <sup>a</sup>	2.39±0.10 <sup>a</sup>
肌肉 muscle							
粗蛋白 crude protein	19.55±0.07	19.13±0.54	19.76±0.20	20.12±0.38	19.98±0.63	19.50±0.62	19.21±0.81
粗脂肪 crude lipid	1.10±0.04 <sup>a</sup>	1.42±0.06 <sup>b</sup>	1.54±0.03 <sup>b</sup>	1.55±0.04 <sup>b</sup>	1.79±0.07 <sup>bc</sup>	1.88±0.04 <sup>c</sup>	1.89±0.05 <sup>c</sup>
水分 moisture	76.97±0.20	76.43±0.18	76.36±0.29	77.03±0.55	76.11±0.66	76.46±0.59	76.64±0.34
肝 liver							
粗蛋白 crude protein	10.70±0.35	10.45±0.43	10.31±0.15	10.56±0.31	10.51±0.38	10.13±0.47	10.08±0.26
粗脂肪 crude lipid	8.32±0.06 <sup>a</sup>	8.45±0.16 <sup>a</sup>	8.75±0.62 <sup>ab</sup>	9.45±0.33 <sup>dc</sup>	9.02±0.17 <sup>bc</sup>	9.09±0.45 <sup>bc</sup>	9.87±0.21 <sup>d</sup>
水分 moisture	67.57±1.23 <sup>a</sup>	66.32±0.76 <sup>ab</sup>	66.75±0.66 <sup>ab</sup>	65.75±0.37 <sup>cd</sup>	65.68±0.74 <sup>cd</sup>	65.38±1.01 <sup>c</sup>	64.96±0.68 <sup>d</sup>

注: 同行上标字母不同代表不同饲料亚油酸水平间显著差异( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in the same row indicate significant difference among different dietary LA levels ( $P<0.05$ ).

( $P<0.05$ ); 3.00%和 4.15%灰分含量较对照组显著降低( $P<0.05$ )。

肌肉粗蛋白和水分含量各组间均无显著差异( $P>0.05$ ); 肌肉粗脂肪含量随饲料亚油酸水平升高而显著增加, 亚油酸添加组显著高于对照组( $P<0.05$ )。肝脏粗蛋白含量各组间均无显著差异( $P>0.05$ ); 肝脏粗脂肪含量随亚油酸水平的升高呈总体呈上升趋势, 当亚油酸水平超过 1.03%时显著高于对照组( $P<0.05$ ); 水分含量表现出与脂肪相反的变化规律, 当亚油酸水平超过 1.03%时, 水分含量显著低于对照组( $P<0.05$ )。

### 2.3 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼血清生化指标的影响

由表 5 可知, 随饲料亚油酸水平的升高, 血清甘油三酯(TG)和总胆固醇(TCHO)变化趋势一致, 呈现先下降后上升的趋势, 均在亚油酸为水平为 1.03%时值最小; 血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量亚油酸添加组显著高于对照组( $P<0.05$ ), 在亚油酸为 1.03%时含量达到最大值; 低密度脂蛋白胆固醇含量(LDL-C)呈现逐

渐下降的趋势, 当亚油酸水平在 1.03%~4.15%时, 显著低于对照组( $P<0.05$ )。通过折线回归分析得出, 血清甘油三酯( $Y$ )与饲料亚油酸水平( $X$ )的关系为:  $Y = -2.5393X + 5.8241$  ( $R^2 = 0.9695$ )和  $Y = 1.4839X + 1.2635$  ( $R^2 = 0.9741$ ), 由方程得出, 亚油酸水平为 1.13%时吉富罗非鱼血清甘油三酯最低(图 4)。

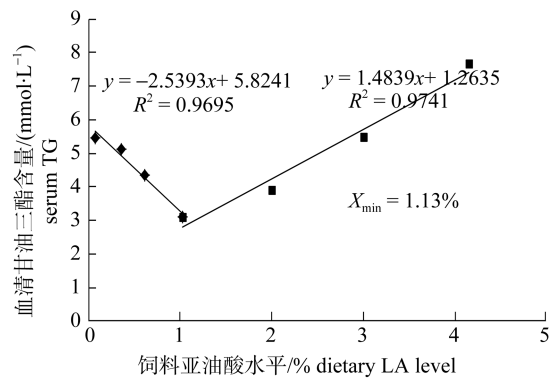


图 4 饲料亚油酸水平对血清甘油三酯影响的折线回归分析

Fig.4 Broken-line regression analysis between dietary LA level and serum triglyceride

表 5 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼血清生化指标的影响  
 Tab. 5 Effect of dietary LA levels on serum biochemical indexes of advanced juvenile GIFT *Oreochromis niloticus*

n=6;  $\bar{x} \pm SD$

指标 index	饲料亚油酸水平/% dietary LA level						
	0.07	0.36	0.61	1.03	2.00	3.00	4.15
甘油三酯/(mmol·L <sup>-1</sup> )TG	5.46±0.84 <sup>c</sup>	5.13±0.82 <sup>cc</sup>	4.35±0.58 <sup>bc</sup>	3.10±0.64 <sup>a</sup>	3.91±0.51 <sup>ab</sup>	5.48±0.65 <sup>d</sup>	7.67±0.48 <sup>d</sup>
总胆固醇/(mmol·L <sup>-1</sup> )TCHO	4.60±0.22 <sup>d</sup>	3.78±0.22 <sup>ab</sup>	3.78±0.26 <sup>ab</sup>	3.64±0.25 <sup>a</sup>	4.07±0.31 <sup>bc</sup>	4.13±0.36 <sup>bc</sup>	4.23±0.13 <sup>cd</sup>
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol·L <sup>-1</sup> )HDL-C	0.58±0.06 <sup>a</sup>	0.86±0.04 <sup>bc</sup>	0.82±0.05 <sup>bc</sup>	0.94±0.10 <sup>c</sup>	0.83±0.07 <sup>bc</sup>	0.82±0.09 <sup>bc</sup>	0.79±0.05 <sup>b</sup>
低密度脂蛋白胆固醇/(mmol·L <sup>-1</sup> )LDL-C	0.81±0.02 <sup>c</sup>	0.74±0.06 <sup>c</sup>	0.73±0.10 <sup>c</sup>	0.57±0.07 <sup>b</sup>	0.55±0.06 <sup>b</sup>	0.58±0.06 <sup>b</sup>	0.42±0.07 <sup>a</sup>

注: 同行上标字母不同代表不同亚油酸水平间显著差异(P<0.05).

Note: Different letters in the same row indicate significant difference among different dietary LA levels (P<0.05).

2.4 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼肌肉脂肪酸组成的影响

本实验分析了吉富罗非鱼肌肉中的 15 种脂肪酸, 包括 4 种饱和脂肪酸(SFA), 3 种单不饱和脂肪酸(MUFA), 4 种 n-6 系列多不饱和脂肪酸(PUFA) 和 4 种 n-3 系列 PUFA。吉富罗非鱼肌肉脂肪酸组

成受到饲料中脂肪酸组成的影响。由表 6 可知, 在 SFA 含量方面, 随着饲料亚油酸水平的升高, C<sub>14:0</sub>、C<sub>16:0</sub> 和 ΣSFA 含量逐渐下降, 当亚油酸水平为 2.00%~4.15%时, 以上 3 个指标均显著低于对照组(P<0.05); 各组 C<sub>18:0</sub> 无显著性差异(P>0.05)。在 n-6 PUFA 含量方面, 随饲料亚油酸水平

表 6 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼肌肉脂肪酸组成的影响  
 Tab. 6 Effects of dietary LA levels on fatty acid composition of muscle of advanced juvenile GIFT *Oreochromis niloticus* (% by weight of total fatty acids)

n=3;  $\bar{x} \pm SD$ ; %

脂肪酸 fatty acid	饲料亚油酸水平 dietary LA level						
	0.07	0.36	0.61	1.03	2.00	3.00	4.15
14: 0	2.29±0.17 <sup>cd</sup>	2.35±0.07 <sup>d</sup>	2.21±0.28 <sup>cd</sup>	1.96±0.04 <sup>bc</sup>	1.93±0.20 <sup>ab</sup>	1.71±0.20 <sup>a</sup>	1.69±0.16 <sup>a</sup>
16: 0	38.53±0.34 <sup>de</sup>	39.75±1.95 <sup>c</sup>	38.58±0.86 <sup>de</sup>	37.36±0.76 <sup>d</sup>	33.02±0.37 <sup>c</sup>	29.56±1.22 <sup>b</sup>	23.60±0.32 <sup>a</sup>
16: 1n-7	7.59±0.83 <sup>c</sup>	7.57±0.34 <sup>c</sup>	6.79±0.92 <sup>de</sup>	5.98±0.74 <sup>cd</sup>	5.26±0.54 <sup>bc</sup>	4.18±0.71 <sup>b</sup>	2.96±0.39 <sup>a</sup>
18: 0	6.02±0.76	6.00±0.83	5.81±0.63	5.87±0.31	5.35±0.21	5.23±0.54	5.30±0.24
18: 1n-9	33.17±0.58	31.74±1.67	31.46±2.34	30.76±2.77	32.15±0.66	33.05±1.03	33.51±1.00
18: 2n-6	4.78±0.49 <sup>a</sup>	6.02±0.64 <sup>ab</sup>	7.87±2.01 <sup>b</sup>	10.63±1.46 <sup>c</sup>	15.62±0.55 <sup>d</sup>	19.49±2.06 <sup>e</sup>	25.63±0.71 <sup>f</sup>
18: 3n-6	0.44±0.04 <sup>a</sup>	0.50±0.03 <sup>ab</sup>	0.60±0.03 <sup>bc</sup>	0.68±0.09 <sup>c</sup>	0.85±0.05 <sup>d</sup>	0.93±0.11 <sup>de</sup>	0.98±0.03 <sup>e</sup>
18: 3n-3	0.22±0.01 <sup>a</sup>	0.27±0.05 <sup>ab</sup>	0.27±0.06 <sup>ab</sup>	0.32±0.01 <sup>bc</sup>	0.30±0.02 <sup>bc</sup>	0.30±0.02 <sup>bc</sup>	0.36±0.02 <sup>c</sup>
20: 0	0.10±0.01 <sup>ab</sup>	0.10±0.01 <sup>ab</sup>	0.09±0.01 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>ab</sup>	0.11±0.01 <sup>ab</sup>	0.12±0.01 <sup>b</sup>	0.15±0.02 <sup>c</sup>
20: 1n-9	1.37±0.14 <sup>b</sup>	1.23±0.01 <sup>ab</sup>	1.24±0.10 <sup>ab</sup>	1.15±0.08 <sup>a</sup>	1.10±0.03 <sup>a</sup>	1.20±0.04 <sup>a</sup>	1.18±0.03 <sup>a</sup>
20: 3n-6	0.60±0.01 <sup>a</sup>	0.64±0.10 <sup>a</sup>	0.78±0.23 <sup>ab</sup>	0.82±0.18 <sup>ab</sup>	0.81±0.08 <sup>b</sup>	0.88±0.06 <sup>b</sup>	1.04±0.06 <sup>c</sup>
20: 4n-6 (ARA)	2.05±0.11	2.02±0.32	2.41±0.71	2.50±0.42	2.32±0.23	2.23±0.16	2.55±0.31
20: 5n-3(EPA)	0.00±0.00 <sup>a</sup>	0.11±0.02 <sup>c</sup>	0.10±0.03 <sup>c</sup>	0.09±0.02 <sup>c</sup>	0.04±0.02 <sup>b</sup>	0.06±0.02 <sup>b</sup>	0.05±0.01 <sup>b</sup>
22: 5n-3	0.34±0.07 <sup>c</sup>	0.35±0.09 <sup>c</sup>	0.32±0.07 <sup>bc</sup>	0.32±0.06 <sup>bc</sup>	0.21±0.05 <sup>ab</sup>	0.20±0.04 <sup>a</sup>	0.17±0.05 <sup>a</sup>
22: 6n-3(DHA)	1.52±0.35 <sup>b</sup>	1.34±0.24 <sup>ab</sup>	1.48±0.58 <sup>b</sup>	1.45±0.33 <sup>ab</sup>	0.92±0.12 <sup>ab</sup>	0.86±0.18 <sup>a</sup>	0.85±0.17 <sup>a</sup>
ΣSFA	47.38±1.08 <sup>de</sup>	48.20±1.29 <sup>de</sup>	46.69±1.62 <sup>de</sup>	45.31±0.98 <sup>d</sup>	40.41±0.44 <sup>c</sup>	36.62±1.45 <sup>b</sup>	30.73±0.59 <sup>a</sup>
Σn-3 PUFA	2.33±0.16 <sup>b</sup>	2.07±0.37 <sup>ab</sup>	2.17±0.72 <sup>ab</sup>	2.18±0.42 <sup>ab</sup>	1.48±0.21 <sup>a</sup>	1.42±0.26 <sup>a</sup>	1.42±0.24 <sup>a</sup>
Σn-6 PUFA	7.81±0.60 <sup>a</sup>	9.19±0.85 <sup>ab</sup>	11.65±2.97 <sup>bc</sup>	14.63±2.12 <sup>c</sup>	19.61±0.83 <sup>d</sup>	23.53±2.27 <sup>e</sup>	30.19±0.74 <sup>f</sup>
n-6/n-3	3.35±0.03 <sup>a</sup>	4.48±0.42 <sup>a</sup>	5.45±0.38 <sup>a</sup>	6.76±0.46 <sup>a</sup>	13.39±1.28 <sup>b</sup>	17.07±3.99 <sup>b</sup>	21.58±3.31 <sup>c</sup>

注: 同行上标字母不同代表不同亚油酸水平间显著差异(P<0.05).

Note: Different letters in the same row indicate significant difference among different dietary LA levels (P<0.05).

的升高, 除  $C_{20:4n-6}$  外, 其他 n-6 PUFA 含量均随之不断升高,  $C_{18:2n-6}$ 、 $C_{18:3n-6}$ 、 $C_{20:3n-6}$  和  $\Sigma n-6$  的含量分别在亚油酸水平超过 0.61%、0.61%、2.00% 和 0.61% 的条件下, 较对照组显著升高 ( $P < 0.05$ )。在 n-3 PUFA 方面, 除  $C_{18:3n-3}$  外, 其他 n-3 PUFA 均呈下降趋势;  $C_{20:5n-3}$  在对照组中未检出, 而在亚油酸添加组中, 其含量随亚油酸水平的升高而下降。

### 2.5 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼肝脏脂肪酸组成的影响

饲料中脂肪酸组成亦影响吉富罗非鱼肝脏脂肪酸组成(表 7), 变化趋势与肌肉脂肪酸的变化趋势类似。随饲料亚油酸水平的升高, 各组吉富罗非鱼肝脏的  $\Sigma SFA$  含量呈下降的趋势, 当亚油酸水平超过 1.03% 时, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。  $\Sigma n-6$  PUFA 含量随饲料亚油酸水平增加而上升, 当亚

油酸水平达到 1.03% 时, 较对照组差异显著 ( $P < 0.05$ )。  $\Sigma n-3$  PUFA 含量整体呈下降趋势, 但亚油酸添加组与对照组差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 饲料亚油酸水平对罗非鱼生长性能的影响

大多动物体内能够合成饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸, 鱼虾自身可合成 n-7、n-9 系列不饱和脂肪酸, 但是不能合成 n-3 和 n-6 系列不饱和脂肪酸, 因此 n-3、n-6 系列不饱和脂肪酸为鱼类的必需脂肪酸(EFA), 淡水鱼类的 EFA 一般认为是亚油酸、亚麻酸和花生四烯酸等, 不同种类的鱼所需 EFA 的种类和需要量有所不同<sup>[3, 17]</sup>。尽管在罗非鱼对 EFA 的需要量在种类上存在争议, 但更多的研究表明, 罗非鱼主要需要 n-6 系列不饱和脂肪酸<sup>[6, 8-9, 18]</sup>。在本研究中, 对照组饲料主要含  $C_{16:0}$ ,

表 7 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼肝脏脂肪酸组成的影响

Tab. 7 Effect of dietary LA levels on liver fatty acid composition of advanced juvenile GIFT *Oreochromis niloticus* (% by weight of total fatty acids)

脂肪酸 fatty acid	饲料亚油酸水平/% dietary LA level						
	0.07	0.36	0.61	1.03	2.00	3.00	4.15
14: 0	3.91±0.44 <sup>c</sup>	3.79±0.45 <sup>c</sup>	3.73±0.34 <sup>c</sup>	3.31±1.07 <sup>bc</sup>	3.03±0.52 <sup>ab</sup>	2.50±0.24 <sup>a</sup>	2.77±0.31 <sup>ab</sup>
16: 0	35.83±0.68 <sup>de</sup>	37.00±1.81 <sup>c</sup>	34.11±0.86 <sup>cd</sup>	33.08±0.89 <sup>c</sup>	30.85±0.81 <sup>b</sup>	28.58±0.86 <sup>a</sup>	26.85±1.50 <sup>a</sup>
16: 1n-7	6.85±0.50 <sup>ab</sup>	7.30±1.15 <sup>a</sup>	7.00±0.16 <sup>ab</sup>	6.19±1.06 <sup>ab</sup>	5.78±0.27 <sup>bc</sup>	4.76±0.62 <sup>ab</sup>	4.35±0.42 <sup>a</sup>
18: 0	11.02±0.56	9.81±1.04	10.97±1.13	10.46±0.77	10.87±0.16	10.26±1.24	9.80±0.73
18: 1n-9	37.73±1.26 <sup>ab</sup>	36.17±2.76 <sup>a</sup>	38.28±1.48 <sup>ab</sup>	39.34±0.21 <sup>bc</sup>	42.09±1.33 <sup>cd</sup>	42.29±1.65 <sup>d</sup>	42.51±1.40 <sup>d</sup>
18: 2n-6	1.48±0.50 <sup>a</sup>	2.38±0.90 <sup>abc</sup>	2.04±0.38 <sup>ab</sup>	4.12±0.95 <sup>c</sup>	3.97±1.06 <sup>bc</sup>	7.73±1.22 <sup>d</sup>	9.88±1.78 <sup>c</sup>
18: 3n-6	0.14±0.01 <sup>a</sup>	0.22±0.08 <sup>ab</sup>	0.18±0.03 <sup>ab</sup>	0.26±0.03 <sup>b</sup>	0.23±0.07 <sup>b</sup>	0.36±0.03 <sup>c</sup>	0.45±0.03 <sup>d</sup>
18: 3n-3	0.08±0.03 <sup>a</sup>	0.11±0.04 <sup>b</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.11±0.03 <sup>ab</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.10±0.02 <sup>ab</sup>	0.12±0.00 <sup>b</sup>
20: 0	0.08±0.01 <sup>ab</sup>	0.08±0.01 <sup>ab</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>	0.09±0.03 <sup>ab</sup>	0.08±0.00 <sup>ab</sup>	0.10±0.02 <sup>c</sup>	0.14±0.01 <sup>c</sup>
20: 1n-9	1.33±0.09	1.24±0.15	1.20±0.09	1.30±0.09	1.24±0.10	1.35±0.07	1.31±0.28
20: 3n-6	0.20±0.03 <sup>a</sup>	0.28±0.10 <sup>a</sup>	0.30±0.06 <sup>a</sup>	0.28±0.05 <sup>a</sup>	0.29±0.09 <sup>a</sup>	0.41±0.03 <sup>b</sup>	0.43±0.02 <sup>b</sup>
20: 4n-6 (ARA)	0.84±0.24	1.08±0.33	1.42±0.48	1.00±0.19	1.17±0.49	1.27±0.24	1.12±0.06
20: 5n-3 (EPA)	0.02±0.00	0.03±0.01	0.02±0.00	0.03±0.02	0.01±0.00	0.02±0.01	0.03±0.00
22: 5n-3	0.06±0.02 <sup>ab</sup>	0.09±0.03 <sup>b</sup>	0.08±0.02 <sup>b</sup>	0.06±0.01 <sup>ab</sup>	0.04±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.03 <sup>a</sup>	0.03±0.01 <sup>a</sup>
22: 6n-3 (DHA)	0.43±0.18 <sup>ab</sup>	0.42±0.12 <sup>b</sup>	0.54±0.19 <sup>b</sup>	0.36±0.10 <sup>ab</sup>	0.28±0.09 <sup>a</sup>	0.24±0.03 <sup>a</sup>	0.25±0.05 <sup>a</sup>
$\Sigma SFA$	50.84±1.02 <sup>d</sup>	50.68±0.91 <sup>d</sup>	48.87±1.66 <sup>cd</sup>	46.95±0.60 <sup>bc</sup>	44.83±1.21 <sup>b</sup>	41.45±1.62 <sup>a</sup>	39.55±2.19 <sup>a</sup>
$\Sigma n-3$ PUFA	0.59±0.18 <sup>ab</sup>	0.65±0.20 <sup>ab</sup>	0.71±0.22 <sup>b</sup>	0.56±0.17 <sup>ab</sup>	0.40±0.12 <sup>a</sup>	0.39±0.03 <sup>a</sup>	0.43±0.06 <sup>ab</sup>
$\Sigma n-6$ PUFA	2.67±0.54 <sup>a</sup>	3.96±1.41 <sup>ab</sup>	3.94±0.73 <sup>ab</sup>	5.66±1.00 <sup>b</sup>	5.65±1.70 <sup>b</sup>	9.77±1.06 <sup>c</sup>	11.87±1.76 <sup>c</sup>
n-6/n-3	4.71±1.35 <sup>a</sup>	6.04±0.38 <sup>a</sup>	5.75±1.09 <sup>a</sup>	10.36±1.30 <sup>ab</sup>	14.13±1.12 <sup>b</sup>	25.03±4.17 <sup>c</sup>	28.57±7.63 <sup>c</sup>

注: 同行上标字母不同代表不同饲料亚油酸水平间显著差异 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different letters in the same row indicate significant difference among different dietary LA levels ( $P < 0.05$ ).



只含微量 n-6 PUFA, 但其成活率达到 100%, 并且养殖 10 周增重率为 247%。这表明饲料中缺乏必需脂肪酸, 对初始体重(60.98±3.82) g 吉富罗非鱼的成活率无不利影响, 且对生长无严重抑制作用。这可能与本研究所选用的鱼体规格有关, 对照组鱼体肌肉和肝脏中均含有 n-3 和 n-6 PUFA, 这说明在一定时间内大规格鱼体可通过消耗自身早期所蓄积的 EFA 来满足生长的需要, 若养殖实验周期进一步延长, 可能会出现明显的脂肪酸缺乏症。

尽管如此, 适量亚油酸对大规格吉富罗非鱼依然为必需的, 当亚油酸水平为 1.03%时, 其增重率、饲料效率和蛋白质效率均较对照组显著改善; 当其水平为 2.00%时, 上述 3 个指标分别较对照组提高 34.72%、32.57%和 30.63%; 但并非罗非鱼饲料 n-6 PUFA 含量越高, 其生长性能越好, 例如, 4.15%组增重率较 2.00%组降低 10.81%。对增重率和饲料效率作二次回归分析, 发现在亚油酸水平分别为 2.49%和 2.66%时获得最大增重率和最高饲料效率。同样以生长性能为评价指标, 初始体重为 3.7g 的尼罗罗非鱼幼鱼为 0.5%<sup>[6]</sup>。因吉富罗非鱼属于遗传性状改良后的尼罗罗非鱼, 在同一品系下比较, 体重亦是影响尼罗罗非鱼对亚油酸需要量的重要因素。

关于亚油酸对饲料利用的影响, 本研究与其他研究结果有所不同。Li 等<sup>[9]</sup>在饲料中添加 0.12%~2.00%的亚油酸, 奥尼罗非鱼幼鱼(3.89±0.11) g 各组间的饲料效率无显著差异; Luo 等<sup>[19]</sup>在吉富罗非鱼幼鱼饲料中添加 0~2.5%的共轭亚油酸, 对其饲料效率亦无影响; 对虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 幼鱼<sup>[20]</sup>、大西洋鲑(*Salmo salar*)<sup>[21]</sup>和团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)<sup>[22]</sup>等的研究亦表明亚油酸对饲料效率无显著影响。在黄颡鱼 (*Pelteobagrus vachelli*) 和草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 饲料中添加过高的共轭亚油酸, 饲料效率显著低于对照组<sup>[23-24]</sup>。而在奥尼罗非鱼幼鱼(0.83±0.03) g 上的研究结果与本研究结果基本一致, 饲料中添加 0~5.0%的鱼油(主要含 n-3 脂肪酸, 对照组为十二烷酸), 饲料效率在鱼油含量为

2.00%时最高<sup>[25]</sup>。经分析, 这些结果的不同主要与对照组的饲料成分有关, 本研究与 Chou 等<sup>[25]</sup>的研究相同之处在于, 对照组所添加的脂肪均为饱和脂肪酸, 所含不饱和脂肪酸非常低, 而上述其他实验对照组中含有不饱和脂肪酸, 这意味着不饱和脂肪酸与饲料利用可能有显著相关性。

另外, 本研究中蛋白质效率和蛋白质沉积率随饲料亚油酸水平的提高而先增后降, 其中 2.00%添加组较对照组分别显著提高 30.63%和 24.59%; 对蛋白质沉积率进行折线回归分析, 在亚油酸水平为 1.02%时蛋白质沉积率达到最高。以此为评价指标, 其需要量远远低于以生长性能(2.49%)或饲料效率(2.66%)为评价指标的需要量, 这说明仅从节约蛋白质作用角度分析, 在饲料粗脂肪含量相同的情况下, 饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸供能效果类似, 但两大类脂肪酸不合适的配比可能会导致养殖鱼类的生长速度及其饲料转化率下降。

### 3.2 饲料亚油酸水平对罗非鱼体组成的影响

本研究中, 全鱼粗脂肪在 0.36%组和 0.61%组较对照组显著降低, 而粗蛋白较对照组显著升高, 这表明饲料中含低水平的亚油酸可以起到降低脂肪沉积的作用, 并可改善其肉质, 可过高水平的 EFA 会导致鱼体组成出现负面的影响, 如脂肪沉积增多。本研究显示, 吉富罗非鱼肌肉和肝脏的粗脂肪含量表现为随饲料亚油酸水平增加而上升的趋势。其中肌肉粗脂肪含量的变化相比肝脏更加迅速, 吉富罗非鱼饲料中含 0.36%的亚油酸会使其肌肉脂肪含量较对照组显著增加, 而肝脏脂肪含量在饲料亚油酸含量为 1.03%时才达到显著差异。这说明在调节脂肪蓄积方面, 肝脏比肌肉的调节能力要强, 对 PUFA 利用率更高。这与对团头鲂的研究结果类似<sup>[22]</sup>。另外, 对照组肌肉和肝脏脂肪含量亦未较其他组显著提高, 这表明吉富罗非鱼可较好利用饱和脂肪酸作为能源物质, 未因饱和脂肪酸含量过高而导致肝脏和肌肉等脂肪含量沉积过多。除生长相对缓慢和饲料效率较低外, 对照组罗非鱼并未出现其他明显的必需脂肪酸缺乏症, 如肝体比、脏体比增大(本实验中的肝体比和脏体比均在亚油酸水平含量超过 0.61%时显

著高于对照组)、肝脏脂肪含量显著升高等<sup>[17]</sup>。这些在奥尼罗非鱼上亦被证实<sup>[25]</sup>。

### 3.3 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼血清生化指标的影响

高密度脂蛋白是机体胆固醇的“清扫机”,负责把胆固醇运回肝脏代谢;低密度脂蛋白作用正好相反,是向组织转运肝脏合成的内源性胆固醇的主要形式,两者在血液中分别以 HDL-C 和 LDL-C 形式运输胆固醇<sup>[26]</sup>。一般认为,血液中 HDL-C 作为血管的清道夫,可有效预防血管动脉硬化,而 LDL-C 则易引起动脉硬化<sup>[27]</sup>。在对人类的研究中发现, SFAs 会增加血浆 TCHO 和 TG 含量,而不饱和脂肪酸(UFAs)会降低血浆 LDL-C 含量,提高 HDL-C 含量,并且 PUFAs 的效果优于 MUFAs,从而 UFAs 可起到降低人类患冠状动脉粥样和心脏病等的风险<sup>[28-31]</sup>。本研究中,随饲料亚油酸水平的升高,甘油三酯和总胆固醇的变化趋势都是先下降后上升的趋势,且均在亚油酸水平为 1.03%时达到最小;亚油酸添加组血清 HDL-C 显著高于对照组。说明适量添加亚油酸能起到降低血液甘油三酯的作用,并有效提高吉富罗非鱼血液 HDL-C 含量,从而起到预防血管动脉硬化的作用;当亚油酸水平达到 1.03%时,血清 LDL-C 含量显著下降,可能与鱼体肝脏自身合成的内源性胆固醇减少有关。通过对血清甘油三酯进行折线回归分析,当饲料亚油酸水平为 1.13%时,吉富罗非鱼血清甘油三酯含量最低。以此为评价指标,其需要量同样低于以生长性能(2.49%)或饲料效率(2.66%)为评价指标的需要量,这表明饲料中高水平的亚油酸尽管对生长性能有利,但可能并不利于鱼体健康。这可能与过高含量的 PUFA 不仅不利于饲料贮藏,还可能因多不饱和脂肪酸容易在体内产生游离基有关。

### 3.4 饲料亚油酸水平对吉富罗非鱼肌肉和肝脏脂肪酸组成的影响

脂肪酸在鱼体内的转化存在着组织特异性,不同脂肪酸在不同组织中的沉积率不同<sup>[32-33]</sup>。本研究中,随着饲料中 SFA 含量的下降,吉富罗非鱼肌肉和肝中的 SFA 也呈下降趋势,且肌肉的下

降趋势较肝脏更加明显,说明肝中的 SFA 组成更加稳定,类似的结果在本实验室对罗非鱼成鱼脂肪需要量的研究中得到证实<sup>[11]</sup>,与黄颡鱼的结果亦类似<sup>[23]</sup>。随饲料中  $C_{18:1}$  含量的增加,肝中的  $C_{18:1}$  含量呈上升的趋势,而肌肉中的  $C_{18:1}$  含量无显著变化。说明  $C_{18:1}$  在吉富罗非鱼肌肉中的含量比较稳定且不受饲料脂肪酸含量变化的影响。

对虹鳟、鲤(*Cyprinus carpio*)、青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼、鳗鲡(*Anguilla Japonica*)、罗非鱼等淡水鱼类的研究表明,淡水鱼类具备利用 18 碳脂肪酸合成 20 碳或者 22 碳脂肪酸的能力<sup>[2, 34-39]</sup>。本研究中,吉富罗非鱼肌肉和肝脏中  $C_{18:2n-6}$ 、 $C_{18:3n-6}$  和  $C_{20:3n-6}$  含量与饲料中亚油酸添加之间的对应关系表明,外源性亚油酸( $C_{18:2n-6}$ )可在吉富罗非鱼体内生物转化为碳链更长、更不饱和的高度不饱和脂肪酸,而各组  $C_{20:4n-6}$  含量没有表现出显著差异,可能是本实验养殖时间较短所造成的。

在先对罗非鱼的研究中发现,尽管饲料中不含 n-3 PUFA,但罗非鱼鱼体中 n-3 PUFA 含量较高<sup>[11-12, 40]</sup>。本研究亦得到类似结果,饲料中几乎不含 n-3 PUFA,但肌肉和肝脏的 n-3 PUFA 含量分别为 1.42%~2.33%和 0.39%~0.71%。同时,组织中 n-6 PUFA 含量随饲料亚油酸的含量升高而上升,而 n-3 PUFA 含量则下降,且 n-6 PUFA 含量远远高于 n-3 PUFA 含量,例如,肌肉和肝组织中 n-6 PUFA 含量分别为 7.81%~30.19%和 2.67%~11.87%。有研究表明,作为合成更长碳链脂肪酸的前提物质,  $C_{18:2n-6}$  与  $C_{18:3n-3}$  共用相同的去饱和酶、加长酶及乙酰转移酶,生成类二十烷酸系列脂肪酸都需环氧合酶和脂氧合酶,因此 n-6 脂肪酸与 n-3 脂肪酸之间存在代谢竞争抑制<sup>[3, 41-45]</sup>。本研究的结果证实了罗非鱼体内的 n-6 脂肪酸与 n-3 脂肪酸之间存在代谢竞争抑制,且 n-6 PUFA 的合成占主导。

## 4 结论

(1) 在饲料中添加 1.03%的亚油酸即可显著提高吉富罗非鱼的生长性能以及饲料效率。经回

归分析得出, 当亚油酸水平为 2.49%、2.66%和 1.02%时, 吉富罗非鱼分别获得最大的增重率、饲料效率和蛋白沉积率; 饲料亚油酸水平为 1.13%时, 其血清 TG 含量最低。因此, 建议吉富罗非鱼饲料中的适宜亚油酸水平为 1.02%~2.66%。

(2) 本研究证实吉富罗非鱼具备利用亚油酸(18: 2n-6)合成碳链更长、更不饱和的 HUFAs 的能力, 并且证实 n-6 脂肪酸和 n-3 脂肪酸在罗非鱼体内存在代谢竞争关系。

#### 参考文献:

- [1] Belury M A. Dietary conjugated linoleic acid in health: Physiological effects and mechanisms of action[J]. *Annu Rev Nutr*, 2002, 22: 505–531.
- [2] Kuniyasu H. *Linoleic Acid*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 2048–2050.
- [3] Tocher D R. Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish[J]. *Aquacult Res*, 2010, 41(5): 717–732.
- [4] Morais S, Castanheira F, Martinez-Rubio L, et al. Long chain polyunsaturated fatty acid synthesis in a marine vertebrate: Ontogenetic and nutritional regulation of a fatty acyl desaturase with  $\Delta 4$  activity[J]. *BBA-Mol Cell Biol L*, 2012, 1821(4): 660–671.
- [5] Miao L H, Liu B, Jie H, et al. Evaluation of nutritive quality and nutritional components in the muscle of GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(5): 635–641. [缪凌鸿, 刘波, 何杰, 等. 吉富罗非鱼肌肉营养成分分析与品质评价[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(5): 635–641.]
- [6] Takeuchi T, Satoh S, Watanabe T. Requirement of *Tilapia nilotica* for essential fatty acids[J]. *Bull Jpn Soc Sci Fish*, 1983, 49(7): 1127–1134.
- [7] Chou B S, Shiau S Y. Both n-6 and n-3 fatty acids are required for maximal growth of juvenile hybrid tilapia[J]. *N Am J Aquacult*, 1999, 61(1): 13–20.
- [8] Yildirim-Aksoy M, Lim C, Davis D A, et al. Influence of dietary lipid sources on the growth performance, immune response and resistance of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, to streptococcus iniae challenge[J]. *J Appl Aquacult*, 2007, 19(2): 29–49.
- [9] Li E C, Lim C, Klesius P H, et al. Growth, body fatty acid composition, immune response, and resistance to *Streptococcus iniae* of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus*  $\times$  *Oreochromis aureus*, fed diets containing various levels of linoleic and linolenic acids[J]. *J World Aquacult Soc*, 2013, 44(1): 42–55.
- [10] Kanazawa A, Teshima S, Sakamoto M, et al. Requirements of *Tilapia zillii* for essential fatty acids[J]. *Bull Jpn Soc Sci Fish*, 1980, 46(11): 1353–1356.
- [11] Tian J, Wu F, Yang C G, et al. Dietary lipid levels impact lipoprotein lipase, hormone-sensitive lipase, and fatty acid synthetase gene expression in three tissues of adult GIFT strain of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Fish Physiol Biochem*, 2015, 41(1): 1–18.
- [12] Jiang M, Yao Y F, Wen H, et al. Dietary available phosphorus requirement of adult GIFT strain of *Oreochromis niloticus* reared in freshwater[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(11): 1725–1732. [蒋明, 姚鹰飞, 文华, 等. 吉富罗非鱼成鱼对饲料中有效磷的需要量[J]. *水产学报*, 2013, 37(11): 1725–1732.]
- [13] Jiang M, Huang F, Wen H, et al. Dietary niacin requirement of GIFT tilapia, *Oreochromis niloticus*, reared in freshwater[J]. *J World Aquacult Soc*, 2014, 45(3): 333–341.
- [14] Tu W, Tian J, Wen H, et al. Optimal dietary lipid requirement of advanced juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(3): 436–444. [涂玮, 田娟, 文华, 等. 尼罗罗非鱼幼鱼饲料的适宜脂肪需要量[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(3): 436–444.]
- [15] Chou B S, Shiau S Y. Optimal dietary lipid level for growth of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus*  $\times$  *Oreochromis aureus*[J]. *Aquaculture*, 1996, 143(2): 185–195.
- [16] Lin Y H, Lin S M, Shiau S Y. Dietary manganese requirements of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus*  $\times$  *O. aureus*[J]. *Aquaculture*, 2008, 284(1–4): 207–210.
- [17] Li A J. *Aquatic animal nutrition and feed science*[M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 1996: 36–46. [李爱杰. *水产动物营养与饲料学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 36–46.]
- [18] Lim C, Yildirim-Aksoy M, Klesius P. Lipid and fatty acid requirements of tilapias[J]. *N Am J Aquacult*, 2011, 73(2): 188–193.
- [19] Luo Z, Tan X Y, Liu C X, et al. Effect of dietary conjugated linoleic acid levels on growth performance, muscle fatty acid profile, hepatic intermediary metabolism and antioxidant responses in genetically improved farmed Tilapia strain of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquacult Res*, 2012, 43(9): 1392–1403.
- [20] Bandarra N M, Nunes M L, Andrade A M, et al. Effect of dietary conjugated linoleic acid on muscle, liver and visceral lipid deposition in rainbow trout juveniles (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1–4): 496–505.
- [21] Berge G M, Ruyter B, Åsgård T. Conjugated linoleic acid in

- diets for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*); effects on fish performance, proximate composition, fatty acid and mineral content[J]. *Aquaculture*, 2004, 237(1-4): 365-380.
- [22] Wang Y H, Liu W H, Wang H C, et al. Effects of dietary linoleic and linolenic acid levels on growth, body composition and digestive enzyme activities in juvenile blunt snout bream *Megalobrama amblycephala*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, 29(4): 373-379.[王煜恒, 刘文斌, 王会聪, 等. 饲料中亚油酸和亚麻酸含量对团头鲂幼鱼生长、体成分和消化酶活性的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(4): 373-379.]
- [23] Dong G F, Liu W Z, Wu L Z, et al. Conjugated linoleic acid alters growth performance, tissue lipid deposition, and fatty acid composition of darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*)[J]. *Fish Physiol Biochem*, 2015, 41(1): 73-89.
- [24] Dong G F, Zou Q, Wang H, et al. Conjugated linoleic acid differentially modulates growth, tissue lipid deposition, and gene expression involved in the lipid metabolism of grass carp[J]. *Aquaculture*, 2014, 432: 181-191.
- [25] Chou B S, Shiau S Y, Hung S S O. Effect of dietary cod liver oil on growth and fatty acids of juvenile hybrid tilapia[J]. *N Am J Aquacult*, 2001, 63(4): 277-284.
- [26] Zhou S W. *Animal Biochemistry*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 144-145.[周顺伍. *动物生物化学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 144-145.]
- [27] Tang C H, Xu J X, Peng Z Y. Recent study on nutrition and function of fatty acids[J]. *China Oils and Fats*, 2000, 25(6): 20-23.[唐传核, 徐建祥, 彭志英. 脂肪酸营养与功能的最新研究[J]. *中国油脂*, 2000, 25(6): 20-23.]
- [28] Katan M B, Zock P L, Mensink R P. Dietary oils, serum lipoproteins, and coronary heart disease[J]. *Am J Clin Nutr*, 1995, 61 (Suppl 6): 1368S-1373S.
- [29] Mensink R P, Katan M B. Effect of dietary fatty acids on serum lipids and lipoproteins. A meta-analysis of 27 trials[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 1992, 12(8): 911-919.
- [30] Mensink R P, Zock P L, Kester A D M, et al. Effects of dietary fatty acids and carbohydrates on the ratio of serum total to HDL cholesterol and on serum lipids and apolipoproteins: a meta-analysis of 60 controlled trials[J]. *Am J Clin Nutr*, 2003, 77(5): 1146-1155.
- [31] Lichtenstein A H. Thematic review series: Patient-oriented research. Dietary fat, carbohydrate, and protein: effects on plasma lipoprotein patterns[J]. *J Lipid Res*, 2006, 47(8): 1661-1667.
- [32] Liu S H, Cao J M, Huang Y H, et al. Effects of different dietary linolenic acid/linoleic acid ratios on growth performance and fatty acid composition of juvenile *Litopenaeus vannamei*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(5): 1413-1421.[刘穗华, 曹俊明, 黄燕华, 等. 饲料中不同亚麻酸/亚油酸比对凡纳滨对虾幼虾生长性能和脂肪酸组成的影响[J]. *动物营养学报*, 2010, 22(5): 1413-1421.]
- [33] Ji H, Cao Y Z, Liu P, et al. Effect of dietary HUFA on the lipid metabolism in grass carp *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(5): 881-889.[吉红, 曹艳姿, 刘品, 等. 饲料中 HUFA 影响草鱼脂质代谢的研究[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(5): 881-889.]
- [34] Wang D Z, Ding L, Zhao D F. Preliminary observation of the effect of essential fatty acids on the growth of black carp[J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 1986, (2): 4-6.[王道尊, 丁磊, 赵德福. 必需脂肪酸对青鱼生长影响的初步观察[J]. *水产科技情报*, 1986, (2): 4-6.]
- [35] Takeuchi T, Watanabe T. Requirement of carp for essential fatty acids[J]. *Bull Jpn Soc Sci Fish*, 1977, 43(5): 541-551.
- [36] Takeuchi T, Arai S, Watanabe T, et al. Requirement of eel *Anguilla japonica* for essential fatty acids[J]. *Bull Jpn Soc Sci Fish*, 1980, 46(3): 345-353.
- [37] Takeuchi T, Watanabe K, Yong W Y, et al. Essential fatty acids of grass carp *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Bull Jpn Soc Sci Fish*, 1991, 57(3): 467-473.
- [38] Watanabe T. Lipid nutrition in fish[J]. *Comp Biochem Physiol B: Comp Biochem*, 1982, 73(1): 3-15.
- [39] El-Husseiny O M, Abdul-Aziz G M, Goda A M A S, et al. Effect of altering linoleic acid and linolenic acid dietary levels and ratios on the performance and tissue fatty acid profiles of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fry[J]. *Aquacult Int*, 2010, 18(6): 1105-1119.
- [40] Huang C H, Huang M C, Hou P C. Effect of dietary lipids on fatty acid composition and lipid peroxidation in sarcoplasmic reticulum of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*[J]. *Comp Biochem Physiol B: Biochem Mol Biol*, 1998, 120(2): 331-336.
- [41] Holman R T, Mohrhauer H. A hypothesis involving competitive inhibition in the metabolism of polyunsaturated fatty acids[J]. *Acta Chem Scand*, 1963, 17(Suppl 1): 584-590.
- [42] Haglund O, Wallin R, Wretling S, et al. Effects of fish oil alone and combined with long chain (n-6) fatty acids on some coronary risk factors in male subjects[J]. *J Nutr Biochem*, 1998, 9(11): 629-635.
- [43] Zheng K K, Zhu X M, Han D, et al. Effects of dietary lipid levels on growth, survival and lipid metabolism during early ontogeny of *Pelteobagrus vachelli* larvae[J]. *Aquaculture*, 2010, 299(1-4): 121-127.
- [44] Tocher D R, Zheng X Z, Schleichriem C, et al. Highly un-

saturated fatty acid synthesis in marine fish: Cloning, functional characterization, and nutritional regulation of fatty acyl  $\Delta 6$  desaturase of Atlantic cod (*Gadus morhua* L.)[J]. *Lipids*, 2006, 41(11): 1003–1016.

[45] Xie D Z, Che, F, Lin S Y, et al. Cloning, functional characterization and nutritional regulation of  $\Delta 6$  fatty acyl desaturase in the herbivorous euryhaline teleost *Scatophagus argus*[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(3): e90200.

## Optimal dietary linoleic acid requirement for the advanced juvenile GIFT strain of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*

TIAN Juan<sup>1,2</sup>, TU Wei<sup>2</sup>, WEN Hua<sup>2</sup>, JIANG Ming<sup>2</sup>, WU Fan<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, YANG Changgeng<sup>2</sup>, HUANG Feng<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Aquaculture Nutrition, Ministry of Agriculture, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation and Utilization, Ministry of Agriculture; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

**Abstract:** The Genetically Improved Farmed Tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*) strain is one of the more successfully introduced farmed tilapia in China because of its strong adaptability, rapid growth, high fecundity, and ability to accept a broad diet. Similar to other fish and vertebrates, tilapia cannot synthesize 18-carbon polyunsaturated fatty acids (PUFAs) and, thus, require a dietary source of n-6 series FAs (18: 2n-6 or 20: 4n-6) for normal growth and reproduction. Although the optimum n-6 FA dietary requirements for tilapia < 10 g have been estimated to be 0.5%–1.0%, few studies have investigated the linoleic acid (LA) requirement for larger juvenile tilapia. Our objective was to determine the optimal dietary LA requirement for larger juvenile GIFT. A total of 630 fish (mean body weight, 60.98±3.82 g) were divided randomly into seven groups with three replicates of 30 fish in each replicate. Seven diets with a constant dietary lipid level (8%) were formulated to contain seven levels [0.07% (control group), 0.36%, 0.61%, 1.03%, 2.00%, 3.00%, and 4.15%] of LA by supplementation with corn oil and palmitic acid to modulate FA contents. The fish were fed three times daily (8:30, 12:30, and 16:30) to apparent satiation for 10 weeks. At the end of the feeding trial, growth performance, body composition, serum biochemical indices, and FA composition were measured. The results showed that weight gain rate (WGR), feed efficiency rate (FER), protein efficiency rate, and protein retention rate (PRR) of GIFT increased initially and then decreased as LA level increased. A second-order regression analysis showed that the optimal LA level for the best WGR was 2.49%, and that the dietary LA level for the best FER was 2.66%. Broken-line regression analyses of PRR against dietary LA level indicated that the dietary LA level for the best PRR was 1.02%. Increasing dietary LA level contributed to increase tissue and whole-body lipid levels. Serum total cholesterol and triglyceride (TG) levels were lowest in the group fed 1.03% LA, whereas the 1.03% LA group had the highest high-density lipoprotein cholesterol level. Low-density lipoprotein cholesterol content declined as LA increased. Broken-line regression analyses showed that the optimum LA requirement for the minimum TG level was 1.13%. Tissues FA composition was affected by dietary FA composition. Muscle and liver saturated fatty acid levels declined as dietary level decreased; however, muscle and liver n-6 FA levels increased and n-3 FA levels declined with the increase in LA level. Our comprehensive analysis of growth performance, serum biochemical indices, and FA composition in muscle and liver suggests that the optimal level of dietary LA for later-stage juvenile GIFT is 1.02%–2.66%.

**Key words:** *Oreochromis niloticus*; linoleic acid; essential fatty acid; requirement

**Corresponding author:** WEN Hua. E-mail: wenhua.hb@163.com