

文章编号: 1000-0615(2017)02-0258-13

DOI: 10.11964/jfc.20160610443

## 蚕蛹油等7种油脂对吉富罗非鱼生长、体组成及脂质代谢影响的比较

白富瑾<sup>1</sup>, 罗莉<sup>1\*</sup>, 黄先智<sup>2</sup>, 陈拥军<sup>1</sup>,  
胡蕊<sup>1</sup>, 黄旺<sup>1</sup>, 林肯<sup>1</sup>

(1. 西南大学动物科技学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 家蚕基因组生物学国家重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 为研究蚕蛹油在吉富罗非鱼饲料中应用的可行性, 在饲料中分别添加5.0%的蚕蛹油(SPO)、海水鱼油(MFO)、罗非鱼油(TO)、猪油(PL)、鸡油(CO)、亚麻籽油(LO)和大豆油(SO), 配制成7种等氮等脂实验饲料, 饲喂初始均重为(47.51±0.52)g的实验鱼。每个处理设置3个重复, 每个重复放鱼20尾, 进行56d的养殖实验。结果显示, 罗非鱼终末均重、增重率和特定生长率均为LO和SO组显著高于SPO和MFO组, 与TO、PL和CO组差异不显著。饲料系数SPO组显著高于除MFO组外的其余各组, 而蛋白质效率与之相反。摄食量SPO组最低, SO组最高。TO组罗非鱼脏体比、体长/体高和腹脂率均为最低, 而饱满度最高。肝体比PL组显著高于除LO组外的其他各组。腹脂率MFO组显著高于除CO组外的其余各组。同其他组相比, SPO可降低罗非鱼全鱼、组织粗脂肪及血清甘油三酯(TG)、葡萄糖和丙二醛的含量; MFO可降低全鱼粗脂肪的含量和提高肝脏乙酰辅酶A羧化酶(ACC)的活性; PL组罗非鱼血清TG和总胆固醇(TC)含量均较低, 而肝脏肉碱脂酰转移酶-I和ACC活性均较高; CO组血清TG、TC、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量和谷草转氨酶活性均为最高; LO和SO可显著提高罗非鱼对饲料脂肪的沉积率和全鱼、肌肉粗脂肪的含量, SO还可显著提高血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)和降低LDL-C、TC的含量; SPO、LO和SO可分别显著提高罗非鱼肌肉中高不饱和脂肪酸、 $\alpha$ -亚麻酸和亚油酸的含量。研究表明, SPO作为吉富罗非鱼饲料的单一脂肪源, 虽会影响其生长性能, 但具有降体脂、血脂和血糖, 保护鱼体健康和优化肌肉脂肪酸组成等优点。

**关键词:** 吉富罗非鱼; 蚕蛹油; 脂肪源; 脂质代谢; 血清生化指标

**中图分类号:** S 963.7

**文献标志码:** A

饲料中的脂肪是鱼类主要的能量来源之一, 适宜脂肪源的选择是饲料配制的关键因素之一。海水鱼油为传统鱼饲料脂肪的主要来源, 但其资源有限不能满足水产养殖业日益增长的需求<sup>[1-2]</sup>, 且近年来许多研究表明, 海水鱼油并非为所有鱼类的最优脂肪源, 对淡水鱼的促生长效果甚至不如其他动植物油脂<sup>[2-5]</sup>。鱼类对脂肪的利用在很大程度上与其饲料中所含必

需脂肪酸的质和量密切相关<sup>[1]</sup>。目前国内外就不同脂肪源对淡水鱼的影响已有研究, 如海水鱼油、大豆油、菜籽油、葵花籽油、亚麻籽油、花生油、棕榈油、玉米油、椰子油、猪油、鸡油等被广泛应用于异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)<sup>[2-3, 6]</sup>、框鳞镜鲤(*Cyprinus carpio var. specularis*)<sup>[4]</sup>、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)<sup>[7-10]</sup>、黄鳝(*Monopterus albus*)<sup>[5]</sup>、草鱼(*Ctenopharyngodon*

收稿日期: 2016-06-12 修回日期: 2016-09-18

资助项目: 公益性行业科研专项(农业)(201303053); 国家现代蚕桑产业技术体系(CARS-22); 国家自然科学基金(31101909)

通信作者: 罗莉, E-mail: luoli1972@163.com

idella)<sup>[11]</sup>和鳊(*Elopichthys bambusa*)<sup>[12]</sup>等。研究表明,由于不同油脂的脂肪酸组成差别较大,对鱼类代谢影响不一,而不同鱼类对同一脂肪源的利用方式和能力也有差别。

蚕蛹(silkworm pupae)是缫丝业的主要副产品,干蚕蛹含30%左右的油脂,极易氧化变质,影响其在饲料中的应用效价。我国是养蚕大国,鲜蚕蛹年产量可达70多万t<sup>[13]</sup>。将缫丝后的蚕蛹进行脱脂处理提炼的蚕蛹油(silkworm pupal oil, SPO)不饱和脂肪酸的相对含量为61.5%<sup>[14]</sup>,富含淡水鱼类的必需脂肪酸 $\alpha$ -亚麻酸(C18:3n-3),且C18:3n-3可在淡水鱼体内衍生为多不饱和脂肪酸中的EPA(C20:5n-3)和DHA(C22:6n-3),是水产饲料中极具潜力的脂肪源。目前有关SPO的研究主要集中在以大鼠(*Rattus norvegicus*)为模式动物的脂质代谢方面。研究表明,SPO可预防高脂血症,降低脂质在肝内的沉积,并能够清除机体自由基和增强抗氧化能力等<sup>[15-16]</sup>,但在水产饲料中的应用研究尚未见报道。基于此,本实验以吉富罗非鱼(GIFT *O. niloticus*)为研究对象,比较SPO与其他不同特色的6种动植物油脂对其生长、体组成及脂质代谢的影响,评价罗非鱼饲料中SPO应用的可行性,为鱼类饲料理想脂肪源的开发,在生产上拓宽脂肪源的选择范围及脂肪代谢营养调控机理的研究提供实验性参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

根据吉富罗非鱼营养需求,以低脂肪含量原料(豆粕、棉粕、菜粕、面粉等)为主,配制成7种等氮(粗蛋白33.5%)等脂(粗脂肪5.6%)的实验饲料,除脂肪来源不同外,其余饲料成分均相同(表1)。7种实验饲料中使用5.0%的不同脂肪源,分别为蚕蛹油(SPO)、海水鱼油(MFO)、罗非鱼油(TO)、猪油(PL)、鸡油(CO)、亚麻籽油(LO)和大豆油(SO)(7种油源的技术指标均符合鱼用油脂标准)。SPO为广西天景山丝绸有限公司缫丝后的鲜蚕蛹于广西百洋集团脱脂处理所得,MFO购自浙江兴业油脂有限公司,TO和PL购自重庆希望饲料有限公司,CO购自河南省裕之源油脂有限公司,LO和SO购自超市。饲料原料均过40目筛,各实验饲料制成直径2.0 mm的颗粒,风干,双层塑料袋包装并封口,-20 °C保

表1 基础饲料配方及主要营养成分(风干基础)

Tab. 1 Formulation and nutrient composition of the basal diet (air-dry basis) %

项目 items	含量 content
<b>原料 ingredients</b>	
豆粕 soybean meal	30.00
棉粕 cottonseed meal	12.00
菜粕 rapeseed meal	25.00
面粉 wheat flour	24.30
油 oil	5.00
赖氨酸盐酸盐 lysine hydrochloride	0.20
蛋氨酸 methionine	0.10
磷酸二氢钙 Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	2.00
氯化胆碱 choline chloride	0.30
预混料 premix <sup>1</sup>	1.00
防霉剂 mold inhibitor	0.05
抗氧化剂 antioxidant	0.05
合计 total	100.00
<b>营养组成 nutrient composition<sup>2</sup></b>	
水分 moisture	11.30
粗蛋白 crude protein	33.50
粗脂肪 crude lipid	5.60
灰分 ash	7.98

注: 1. 预混料为每kg全价饲料提供: 铁 150 mg; 铜 3.2 mg; 锌 34.1 mg; 锰 13.0 mg; 碘 0.8 mg; 硒 0.3 mg; 钴 3.0 mg; 维生素A 2000.0 IU; 维生素D 2000.0 IU; 维生素E 100.0 mg; 维生素K<sub>3</sub> 10.0 mg; 维生素B<sub>1</sub> 5.0 mg; 维生素B<sub>2</sub> 10.0 mg; 烟酸 100.0 mg; 维生素B<sub>6</sub> 10.0 mg; 泛酸钙 40.0 mg; 叶酸 5.0 mg; 维生素B<sub>12</sub> 0.02 mg; 生物素 1.0 mg; 维生素C 150 mg; 肌醇 100 mg;

2. 实测值

Notes: 1. premix provided per kg of diet: Fe 150 mg; Cu 3.2 mg; Zn 34.1 mg; Mn 13.0 mg; I 0.8 mg; Se 0.3 mg; Co 3.0 mg; vitamin A 2000.0 IU; vitamin D 2000.0 IU; vitamin E 100.0 mg; vitamin K<sub>3</sub> 10.0 mg; vitamin B<sub>1</sub> 5.0 mg; vitamin B<sub>2</sub> 10.0 mg; niacin 100.0 mg; vitamin B<sub>6</sub> 10.0 mg; calcium pantothenate 40.0 mg; folic acid 5.0 mg; vitamin B<sub>12</sub> 0.02 mg; biotin 1.0 mg; vitamin C 150 mg; inositol 100 mg;

2. measured values

存备用。SPO和饲料脂肪酸组成见表2。根据饲料脂肪酸组成与饲料粗脂肪含量计算得7种饲料所含部分脂肪酸的含量见表3。

### 1.2 实验鱼与饲养管理

实验鱼购自重庆北碚歇马鱼种场,经浓度3%的食盐溶液消毒后,在室内循环水水族箱中暂养,以基础饲料驯化10 d。正式实验前,选择

表 2 蚕蛹油和饲料脂肪酸组成(总脂肪酸)  
 Tab. 2 Fatty acids composition of silkworm pupal oil and the experimental diets (total fatty acids) %

脂肪酸 fatty acids	原料 ingredient			饲料 diets				
	蚕蛹油 silkworm pupal oil	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO
C14:0	0.52	0.49	6.06	2.83	1.30	0.58	0.07	0.09
C16:0	23.05	22.11	20.16	21.55	22.99	22.75	5.86	11.25
C18:0	4.47	4.30	3.78	4.79	11.51	4.88	2.74	3.68
C24:0	0.24	0.21	0.09	1.68	0.00	0.04	0.00	0.00
∑SFA	28.28	27.11	30.09	30.85	35.80	28.25	8.67	15.02
C16:1n-7	1.71	1.61	7.27	5.69	2.98	2.91	0.31	0.31
C18:1n-9	30.94	30.48	18.83	30.22	39.11	39.31	28.28	25.05
C24:1n-9	0.28	0.41	10.99	0.37	0.56	0.37	0.92	0.27
∑MUFA	32.93	32.50	37.09	36.28	42.65	42.59	29.51	25.63
C18:2n-6	6.33	10.11	7.32	20.85	16.81	24.63	18.77	50.51
C18:3n-3	30.35	27.82	4.67	4.13	2.30	2.20	40.93	6.93
C18:3n-6	0.37	0.41	0.95	1.36	0.58	0.37	0.08	0.45
C20:4n-6 (ARA)	0.66	0.59	1.84	2.40	0.93	0.61	0.53	0.13
C20:5n-3 (EPA)	0.77	1.18	6.77	1.98	0.60	0.81	0.99	0.98
C22:6n-3 (DHA)	0.31	0.28	10.82	1.91	0.28	0.54	0.07	0.05
∑PUFA	38.79	40.39	32.37	32.63	21.50	29.16	61.37	59.05
∑HUFA	1.74	2.05	19.43	6.29	1.81	1.96	1.59	1.16
∑n3	31.43	29.28	22.26	8.02	3.18	3.55	41.99	7.96
∑n6	7.36	11.11	10.11	24.61	18.32	25.61	19.38	51.09
∑n3-HUFA	1.08	1.46	17.59	3.89	0.88	1.35	1.06	1.03
n6/n3	0.23	0.38	0.45	3.07	5.77	7.21	0.46	6.41
n3/n6	4.27	2.64	2.20	0.33	0.17	0.14	2.17	0.16

注: SFA. 饱和脂肪酸; MUFA. 单不饱和脂肪酸; PUFA. 多不饱和脂肪酸; HUFA. 高不饱和脂肪酸; ∑n3. n3多不饱和脂肪酸总和; ∑n6. n6多不饱和脂肪酸总和; ∑n3-HUFA. n3高不饱和脂肪酸总和。下同

Notes: SFA. saturated fatty acids; MUFA. monounsaturated fatty acids; PUFA. polyunsaturated fatty acids; HUFA. highly unsaturated fatty acids; ∑n3. total n3 polyunsaturated fatty acids; ∑n6. total n6 polyunsaturated fatty acids; ∑n3-HUFA. total n3 highly unsaturated fatty acids. The same below

表 3 饲料中部分脂肪酸含量

Tab. 3 Content of partial fatty acids of the experimental diets %

脂肪酸 fatty acids	饲料 diets						
	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO
C18:2n-6	0.57	0.41	1.17	0.94	1.38	1.05	2.83
C18:3n-3	1.56	0.26	0.23	0.13	0.12	2.29	0.39
∑n6	0.62	0.57	1.38	1.03	1.43	1.09	2.86
∑n3-HUFA	0.08	0.99	0.22	0.05	0.08	0.06	0.06

体质健壮、体质量均匀[(47.51±0.52) g]的吉富罗非鱼420尾, 随机分为7组, 每组3个重复, 每个重复放养20尾, 水族缸容积为392 L, 水源为曝气自来水。每天投喂3次(08:30、12:30、16:30)。为保证夏季实验饲料的新鲜度, 每日投喂的饲料均由前一晚于-20 °C冰箱取出解冻。日投喂量为体质量的3%~5%, 根据实验鱼的增重情况, 每隔7 d调整一次投喂量。每晚100%换水1次, 正式实验8周。饲养期间水温27~31 °C, 溶解氧>6.0 mg/L, 氨氮<0.10 mg/L, pH 6.6~7.0, 亚硝酸

盐氮<0.10 mg/L。

### 1.3 样品采集、制备

养殖实验结束后,实验鱼饥饿24 h,用MS-222麻醉后,每组每个重复选取12尾体质量均匀的罗非鱼,每尾测定体质量、体长和体高。其中,3尾用于全鱼营养组成测定,3尾用于血清制备。1 mL一次性无菌注射器尾静脉采血,4 °C静置3 h后,4000 r/min(4 °C)离心10 min,提取血清,立即放入液氮罐中速冻后转入-80 °C保存,用于血清生化指标测定。另6尾鱼在冰盘中进行解剖,取出内脏团,分离出肝脏和肠系膜脂肪并称量,同时,自鱼体两侧头盖骨后至尾鳍前取体背肌肉样品,-80 °C保存待用。

### 1.4 指标测定

**生长及形体指标测定** 养殖实验结束后,停食24 h,准确称量鱼体和饲料重,计算其生长和形体指标:

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

特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d)=( $\ln W_t - \ln W_0$ )/ $D \times 100$ ;

饲料系数(feed conversion ratio, FCR)= $W_f / (W_t - W_0)$ ;

蛋白质效率(protein efficiency rate, PER, %)=( $W_t - W_0$ )/( $W_f \times W_p$ ) $\times 100$ ;

摄食量[feed intake, FI, g/(尾·d)]= $D_f \times 2 / [(M_0 + M_t) \times D]$ ;

脏体比(viscerosomatic index, VSI, %)= $W_v / W \times 100$ ;

肝体比(hepatosomatic index, HSI, %)= $W_l / W \times 100$ ;

饱满度(condition factor, CF, g/cm<sup>3</sup>)= $W / BL^3 \times 100$ ;

体长/体高(body length/body depth)=BL/BD;

腹脂率(intraperitoneal fat ratio, IPF, %)= $W_m / W \times 100$

式中, $W_0$ :初始均重(g); $W_t$ :终末均重(g); $D$ :养殖实验天数; $W_f$ :尾均干物质摄食量(g); $W_p$ :饲料粗蛋白含量(%); $D_f$ :总干物质摄食量(g); $M_0$ :初始鱼尾数(尾); $M_t$ :终末鱼尾数(尾); $W$ :鱼体质量(g); $W_v$ :内脏重(g); $W_l$ :肝脏重(g);BL:鱼体长(cm); $W_m$ :肠系膜脂肪重(g);

BD:鱼体高(cm)。

**全鱼和组织常规营养组成测定** 水分采用恒温干燥法(105 °C),粗脂肪含量采用索氏抽提法,粗蛋白采用凯氏半微量蒸馏定氮法,灰分采用高温灼烧法(550 °C)。

**饲料营养成分沉积率测定** 干物质、粗蛋白、粗脂肪和灰分沉积率(RR<sub>i</sub>):

$$RR_i(\%) = 100 \times (W_t \times CN_i - W_0 \times CO_i) / (W_f \times CF_i)$$

式中, $CN_i$ :终末鱼体干物质、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量; $CO_i$ :初始鱼体干物质、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量; $CF_i$ :饲料干物质、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量。

**脂肪酸组成测定** 采用安捷伦7820 a气相色谱仪测定。称取0.3~0.5 g的饲料或肌肉样品于10 mL离心管,加入甲醇:氯仿(1:2体积比)5 mL,高速分散器匀浆,静置1~2 h后定量滤纸过滤,加4 mL蒸馏水,3000 r/min离心5 min,去上清液,下层水浴浓缩(40 °C)。随后加入1 mL色谱纯正己烷将油脂溶解(SPO测定时在此处加100 μL),加1 mL、0.4 mol/L氢氧化钾—甲醇溶液静置30 min进行甲酯化,之后加2 mL去离子水,待分层后提取上层液使用气相色谱法检测分析,并按面积归一化法计算脂肪酸各组分含量。气相色谱条件:30 m×0.320 mm,0.25 μm Agilent 19091J-413 GC Columns,柱箱温度210 °C,检测器温度(FID)300 °C,进样器温度250 °C,载气为高纯氮气,尾吹30 mL/min,氢气40 mL/min,空气450 mL/min<sup>[4, 17]</sup>。

**生化指标测定** 血清:葡萄糖(GLU)、甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、谷草转氨酶(GOT)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)和丙二醛(MDA)均采用南京建成生物工程研究所的试剂盒进行测定。肝脏:肉碱脂酰转移酶-I(CPT-I)和乙酰辅酶A羧化酶(ACC)由上海将来实业股份有限公司测定。

### 1.5 数据处理

实验结果用SPSS 19.0软件对数据进行方差齐性检验和单因素方差分析(One-Way ANOVA),对非齐性数据尝试对数转换后分析。用Duncan氏多重比较分析组间差异显著性程度,显著水平为0.05。数据用平均值±标准差(mean±SD)形式表示。

## 2 结果

### 2.1 7种油脂对吉富罗非鱼生长性能和饲料利用的影响

吉富罗非鱼  $W_t$ 、WGR和SGR均为LO和SO组显著高于SPO和MFO组 ( $P<0.05$ ), 与TO、PL和CO组差异不显著 ( $P>0.05$ )。FCR为SPO组显著高于除MFO组外的其他5组 ( $P<0.05$ ), 其他5组间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 而PER与之相反。FI为SPO、MFO、TO和CO各组间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但均显著低于SO组 ( $P<0.05$ ), LO和SO组间差异不显著 ( $P>0.05$ ) (表4)。

### 2.2 7种油脂对吉富罗非鱼形体指标的影响

VSI TO组最低, 但与SPO和SO组差异不显著 ( $P>0.05$ )。HSI PL组显著高于除LO组外的其他各组 ( $P<0.05$ )。CF为SPO组最低, TO组最高 ( $P<0.05$ )。BL/BD CO组显著高于除LO组外的其他各

组 ( $P<0.05$ )。IPF MFO组显著高于除CO组外的其余各组 ( $P<0.05$ ) (表5)。

### 2.3 7种油脂对吉富罗非鱼全鱼和组织常规营养组成的影响

全鱼粗脂肪LO和SO组显著高于其他各组 ( $P<0.05$ ), MFO组最低, 但与SPO组差异不显著 ( $P>0.05$ ); 全鱼粗蛋白PL组最低; 全鱼灰分MFO组显著高于除TO和PL组外的其余各组 ( $P<0.05$ )。肌肉粗脂肪CO、LO和SO组显著高于其余4组 ( $P<0.05$ ); 肌肉粗蛋白TO和LO组显著高于PL组 ( $P<0.05$ ); 肌肉灰分SPO、MFO和TO组显著高于PL和LO组 ( $P<0.05$ )。肝脏粗脂肪SPO组最低, CO组最高 ( $P<0.05$ ) (表6)。

### 2.4 7种油脂对吉富罗非鱼饲料中营养素沉积率的影响

干物质沉积率SPO和MFO组显著低于其他

表4 7种油脂对吉富罗非鱼生长性能和饲料利用的影响

Tab. 4 Effects of seven kinds of lipid on growth performance and feed utilization of GIFT *O. niloticus*

	饲料 diets						
	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO
初始均重/g $W_0$	47.7±0.4	47.9±0.1	47.5±0.3	46.9±0.4	47.3±0.8	47.8±0.7	47.6±0.5
终末均重/g $W_t$	197.3±5.7 <sup>a</sup>	207.1±6.9 <sup>b</sup>	215.7±4.1 <sup>bc</sup>	213.0±1.8 <sup>bc</sup>	213.4±2.3 <sup>bc</sup>	220.0±8.7 <sup>c</sup>	217.8±1.8 <sup>c</sup>
增重率/% WGR	314.1±15.4 <sup>a</sup>	332.2±13.8 <sup>ab</sup>	354.0±6.8 <sup>bc</sup>	354.0±3.6 <sup>bc</sup>	351.7±3.8 <sup>bc</sup>	360.8±19.5 <sup>c</sup>	357.9±8.0 <sup>c</sup>
特定生长率/(%/d) SGR	2.54±0.07 <sup>a</sup>	2.61±0.06 <sup>ab</sup>	2.71±0.03 <sup>bc</sup>	2.70±0.01 <sup>bc</sup>	2.69±0.02 <sup>bc</sup>	2.73±0.08 <sup>c</sup>	2.72±0.03 <sup>c</sup>
饲料系数 FCR	1.06±0.02 <sup>c</sup>	1.03±0.02 <sup>bc</sup>	0.97±0.02 <sup>a</sup>	0.99±0.01 <sup>ab</sup>	0.97±0.01 <sup>a</sup>	0.98±0.04 <sup>a</sup>	1.00±0.02 <sup>ab</sup>
蛋白质效率/% PER	2.82±0.06 <sup>a</sup>	2.91±0.05 <sup>ab</sup>	3.07±0.06 <sup>c</sup>	3.01±0.04 <sup>bc</sup>	3.09±0.03 <sup>c</sup>	3.06±0.12 <sup>c</sup>	2.98±0.07 <sup>bc</sup>
摄食量/[g/(尾·d)] FI	2.83±0.05 <sup>a</sup>	2.92±0.07 <sup>abc</sup>	2.92±0.01 <sup>abc</sup>	2.95±0.07 <sup>bcd</sup>	2.87±0.04 <sup>ab</sup>	3.00±0.04 <sup>cd</sup>	3.05±0.10 <sup>d</sup>

注: 同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著 ( $P>0.05$ ), 不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下同

Notes: in the same row, values with no or the same letter superscripts mean no significant difference ( $P>0.05$ ), while with different small letter superscripts mean significant difference ( $P<0.05$ ). The same below

表5 7种油脂对吉富罗非鱼形体指标的影响

Tab. 5 Effects of seven kinds of lipid on morphologic indices of GIFT *O. niloticus*

	饲料 diets						
	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO
脏体比/% VSI	9.71±0.19 <sup>ab</sup>	9.94±0.18 <sup>b</sup>	9.18±0.14 <sup>a</sup>	9.93±0.16 <sup>b</sup>	9.80±0.19 <sup>b</sup>	9.92±0.13 <sup>b</sup>	9.52±0.14 <sup>ab</sup>
肝体比/% HSI	2.09±0.09 <sup>ab</sup>	2.12±0.03 <sup>ab</sup>	2.01±0.05 <sup>a</sup>	2.36±0.03 <sup>c</sup>	1.90±0.08 <sup>a</sup>	2.28±0.02 <sup>bc</sup>	2.09±0.07 <sup>ab</sup>
肥满度/(g/cm <sup>3</sup> ) CF	3.66±0.13 <sup>a</sup>	3.86±0.13 <sup>ab</sup>	3.91±0.11 <sup>b</sup>	3.77±0.15 <sup>ab</sup>	3.70±0.09 <sup>ab</sup>	3.77±0.11 <sup>ab</sup>	3.85±0.12 <sup>ab</sup>
体长/体高 BL/BD	2.53±0.09 <sup>ab</sup>	2.55±0.09 <sup>ab</sup>	2.49±0.06 <sup>a</sup>	2.52±0.09 <sup>ab</sup>	2.62±0.05 <sup>c</sup>	2.56±0.08 <sup>bc</sup>	2.54±0.07 <sup>ab</sup>
腹脂率/% IPF	1.85±0.03 <sup>ab</sup>	2.69±0.05 <sup>c</sup>	1.65±0.05 <sup>a</sup>	1.79±0.07 <sup>a</sup>	2.29±0.06 <sup>bc</sup>	1.97±0.03 <sup>ab</sup>	2.05±0.05 <sup>ab</sup>

各组( $P<0.05$ ), 其余各组间差异不显著( $P>0.05$ )。脂肪沉积率SPO和MFO组显著低于其他各组( $P<0.05$ ), LO组最高, 但与SO组差异不显著( $P>0.05$ )。蛋白质沉积率SPO组最低, CO和SO组显著高于除LO组外的其余各组( $P<0.05$ )。灰分沉积率SPO和SO组显著低于其他各组( $P<0.05$ )(表7)。

## 2.5 7种油脂对吉富罗非鱼肌肉脂肪酸组成的影响

饱和脂肪酸含量MFO、TO和PL组显著高于其他各组, LO和SO组显著低于其他各组( $P<0.05$ )。单不饱和脂肪酸和油酸(C18:1n-9)含量均为CO组

最高, SO组最低( $P<0.05$ )。多不饱和脂肪酸含量SO组显著高于其他各组( $P<0.05$ ), 其次为LO和SPO组显著高于其他4组( $P<0.05$ )。其中, C18:2n-6含量SO组显著高于其他各组( $P<0.05$ ), LO、CO、PL、SPO组显著高于TO和MFO组, TO组显著高于MFO组( $P<0.05$ ); C18:3n-3含量为LO组>SPO组>SO组>MFO组>TO组>PL组>CO组( $P<0.05$ )。高不饱和脂肪酸总含量SPO组显著高于除SO组外的其他各组( $P<0.05$ )。Σn3和Σn6含量分别为LO组和SO组显著高于其他各组( $P<0.05$ )(表8)。

表6 7种油脂对吉富罗非鱼全鱼和组织常规营养组成的影响

Tab. 6 Effects of seven kinds of lipid on the nutrient composition of whole body and tissues of GIFT *O. niloticus*

	饲料 diets							%
	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO	
<b>全鱼 whole body</b>								
水分 moisture	71.66±0.93	71.32±1.85	71.32±0.82	70.88±1.64	70.73±1.35	70.27±1.04	70.24±0.74	
粗脂肪* crude lipid	26.86±1.29 <sup>ab</sup>	26.00±0.86 <sup>a</sup>	28.06±0.71 <sup>bc</sup>	28.28±0.87 <sup>c</sup>	28.30±0.23 <sup>c</sup>	29.67±0.55 <sup>d</sup>	29.63±0.65 <sup>d</sup>	
粗蛋白* crude protein	58.36±1.31 <sup>ab</sup>	58.85±2.02 <sup>b</sup>	57.30±1.30 <sup>ab</sup>	56.42±0.62 <sup>a</sup>	58.20±2.29 <sup>ab</sup>	56.82±0.55 <sup>ab</sup>	58.68±1.06 <sup>ab</sup>	
灰分* ash	13.25±0.25 <sup>b</sup>	13.89±0.44 <sup>c</sup>	13.37±0.40 <sup>bc</sup>	13.52±0.01 <sup>bc</sup>	12.99±0.38 <sup>ab</sup>	13.00±0.09 <sup>ab</sup>	12.65±0.17 <sup>a</sup>	
<b>肌肉 muscle</b>								
水分 moisture	77.60±0.21 <sup>c</sup>	76.21±0.38 <sup>a</sup>	76.87±0.09 <sup>b</sup>	76.63±0.39 <sup>ab</sup>	76.46±0.62 <sup>ab</sup>	76.79±0.10 <sup>ab</sup>	76.57±0.18 <sup>ab</sup>	
粗脂肪* crude lipid	2.79±0.04 <sup>ab</sup>	3.25±0.04 <sup>b</sup>	2.49±0.03 <sup>a</sup>	2.95±0.02 <sup>ab</sup>	3.94±0.05 <sup>c</sup>	4.02±0.02 <sup>c</sup>	4.16±0.06 <sup>c</sup>	
粗蛋白* crude protein	89.54±0.31 <sup>ab</sup>	89.48±0.49 <sup>ab</sup>	90.28±0.28 <sup>b</sup>	89.37±0.22 <sup>a</sup>	89.86±0.52 <sup>ab</sup>	90.00±0.20 <sup>b</sup>	89.84±0.16 <sup>ab</sup>	
灰分* ash	5.98±0.04 <sup>c</sup>	5.98±0.05 <sup>c</sup>	5.99±0.04 <sup>c</sup>	5.87±0.01 <sup>ab</sup>	5.91±0.04 <sup>abc</sup>	5.80±0.07 <sup>a</sup>	5.97±0.10 <sup>bc</sup>	
<b>肝脏 liver</b>								
水分 moisture	70.37±0.47 <sup>b</sup>	70.19±0.18 <sup>b</sup>	69.69±0.15 <sup>b</sup>	67.73±0.88 <sup>a</sup>	67.69±0.56 <sup>a</sup>	70.66±0.44 <sup>b</sup>	67.91±1.01 <sup>a</sup>	
粗脂肪* crude lipid	28.35±0.44 <sup>a</sup>	32.84±0.99 <sup>d</sup>	31.55±0.36 <sup>c</sup>	30.86±0.97 <sup>bc</sup>	33.96±0.76 <sup>c</sup>	30.01±0.27 <sup>b</sup>	31.27±0.75 <sup>c</sup>	

注: \*. 干物质中含量

Notes: \*. the content in dry matter

表7 7种油脂对吉富罗非鱼饲料中营养素沉积率的影响

Tab. 7 Effects of seven kinds of lipid on dietary nutrient retention ratio of GIFT *O. niloticus*

	饲料 diets							%
	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO	
干物质 dry matter	33.50±0.66 <sup>a</sup>	33.74±0.53 <sup>a</sup>	35.40±0.66 <sup>bc</sup>	35.19±0.50 <sup>bc</sup>	36.61±0.32 <sup>c</sup>	36.54±1.23 <sup>bc</sup>	35.85±0.86 <sup>bc</sup>	
脂肪 lipid	151.30±2.41 <sup>a</sup>	149.07±1.92 <sup>a</sup>	169.6±2.93 <sup>bc</sup>	167.64±2.53 <sup>b</sup>	172.65±1.39 <sup>bc</sup>	179.31±5.28 <sup>d</sup>	174.50±4.25 <sup>cd</sup>	
蛋白质 protein	45.21±0.95 <sup>a</sup>	47.66±0.78 <sup>b</sup>	48.54±0.94 <sup>bc</sup>	47.54±0.67 <sup>b</sup>	51.11±0.46 <sup>d</sup>	50.01±1.75 <sup>cd</sup>	50.71±1.21 <sup>d</sup>	
灰分 ash	43.20±1.05 <sup>a</sup>	47.45±0.89 <sup>b</sup>	47.68±0.97 <sup>b</sup>	47.37±0.64 <sup>b</sup>	46.19±0.45 <sup>b</sup>	45.82±1.78 <sup>b</sup>	43.00±1.02 <sup>a</sup>	

表 8 7种油脂对吉富罗非鱼肌肉脂肪酸组成的影响(总脂肪酸)  
 Tab. 8 Effects of seven kinds of lipid on muscle fatty acid composition of  
 GIFT *O. niloticus* (total fatty acids) %

脂肪酸 fatty acids	饲料 diets						
	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO
C14:0	1.50±0.02 <sup>b</sup>	2.30±0.04 <sup>e</sup>	2.41±0.03 <sup>f</sup>	2.17±0.05 <sup>d</sup>	2.16±0.09 <sup>d</sup>	1.76±0.06 <sup>c</sup>	1.35±0.05 <sup>a</sup>
C16:0	19.13±0.32 <sup>b</sup>	19.93±0.56 <sup>bc</sup>	20.46±0.29 <sup>e</sup>	22.28±0.86 <sup>d</sup>	20.60±0.83 <sup>e</sup>	16.88±0.89 <sup>a</sup>	16.86±0.26 <sup>a</sup>
C18:0	6.61±0.03 <sup>bc</sup>	6.74±0.08 <sup>e</sup>	6.60±0.09 <sup>bc</sup>	7.87±0.08 <sup>e</sup>	7.28±0.10 <sup>d</sup>	6.50±0.11 <sup>b</sup>	6.29±0.03 <sup>a</sup>
C24:0	4.42±0.10 <sup>d</sup>	8.62±0.19 <sup>f</sup>	6.32±0.12 <sup>e</sup>	3.72±0.05 <sup>b</sup>	2.86±0.03 <sup>a</sup>	4.15±0.09 <sup>c</sup>	3.59±0.06 <sup>b</sup>
ΣSFA	31.66±0.90 <sup>b</sup>	37.59±1.11 <sup>d</sup>	35.79±0.89 <sup>e</sup>	36.04±1.01 <sup>cd</sup>	32.90±1.05 <sup>b</sup>	29.29±0.50 <sup>a</sup>	28.09±0.80 <sup>a</sup>
C16:1n-7	3.22±0.07 <sup>c</sup>	4.54±0.04 <sup>f</sup>	4.43±0.05 <sup>e</sup>	3.77±0.03 <sup>d</sup>	3.81±0.04 <sup>d</sup>	2.99±0.02 <sup>b</sup>	2.66±0.01 <sup>a</sup>
C18:1n-9	25.80±1.10 <sup>b</sup>	24.49±1.09 <sup>b</sup>	25.38±1.04 <sup>b</sup>	28.7±0.90 <sup>cd</sup>	30.24±0.82 <sup>d</sup>	27.64±0.73 <sup>c</sup>	21.63±0.59 <sup>a</sup>
C24:1n-9	0.65±0.01 <sup>a</sup>	1.03±0.01 <sup>b</sup>	2.20±0.02 <sup>e</sup>	1.15±0.01 <sup>c</sup>	1.16±0.03 <sup>c</sup>	1.06±0.03 <sup>b</sup>	1.28±0.02 <sup>d</sup>
ΣMUFA	29.67±0.80 <sup>b</sup>	30.06±0.89 <sup>b</sup>	32.01±0.92 <sup>e</sup>	33.62±0.63 <sup>d</sup>	35.21±0.74 <sup>e</sup>	31.69±0.83 <sup>c</sup>	25.57±0.63 <sup>a</sup>
C18:2n-6	13.76±0.50 <sup>e</sup>	11.32±0.39 <sup>a</sup>	12.38±0.28 <sup>b</sup>	14.09±0.25 <sup>e</sup>	14.26±0.30 <sup>e</sup>	14.31±0.43 <sup>c</sup>	21.85±0.33 <sup>d</sup>
C18:3n-3	6.56±0.07 <sup>f</sup>	5.74±0.05 <sup>d</sup>	3.42±0.06 <sup>c</sup>	2.94±0.07 <sup>b</sup>	2.55±0.04 <sup>a</sup>	8.70±0.03 <sup>e</sup>	5.96±0.02 <sup>c</sup>
C18:3n-6	3.29±0.10 <sup>f</sup>	2.66±0.04 <sup>e</sup>	2.83±0.09 <sup>d</sup>	2.10±0.03 <sup>a</sup>	2.75±0.02 <sup>cd</sup>	2.55±0.04 <sup>b</sup>	3.16±0.03 <sup>e</sup>
C20:4n-6 (ARA)	6.89±0.11 <sup>e</sup>	4.38±0.16 <sup>a</sup>	5.73±0.13 <sup>c</sup>	5.02±0.12 <sup>b</sup>	6.08±0.14 <sup>d</sup>	5.80±0.12 <sup>c</sup>	7.11±0.15 <sup>e</sup>
C20:5n-3 (EPA)	3.68±0.10 <sup>de</sup>	3.80±0.06 <sup>e</sup>	3.57±0.06 <sup>d</sup>	2.42±0.10 <sup>b</sup>	2.01±0.07 <sup>a</sup>	3.65±0.07 <sup>d</sup>	3.00±0.05 <sup>c</sup>
C22:6n-3 (DHA)	4.49±0.09 <sup>e</sup>	4.45±0.4 <sup>e</sup>	3.74±0.05 <sup>b</sup>	3.38±0.03 <sup>a</sup>	4.05±0.04 <sup>d</sup>	4.01±0.03 <sup>d</sup>	3.90±0.02 <sup>c</sup>
ΣPUFA	38.67±0.12 <sup>e</sup>	32.35±0.90 <sup>b</sup>	31.67±0.91 <sup>b</sup>	29.95±0.89 <sup>a</sup>	31.70±0.79 <sup>b</sup>	39.02±0.66 <sup>c</sup>	44.98±0.55 <sup>d</sup>
ΣHUFA	15.06±0.11 <sup>d</sup>	12.63±0.91 <sup>b</sup>	13.04±0.89 <sup>bc</sup>	10.82±0.90 <sup>a</sup>	12.14±0.79 <sup>b</sup>	13.46±0.59 <sup>bc</sup>	14.01±0.49 <sup>cd</sup>
Σn3	14.73±0.50 <sup>e</sup>	13.99±0.49 <sup>d</sup>	10.73±0.21 <sup>b</sup>	8.74±0.11 <sup>a</sup>	8.61±0.19 <sup>a</sup>	16.36±0.20 <sup>f</sup>	12.86±0.12 <sup>c</sup>
Σn6	23.94±0.90 <sup>d</sup>	18.36±0.77 <sup>a</sup>	20.94±0.45 <sup>b</sup>	21.21±0.27 <sup>b</sup>	23.09±0.46 <sup>cd</sup>	22.66±0.83 <sup>c</sup>	32.12±0.83 <sup>e</sup>
n6/n3	1.63±0.02 <sup>c</sup>	1.31±0.01 <sup>a</sup>	1.95±0.03 <sup>d</sup>	2.43±0.03 <sup>e</sup>	2.68±0.04 <sup>e</sup>	1.39±0.02 <sup>b</sup>	2.50±0.03 <sup>f</sup>
n3/n6	0.62±0.01 <sup>d</sup>	0.76±0.01 <sup>f</sup>	0.51±0.01 <sup>c</sup>	0.41±0.01 <sup>b</sup>	0.37±0.01 <sup>a</sup>	0.72±0.01 <sup>c</sup>	0.40±0.01 <sup>b</sup>

## 2.6 7种油脂对吉富罗非鱼生化指标的影响

CO和LO组血清TG含量显著高于其他组,而SPO组显著低于其他组( $P<0.05$ )。MFO和CO组血清TC含量显著高于其他各组,PL组最低( $P<0.05$ )。SO组HDL-C含量显著高于除CO和LO组外的其余各组( $P<0.05$ ),同时SO组LDL-C含量显著低于除MFO和TO组外的其他各组( $P<0.05$ )。CPT-I活性为畜禽油组(PL、CO组)显著高于其他油脂组( $P<0.05$ )。ACC活性为MFO组显著高于其他组( $P<0.05$ ),其次为PL和SO组显著高于剩余4组( $P<0.05$ )。GLU含量SPO和MFO组显著低于TO、LO和SO组( $P<0.05$ )。GOT活性TO组最低,但与SPO和MFO组差异不显著( $P>0.05$ )。MDA含量

SPO组最低, MFO和TO组最高( $P<0.05$ )(表9)。

## 3 讨论

### 3.1 7种油脂的不同脂肪酸组成对吉富罗非鱼生长的调控

本实验旨在比较蚕蛹油与其他6种油脂在吉富罗非鱼实用饲料配方中的应用效果,为避免基础原料所含油脂的干扰,故在配方设计时均选用低油脂原料(豆粕、菜粕、棉粕和面粉等),没有采用动物蛋白原料和高油脂含量的植物原料。在添加油脂水平为5.0%(总脂肪5.6%)时,7种油脂中亚麻籽油和大豆油对吉富罗非鱼生长

表9 7种油脂对吉富罗非鱼血清和肝脏生化指标的影响

Tab. 9 Effects of seven kinds of lipid on serum and liver biochemical indices of GIFT *O. niloticus*

	饲料 diets						
	SPO	MFO	TO	PL	CO	LO	SO
甘油三酯/(mmol/L) TG	0.72±0.01 <sup>a</sup>	1.22±0.05 <sup>d</sup>	0.95±0.05 <sup>c</sup>	0.85±0.01 <sup>b</sup>	1.37±0.03 <sup>c</sup>	1.34±0.03 <sup>c</sup>	0.96±0.05 <sup>c</sup>
总胆固醇/(mmol/L) TC	3.49±0.11 <sup>bc</sup>	3.98±0.11 <sup>d</sup>	3.59±0.11 <sup>c</sup>	3.30±0.06 <sup>a</sup>	4.01±0.10 <sup>d</sup>	3.45±0.04 <sup>b</sup>	3.41±0.04 <sup>ab</sup>
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L) HDL-C	3.08±0.13 <sup>bc</sup>	2.91±0.09 <sup>b</sup>	2.66±0.13 <sup>a</sup>	3.08±0.07 <sup>bc</sup>	3.18±0.10 <sup>cd</sup>	3.17±0.11 <sup>cd</sup>	3.28±0.11 <sup>d</sup>
低密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L) LDL-C	0.29±0.02 <sup>bc</sup>	0.23±0.02 <sup>a</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>	0.28±0.02 <sup>bc</sup>	0.31±0.01 <sup>c</sup>	0.26±0.02 <sup>b</sup>	0.23±0.01 <sup>a</sup>
肉碱脂酰转移酶-I/(pg/mL) CPT-I	245.66±9.08 <sup>b</sup>	288.56±4.01 <sup>d</sup>	193.48±9.30 <sup>a</sup>	327.54±8.55 <sup>c</sup>	358.69±8.65 <sup>f</sup>	263.19±4.74 <sup>c</sup>	251.64±9.33 <sup>bc</sup>
乙酰辅酶A羧化酶*/(U/mL) ACC	21.71±0.69 <sup>b</sup>	38.82±0.62 <sup>c</sup>	28.94±1.00 <sup>c</sup>	35.14±1.50 <sup>d</sup>	20.21±0.84 <sup>ab</sup>	18.67±0.70 <sup>a</sup>	35.94±0.90 <sup>d</sup>
葡萄糖/(mmol/L) GLU	4.80±0.16 <sup>a</sup>	4.81±0.18 <sup>a</sup>	5.16±0.13 <sup>bcd</sup>	4.89±0.13 <sup>ab</sup>	4.93±0.14 <sup>abc</sup>	5.24±0.19 <sup>d</sup>	5.22±0.19 <sup>cd</sup>
谷草转氨酶/(U/L) GOT	5.64±0.10 <sup>ab</sup>	6.05±0.13 <sup>abc</sup>	4.64±0.08 <sup>a</sup>	6.47±0.10 <sup>bcd</sup>	7.99±0.11 <sup>d</sup>	7.40±0.07 <sup>cd</sup>	7.48±0.11 <sup>cd</sup>
总超氧化物歧化酶/(U/mL) T-SOD	45.19±2.21	49.91±1.17	49.98±0.59	46.62±4.70	44.62±4.53	49.98±4.25	50.48±5.98
丙二醛/(nmol/mL) MDA	4.14±0.13 <sup>a</sup>	6.20±0.13 <sup>d</sup>	6.20±0.35 <sup>d</sup>	5.09±0.21 <sup>b</sup>	5.82±0.07 <sup>cd</sup>	6.03±0.41 <sup>d</sup>	5.52±0.30 <sup>c</sup>

注: \*. 肝脏生化指标

Notes: \*. liver biochemical indices

效果最佳, 其次为罗非鱼油、鸡油和猪油, 而海水鱼油效果较差, 蚕蛹油最差。表明投喂植物油(亚麻籽油、大豆油)和畜禽油(猪油、鸡油)饲料比海水鱼油饲料更能促进吉富罗非鱼的生长, 与以往学者对框鳞镜鲤<sup>[4]</sup>、异育银鲫<sup>[2-3]</sup>和黄鳝<sup>[5]</sup>等的研究结果相似。不同油脂对鱼类生长的影响主要在于其脂肪酸的组成, 鱼类必需脂肪酸的供给不足时会出现生长停滞、饲料利用率下降、死亡率升高等不同的缺乏症<sup>[18]</sup>。越来越多的研究发现, 罗非鱼的必需脂肪酸为n-6系列不饱和脂肪酸<sup>[9, 19-20]</sup>。当饲料中亚油酸含量为1.02%~2.66%时, 吉富罗非鱼获得最佳的生长性能和饲料利用率<sup>[21]</sup>。本实验中罗非鱼油、猪油、鸡油、亚麻籽油和大豆油组饲料中亚油酸含量分别为1.17%、0.94%、1.38%、1.05%和2.83%, 均接近或符合吉富罗非鱼的需要量, 其生长效果良好, 且5组间差异不显著。说明以上5种油脂均能够满足吉富罗非鱼生长对必需脂肪酸的需求, 这与以往学者得出猪油<sup>[10]</sup>、鸡油<sup>[7]</sup>和亚麻籽油<sup>[9]</sup>可以解决罗非鱼必需脂肪酸缺乏的结果一致。而蚕蛹油和海水鱼油组饲料中亚油酸含量分别为0.57%和0.41%, 均远低于吉富罗非鱼适宜水平, 不能满足其正常生长所需。同时, 亚麻籽油组吉富罗非鱼生长效果最佳, 且 $\alpha$ -亚麻酸含量丰富。说明在n-6脂肪酸满足罗非鱼生长需要的条件下, 添加 $\alpha$ -亚麻酸对罗非鱼的生长有加成作用<sup>[19]</sup>。因

此蚕蛹油和海水鱼油作为吉富罗非鱼饲料的单一脂肪源时应补充适量的亚油酸。实验还表明, 吉富罗非鱼能够很好地利用饱和脂肪酸和油酸作为能量来源<sup>[7]</sup>, 因为猪油和鸡油中含有大量的饱和脂肪酸和油酸, 而油酸通常首先被 $\beta$ -氧化产生能量<sup>[22]</sup>, 且本实验中猪油组和鸡油组罗非鱼肝脏肉碱脂酰转移酶-I(CPT-I是脂肪分解酶中的限速酶, 可将不能直接透过线粒体膜的长链脂酰辅酶A转入线粒体基质进行 $\beta$ 氧化<sup>[23]</sup>)活性显著高于其他组, 更证实了这一观点。

### 3.2 7种油脂对吉富罗非鱼营养组成的不同影响

本实验发现, 亚麻籽油和大豆油可显著提高吉富罗非鱼全鱼和肌肉的粗脂肪含量及血清TG的含量, 且罗非鱼对两种饲料的脂肪沉积率均最高, 而蚕蛹油可显著降低鱼体和各组织粗脂肪及血清TG的含量。研究表明亚麻籽油和大豆油主要以在肌肉中沉积为主, 且 $\alpha$ -亚麻酸具有降低罗非鱼体脂和血脂水平的作用。但过高水平的 $\alpha$ -亚麻酸和亚油酸均可导致鱼体蓄积过多脂肪, 给鱼类的脂质代谢带来压力<sup>[8, 21, 24]</sup>, 可能为亚麻籽油中高含量的 $\alpha$ -亚麻酸和大豆油中高含量的亚油酸引起两组饲料中的 $\sum n3/\sum n6$ 失衡, 影响罗非鱼的脂质代谢<sup>[8]</sup>。同时, 大豆油组罗非鱼血清HDL-C含量较高, 而总胆固醇和LDL-C含量



较低,说明大豆油具有预防罗非鱼动脉血管硬化的作用,可能与鱼体肝脏自身合成的内源性胆固醇减少有关。

海水鱼油可显著降低罗非鱼全鱼粗脂肪含量,但主要以腹脂的形式堆积体内,海水鱼油组罗非鱼血清TG和TC含量均较高,且ACC(ACC是脂肪酸合成的限速酶,是软脂酸合成的第一步反应,催化乙酰辅酶A转化为丙二酸单酰辅酶A<sup>[23]</sup>)活性显著高于其他组,印证了海水鱼油可显著增加罗非鱼体内脂肪堆积的结果,这与王煜恒等<sup>[6]</sup>对异育银鲫的研究结果一致。罗非鱼油可降低吉富罗非鱼肌肉粗脂肪含量,且和海水鱼油一样均会增加吉富罗非鱼鱼体和肌肉的灰分含量,说明海水鱼油和罗非鱼油均有利于鱼体对矿物质的积累。鸡油能够显著增加吉富罗非鱼对饲料蛋白质的沉积,但也容易导致鱼体和组织中脂肪的蓄积,该组罗非鱼各组织中脂肪含量均较高,对鱼体健康不利<sup>[7]</sup>。这在其他指标中也得以证实,如血清TG、TC、LDL-C和GOT(GOT主要分布于肝细胞中,当肝细胞受到损伤时,GOT从肝细胞中释放致使其在血清中的活性升高,升高程度与肝细胞受损程度一致<sup>[25]</sup>)活性均最高。说明鸡油易引起吉富罗非鱼动脉硬化和危害肝脏健康。同时,本实验中猪油组罗非鱼肝脏脂肪含量相对偏低,与以往学者关于猪油会导致鱼体脂肪肝、影响肝功能<sup>[12]</sup>的说法有差异,且血清TG和TC含量均较低,甚至TC含量为最低。可能与养殖期间的水温(27~31℃)有关,高水温有利于吉富罗非鱼对猪油的利用。从猪油组罗非鱼较高的CPT-1和ACC活性可说明脂肪的合成及分解处于快速代谢状态,减少了过多的脂肪沉积。另外,肝脏是鱼类脂肪代谢重要的调控器官<sup>[26]</sup>,猪油组肝体比最高,这是否与脂质代谢速率的加快有关需进一步研究。本实验还发现鸡油和亚麻籽油可使吉富罗非鱼形体相对变长,而罗非鱼油可使其相对变短。

### 3.3 7种油脂的脂肪酸组成会影响吉富罗非鱼肌肉的脂肪酸组成

鱼类从饲料中获取脂肪,经过同化作用将其变为体脂沉积。饲料中添加不同的油脂会影响动物对脂肪的消化吸收和利用,且对于体脂中脂肪酸的组成有一定的影响<sup>[6]</sup>。本研究发现虽然海水鱼油组饲料中高不饱和脂肪酸水平远高

于其他组,但该组吉富罗非鱼肌肉中高不饱和脂肪酸水平除略高于猪油组和鸡油组外,均低于其他组。同时,除海水鱼油组外,罗非鱼肌肉中亚油酸或 $\alpha$ -亚麻酸含量低于饲料中的含量。说明吉富罗非鱼对饲料中高不饱和脂肪酸的利用能力有限,鱼类摄食的饲料中高不饱和脂肪酸含量较低时 $\Delta 6$ 去饱和酶和 $\Delta 5$ 去饱和酶活性升高<sup>[27]</sup>,可将C18不饱和脂肪酸(亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸)转化为高不饱和脂肪酸<sup>[21, 28]</sup>。这可能与淡水鱼类的必需脂肪酸主要为亚油酸和 $\alpha$ -亚麻酸,且有将其转化为高不饱和脂肪酸的能力相关。这已在异育银鲫<sup>[2-3]</sup>、框鳞镜鲤<sup>[4]</sup>、黄鳝<sup>[5]</sup>和尼罗罗非鱼<sup>[7]</sup>等淡水鱼中得到证实。研究还表明,尽管不同油脂的饲料脂肪酸组成差异较大,但各组吉富罗非鱼肌肉中脂肪酸的组成均主要为软脂酸、油酸和亚油酸。说明吉富罗非鱼肌肉脂肪酸具有一定的稳定性,可能与鱼体脂肪为结构脂肪有关<sup>[29]</sup>,但也在一定程度上受饲料脂肪酸组成的影响<sup>[3]</sup>。鱼体肌肉为人类主要摄食的组织,且摄食高不饱和脂肪酸有利于人体健康。例如,花生四烯酸是形成前列腺酸的前体物质;EPA具有抗血小板聚集、抗凝血作用,可降低患心肌梗死的几率<sup>[23]</sup>;DHA则是大脑、神经、视网膜等组织的主要结构物质<sup>[30]</sup>。因此从肌肉脂肪酸组成方面考虑,蚕蛹油、亚麻籽油和大豆油最优,可显著提高罗非鱼肌肉中人体必需脂肪酸(亚油酸、 $\alpha$ -亚麻酸)的含量,且蚕蛹油组吉富罗非鱼肌肉中高不饱和脂肪酸含量最高。

### 3.4 7种油脂对吉富罗非鱼血清生化指标的影响

血液生化指标与摄食的营养素密切相关,更能反映出不同营养组成的饲料对鱼类机体代谢变化的影响<sup>[7]</sup>。在无其他因素干扰时,鱼类血糖水平可作为机体营养状况的指标,血糖含量较高时,鱼类表现为积极摄食,健康状况良好<sup>[31]</sup>。本实验中蚕蛹油和海水鱼油组吉富罗非鱼血清葡萄糖含量较低,这与其生长较差的结果一致。油脂不仅影响鱼类机体代谢,同时在机体的免疫上也起到了相应的调节作用<sup>[32]</sup>。本实验发现海水鱼油组和罗非鱼油组血清MDA含量最高,蚕蛹油组最低。表明两种鱼油组鱼体脂质过氧化比较严重,鱼体受到的氧化应激较强。因饲料中n-3高不饱和脂肪酸含量海水鱼油组最

高,罗非鱼油组次之,从一定程度上反映了饲料中高水平的n-3高不饱和脂肪酸可能会导致机体处于过氧化胁迫状态<sup>[33]</sup>,鱼类需要通过一些生理代谢以缓解这种不良状态<sup>[34]</sup>。说明吉富罗非鱼饲料中添加过量的n-3高不饱和脂肪酸(海水鱼油)反而会对机体的生长造成负面影响<sup>[11]</sup>,但是否为导致吉富罗非鱼生长受到抑制的主要原因,尚需要进一步研究。在不同脂肪源对框鳞镜鲤<sup>[4]</sup>和草鱼<sup>[11]</sup>影响的研究中也得到类似的结果。另外,结合血清GOT活性发现,蚕蛹油、海水鱼油和罗非鱼油均有利于罗非鱼肝脏健康。

#### 4 结论

作为吉富罗非鱼饲料的单一脂肪源,蚕蛹油具有降血糖、血脂和体脂,增加鱼体肌肉中 $\alpha$ -亚麻酸和高不饱和脂肪酸含量及保护鱼体肝脏健康等优点,但饲料转化率较低,该组鱼生长速率较其他6种油脂组相对缓慢,主要原因是亚油酸含量缺乏,应用时建议与富含亚油酸的油脂组合。另外,罗非鱼油、猪油、鸡油、亚麻籽油和大豆油均可满足罗非鱼对必需脂肪酸的需求,促生长效果良好。同时,需要注意的是饲料脂肪源中过高水平的亚油酸和 $\alpha$ -亚麻酸均会造成罗非鱼体脂的增加。

#### 参考文献:

- [1] Stickney R R, Hardy R W. Lipid requirements of some warmwater species[J]. *Aquaculture*, 1989, 79(1-4): 145-156.
- [2] 陈家林, 韩冬, 朱晓鸣, 等. 不同脂肪源对异育银鲫的生长、体组成和肌肉脂肪酸的影响[J]. *水生生物学报*, 2011, 35(6): 988-997.  
Chen J L, Han D, Zhu X M, *et al.* Dietary lipid sources for gibel carp *Carassius auratus gibelio*: growth performance, tissue composition and muscle fatty acid profiles[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(6): 988-997 (in Chinese).
- [3] 张媛媛, 刘波, 戈贤平, 等. 不同脂肪源对异育银鲫生长性能、机体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及脂质代谢的影响[J]. *水产学报*, 2012, 36(7): 1111-1118.  
Zhang Y Y, Liu B, Ge X P, *et al.* Effect of dietary oil sources on growth performance, body composition, the serum biochemical indices, fatty acids composition and lipid metabolism of *Carassius auratus gibelio*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(7): 1111-1118 (in Chinese).
- [4] 程小飞, 田晶晶, 吉红, 等. 蚕蛹基础日粮中添加不同脂肪源对框鳞镜鲤生长、体成分及健康状况的影响[J]. *水生生物学报*, 2013, 37(4): 656-668.  
Cheng X F, Tian J J, Ji H, *et al.* Effects of different lipid sources in the silkworm pupa-based diet for mirror carp (*Cyprinus carpio* var. *specularis*) on growth performance, body composition and health status[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, 37(4): 656-668 (in Chinese).
- [5] 周秋白, 朱长生, 吴华东, 等. 饲料中不同脂肪源对黄鳝生长和组织中脂肪酸含量的影响[J]. *水生生物学报*, 2011, 35(2): 246-255.  
Zhou Q B, Zhu C S, Wu H D, *et al.* Effects of dietary lipid sources on tissue fatty acids profile and growth performance in female rice field eel *Monopterus albus*, Zuiew[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(2): 246-255 (in Chinese).
- [6] 王煜恒, 王爱民, 刘文斌, 等. 不同脂肪源对异育银鲫体脂沉积、内源酶活性和脂肪酸组成的影响[J]. *动物营养学报*, 2011, 23(4): 604-614.  
Wang Y H, Wang A M, Liu W B, *et al.* Effects of lipid sources on body lipid deposition, endogenous enzyme activities and fatty acid composition of *Carassius auratus gibelio*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2011, 23(4): 604-614 (in Chinese).
- [7] 宋益贞. 不同脂肪源对罗非鱼生长特性和肌肉品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2012.  
Song Y Z. Effects of different lipid sources on growth and muscle qualities of tilapia[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012 (in Chinese).
- [8] 关勇. 亚麻籽油对吉富罗非鱼生长、体组成、脂质代谢及抗氧化能力的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2014.  
Guan Y. Effects of linseed oil on growth, body composition, lipid metabolism and antioxidant capacity of gift tilapia (*Oreochromis niloticus*) juvenile[D]. Chongqing: Southwest University, 2014 (in Chinese).
- [9] 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]. *Journal of Applied Aquaculture*, 2007, 19(2): 29-49.
- [10] 徐韬, 彭祥和, 林鑫, 等. 猪油对罗非鱼生长及餐后脂质代谢的影响[J]. *淡水渔业*, 2016, 46(1): 80-86.
- Xu T, Peng X H, Lin X, *et al.* Effects of different levels of lard on growth and postprandial lipid metabolism in tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Freshwater Fisheries*, 2016, 46(1): 80-86 (in Chinese).
- [11] Du Z Y, Clouet P, Huang L M, *et al.* Utilization of different dietary lipid sources at high level in herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella*): mechanism related to hepatic fatty acid oxidation[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2008, 14(1): 77-92.
- [12] 陈海燕, 朱邦科, 樊启学, 等. 不同脂肪源对鳊幼鱼生长、血清生化组成和肝脏的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2013, 32(2): 116-122.
- Chen H Y, Zhu B K, Fan Q X, *et al.* Effect of dietary lipid sources on growth, blood biochemical indices and liver of juvenile yellowcheek carp (*Elopichthys bambusa*)[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2013, 32(2): 116-122 (in Chinese).
- [13] 蒋宗杰. 蚕蛹性价比评估及对鲫鱼生长影响的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- Jiang Z J. Evaluation of performance-to-price ratio of silkworm treated by different methods and the effect on growth of crucian carp[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010 (in Chinese).
- [14] 潘文娟, 方婷婷, 廖爱美, 等. 不同蚕蛹油中脂肪酸的性状及组分分析[J]. *食品科学*, 2011, 32(4): 148-151.
- Pan W J, Fang T T, Liao A M, *et al.* Character and fatty acid composition of silkworm pupal oil[J]. *Food Science*, 2011, 32(4): 148-151 (in Chinese).
- [15] 胡金鹿, 陈伟平. 蚕蛹油对高脂血症大鼠载脂蛋白及脂代谢相关酶的影响[J]. *中草药*, 2011, 42(2): 300-306.
- Hu J L, Chen W P. Effect of silkworm chrysalis oil on apoprotein and lipid-metabolized enzyme level in hyperlipidemia rats[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2011, 42(2): 300-306 (in Chinese).
- [16] 何自立, 陈伟平, 单巍. 蚕蛹油对大鼠非酒精性脂肪肝形成的影响[J]. *中国微生态学杂志*, 2007, 19(6): 483-485.
- He Z L, Chen W P, Shan W. The effects of chrysalis oil on the formation of nonalcoholic steatohepatitis[J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2007, 19(6): 483-485 (in Chinese).
- [17] 田晶晶, 萧培珍, 吉红, 等. 实用饲料对养殖草鱼体组织脂肪酸组成的影响[J]. *饲料工业*, 2013, 34(20): 22-27.
- Tian J J, Xiao P Z, Ji H, *et al.* Influence of practical diets on tissue fatty acid composition in reared grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. *Feed Industry*, 2013, 34(20): 22-27 (in Chinese).
- [18] Moghaddam J A, Abedian-Kenari A, Khodabandeh S. Effects of dietary vegetal fatty acid and fat content on growth and acclimation to Caspian Sea water in Caspian brown trout (*Salmo trutta caspius*) parr[J]. *Aquaculture*, 2013, 412-413: 144-150.
- [19] 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* × *Oreochromis aureus*, fed diets containing various levels of linoleic and linolenic acids[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2013, 44(1): 42-55.
- [20] Lim C, Yildirim-Aksoy M, Klesius P. Lipid and fatty acid requirements of tilapias[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2011, 73(2): 188-193.
- [21] 田娟, 涂玮, 文华, 等. 吉富罗非鱼对饲料亚油酸的需要量[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(1): 104-116.
- Tian J, Tu W, Wen H, *et al.* Optimal dietary linoleic acid requirement for the advanced juvenile GIFT strain of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(1): 104-116 (in Chinese).
- [22] Henderson R J. Fatty acid metabolism in freshwater fish with particular reference to polyunsaturated fatty acids[J]. *Archives of Animal Nutrition*, 1996, 49(1): 5-22.
- [23] 查锡良, 药立波. 生物化学与分子生物学[M]. 第8版. 北京: 人民卫生出版社, 2013.
- Zha X L, Yao L B. *Biochemistry and Molecular Biology*[M]. 8th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013 (in Chinese).
- [24] Bell J G, Henderson R J, Tocher D R, *et al.* Replacement of dietary fish oil with increasing levels of linseed oil: modification of flesh fatty acid compositions in Atlantic salmon (*Salmo salar*) using a fish oil finishing diet[J]. *Lipids*, 2004, 39(3): 223-232.
- [25] Nyblom H, Berggren U, Balldin J, *et al.* High AST/ALT ratio may indicate advanced alcoholic liver disease rather

- than heavy drinking[J]. *Alcohol and Alcoholism*, 2004, 39(4): 336-339.
- [26] 邹思湘. 动物生物化学[M]. 第4版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- Zou S X. *Animal Biochemistry*[M]. 4th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010 (in Chinese).
- [27] Caballero M J, Obach A, Rosenlund G, *et al.* Impact of different dietary lipid sources on growth, lipid digestibility, tissue fatty acid composition and histology of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Aquaculture*, 2002, 214(1-4): 253-271.
- [28] 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]. *Aquaculture International*, 2010, 18(6): 1105-1119.
- [29] 韩光明, 王爱民, 徐跑, 等. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼体脂沉积及脂肪酸组成的影响[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(2): 338-349.
- Han G M, Wang A M, Xu P, *et al.* Effects of dietary lipid levels on fat deposition and fatty acid profiles of GIFT, *Oreochromis niloticus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(2): 338-349 (in Chinese).
- [30] 王健, 丁晓雯, 孙玉侠, 等. 蚕蛹油保健功能的研究进展[J]. *食品科学*, 2012, 33(13): 339-342.
- Wang J, Ding X W, Sun Y X, *et al.* Research progress in healthy functions of silkworm pupal oil[J]. *Food Science*, 2012, 33(13): 339-342 (in Chinese).
- [31] Imsland A K, Foss A, Gunnarsson S, *et al.* The interaction of temperature and salinity on growth and food conversion in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Aquaculture*, 2001, 198(3-4): 353-367.
- [32] Trichet V V. Nutrition and immunity: an update[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(3): 356-372.
- [33] Nogueira C W, Quinhones E B, Jung E A C, *et al.* Anti-inflammatory and antinociceptive activity of diphenyl diselenide[J]. *Inflammation Research*, 2003, 52(2): 56-63.
- [34] Yu T C, Sinnhuber R O. Effect of dietary  $\omega 3$  and  $\omega 6$  fatty acids on growth and feed conversion efficiency of coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*)[J]. *Aquaculture*, 1979, 16(1): 31-38.

## Comparative study on effects of silkworm pupal oil and other six kinds of lipid on growth, body composition and lipid metabolism of GIFT *Oreochromis niloticus*

BAI Fujin<sup>1</sup>, LUO Li<sup>1\*</sup>, HUANG Xianzhi<sup>2</sup>, CHEN Yongjun<sup>1</sup>,  
HU Xin<sup>1</sup>, HUANG Wang<sup>1</sup>, LIN Ken<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Freshwater Resources and Reproductive Development of Ministry of Education,  
College of Animal Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. State Key Laboratory of Silkworm Genome Biology, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** The experiment was conducted to study the feasibility of the application of silkworm pupal oil to GIFT *Oreochromis niloticus* feed. Seven isonitrogenous and isolipidic diets were formulated by adding 5.0% silkworm pupal oil (SPO), marine fish oil (MFO), tilapia oil (TO), pork lard (PL), chicken oil (CO), linseed oil (LO) and soybean oil (SO), respectively, to the basal diet to feed tilapia [initial body weight (47.51±0.52) g]. Each treatment contained three replicates with 20 fish per replicate and fish were fed for 56 days. The results showed that the final body weight, weight gain rate and specific growth rate of LO and SO groups were significantly higher than that of SPO and MFO groups, but showed no significant differences with that of TO, PL and CO groups. Feed conversion ratio of SPO group was significantly higher than that of other groups, except that of MFO group, while protein efficiency rate showed an opposite trend. Feed intake showed the lowest value in SPO group, and highest value in SO group. TO group presented the lowest viscerosomatic index, body length / body depth and intraperitoneal fat ratio and the highest condition factor. Hepatosomatic index in PL group was significantly higher than that of other groups except LO group. Intraperitoneal fat ratio in MFO group was significantly higher than that of other groups except CO group. Compared with the other groups, SPO could reduce the crude lipid in whole body lipid and tissue and triglyceride (TG), glucose and malonaldehyde contents in serum. MFO could reduce the crude lipid in whole body and enhance the acetyl-CoA carboxylase (ACC) activity in fish liver. PL groups presented lower TG and total cholesterol (TC) contents in serum and higher carnitine acyl transferase-I and ACC activities in liver. The highest TG, TC, low density lipoprotein cholesterol (LDL-C) contents and aspartate transaminase activity were observed in serum of CO group. LO and SO could significantly increase the lipid retention ratio and crude lipid content in whole body and muscle. SO significantly increased the high density lipoprotein cholesterol (HDL-C) and reduced LDL-C and TC contents in serum. SPO, LO and SO, respectively, could significantly increase highly unsaturated fatty acids,  $\alpha$ -linolenic acid and linoleic acid contents in fish muscle. In conclusion, although fish growth performance is affected, SPO has advantages of decreasing body lipid, blood lipid and glucose, protecting fish health, and optimizing muscle fatty acids composition.

**Key words:** GIFT *Oreochromis niloticus*; silkworm pupal oil; lipid source; lipid metabolism; serum biochemical indices

**Corresponding author:** LUO Li. E-mail: luoli1972@163.com

**Funding projects:** National Special Research Fund for Non-Profit Sector (Agriculture) (201303053); Technological System of National Modern Sericultural Industry (CARS-22); National Natural Science Foundation of China (31101909)