

文章编号: 1000-0615(2018)07-1094-17

DOI: 10.11964/jfc.20170310739

## 不同脂肪源对黄颡鱼幼鱼生长性能、体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及抗氧化能力的影响

陆游, 金敏, 袁野, 熊家, 马红娜, 周歧存\*

(宁波大学海洋学院, 鱼类营养研究室, 浙江宁波 315211)

**摘要:** 为研究不同脂肪源对黄颡鱼幼鱼生长性能、体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及抗氧化能力的影响, 进行为期8周的养殖实验。实验配制了4种分别添加有椰子油(CO)、苏子油(PO)、葵花籽油(SO)、鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)的等氮等脂的饲料, 喂养平均初始体质量为(1.52±0.00)g的黄颡鱼幼鱼。实验结果显示: 不同脂肪源对黄颡鱼终末体质量(FBW)、增重率(WGR)、特定生长率(SGR)和成活率(SR)均无显著影响, 对饲料系数(FCR)影响显著, 各组SR均在95%以上。各组间的肝体比(HSI)、肥满度(CF)均有显著性差异, 而脏体比(VSI)和肠脂比(IPR)无显著性差异。HSI和CF均以鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组最高, 葵花籽油(SO)组最低。黄颡鱼的鱼体水分、粗蛋白和灰分不受饲料脂肪源的影响, 而椰子油(CO)组的粗脂肪含量显著高于其他3组, 为10.51%, 剩余3组间无显著性差异。饲料中脂肪源对黄颡鱼肌肉、肝脏组织脂肪酸组成和含量影响显著, 并且肌肉和肝脏中脂肪酸含量变化与饲料中相应脂肪酸含量变化基本一致, 椰子油(CO)组组织中饱和脂肪酸(SFA)含量最高, 苏子油(PO)组组织中亚麻酸(ALA)和n-3 PUFA含量最高, 葵花籽油(SO)组组织中亚油酸(LA)和n-6 PUFA含量最高, 而鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组组织中脂肪酸较为均衡。黄颡鱼血清中的总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、球蛋白(GLOB)、白蛋白/球蛋白(A/G)、谷草转氨酶(AST)、总胆固醇(CHOL)、甘油三酯(TG)、血糖(GLU)、肌酸激酶(CK)含量不受饲料脂肪源的影响。各组黄颡鱼肝脏中超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)、谷胱甘肽S转移酶(GST)活性有显著差异。椰子油(CO)组的SOD和GST活性最高, 而MDA含量最低。研究表明, 在添加豆油的基础上, 椰子油、苏子油、葵花籽油和鱼油与葵花籽油1:1混合油都可以用作黄颡鱼饲料的脂肪源; 证实了鱼体组织中脂肪酸组成基本可以反映饲料脂肪酸组成, 并且说明了黄颡鱼具有延长和去饱和ALA和LA的能力。

**关键词:** 黄颡鱼; 不同脂肪源; 生长性能; 脂肪酸组成

**中图分类号:** S 963.7

**文献标志码:** A

脂肪作为鱼类生长所必需的营养物质之一, 具有许多重要的生理功能, 包括为机体提供能量, 是机体组织的重要组成成分, 作为脂溶性维生素的载体, 能提供必需脂肪酸(essential fatty acids, EFA)、激素和维生素类的合成原料

等<sup>[1]</sup>, 并且添加适宜的脂肪源和脂肪水平, 能节约蛋白质, 降低饲料成本, 减少环境的污染<sup>[2]</sup>。鱼油作为传统水产饲料常用的脂肪源, EPA (eicosapentaenoic acid, C20:5n-3)和DHA (docosahexaenoic acid, C22:6n-3)等必需脂肪酸含量丰富, 适口

收稿日期: 2017-03-07 修回日期: 2017-06-03

资助项目: 国家自然科学基金(31272670); 宁波市农业科技攻关重大项目(2012C10025); 浙江省2011协同创新项目(201101503); 浙江省重中之重一级学科建设项目(20150108); 浙江省重中之重一级学科(水产)开放基金(20150108)

通信作者: 周歧存, E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

性良好,易于吸收。但是受资源的限制,近年来全球鱼油产量降低,不能满足水产养殖业的需求,并且其价格也随之迅速上升。为了维持水产养殖的持续发展,降低饲料的生产成本,急需寻找合适的替代脂肪源。

研究表明,淡水鱼类具有将18碳的多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)转化为高不饱和脂肪酸(highly unsaturated fatty acid, HUFA)的去饱和酶和延长酶<sup>[3]</sup>,因此,淡水鱼的EFA为亚油酸(linoleic acid, LA, C18:2n-6)和亚麻酸( $\alpha$ -linolenic acid, ALA, C18:3n-3)<sup>[4]</sup>。而许多植物油含有丰富的LA和ALA,如大豆油、玉米油、花生油和葵花籽油中LA含量较高;苏子油和亚麻籽油中富含ALA,其含量高达50%以上;甚至椰子油中也含有3%的LA<sup>[5]</sup>。并且植物油的产量大,远远高于鱼油<sup>[6]</sup>,这为植物油部分替代或完全替代鱼油提供了理论依据和现实基础。并且很多实验已经对利用大豆油、亚麻油、菜籽油、橄榄油、玉米油、棕榈油等植物油替代鱼油作为饲料油源进行了研究,证实植物油在水产饲料中具有较好的应用前景<sup>[7-9]</sup>。

黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)又名黄角丁、黄腊丁、昂刺鱼等,隶属于脊索动物门(Chordata)、辐鳍鱼纲(Actinopterygii)、鲶形目(Siluriformes)、鲶科(Bagridae)、黄颡鱼属(*Pelteobagrus*),它是生活在江河水域中的一种淡水经济鱼类<sup>[10]</sup>。黄颡鱼因其肉质鲜美,深受广大消费者喜爱,市场需求大,在中国被认为是一种重要的淡水养殖品种<sup>[11-13]</sup>。据统计,2013年全国黄颡鱼养殖产量已达256~650 t<sup>[14]</sup>。目前,对黄颡鱼的研究主要有形态特征<sup>[15-17]</sup>、群体遗传学<sup>[18]</sup>、生理生化<sup>[19]</sup>、营养成分<sup>[20]</sup>、繁殖<sup>[21]</sup>、病害<sup>[22]</sup>及蛋白质替代<sup>[23]</sup>、碳水化合物<sup>[24]</sup>等。并且不同油源的研究在异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)<sup>[2, 25]</sup>、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)<sup>[26]</sup>、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[27]</sup>、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)<sup>[28]</sup>、吉富罗非鱼(GIFT *Oreochromis niloticus*)<sup>[29]</sup>等很多水产动物上均有报道,另外,覃肖英<sup>[30]</sup>已研究了鱼油、玉米油、豆油、亚麻籽油、棕榈油和菜籽油对黄颡鱼生长性能、体组成及肌肉脂肪酸组成的影响。但是本实验选择了椰子油、苏子油、葵花籽油和鱼油与葵花籽油1:1混合油作为油源,一方面因为这4种油源尚未在黄颡鱼上进行研究,另一方面因为这4种油源所含的主要脂肪酸种类不同,椰子油主要

含有SFA,苏子油主要含有ALA,葵花籽油主要含有LA,鱼油与葵花籽油1:1混合油脂肪酸较为均衡。通过比较它们对黄颡鱼的生长性能、机体抗氧化和血清生化指标以及脂肪酸合成代谢的影响,以期为黄颡鱼理想脂肪源的开发和饲料配方的优化提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 实验饲料

本实验共配制了4种等氮等脂的饲料,除了脂肪来源不一样外,其余饲料成分都相同,饲料配方见表1,以酪蛋白、脱脂鱼粉和大豆浓缩蛋白为蛋白源,以面粉为糖源,4种实验饲料中在豆油和大豆卵磷脂的基础上,再分别添加椰子油(coconut oil, CO)、苏子油(perilla seed oil, PO)、葵花籽油(sunflower seed oil, SO)、鱼油与葵花籽油1:1混合油(fish oil/sunflower seed oil, FO/SO, 对照组)。将表1所有原料粉碎后过80目筛,按配方比例准确称重,并混合均匀,其中维生素和矿物质预混料等微量成分采用逐级扩大法充分混合,之后再加入脂肪源以及适量的水混合均匀,用双螺杆挤条机[F(II)-26,华南理工大学,广州]加工制成粒径为2和4 mm硬颗粒饲料,在烘箱中90 °C熟化30 min,再自然风干至水分为10%左右,用塑封袋密封,保存于-20 °C冰箱中备用。

实验饲料的脂肪酸组成见表2,其中椰子油组(CO)饲料中以饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)为主,含量高达64.83%,且还含有1.32%的ALA;苏子油组(PO)饲料中n-3 PUFA和ALA含量最高,分别为40.63%和38.69%;葵花籽油组(SO)饲料中n-6 PUFA和LA含量最高,分别为46.30%和46.11%;鱼油与葵花籽油1:1混合油组(FO/SO)饲料中HUFA和单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)含量最高,分别为8.05%和36.72%,另含有SFA 20.94%、ALA 1.59%、n-3 PUFA 9.27%、LA 30.92%、n-6 PUFA 31.29%,作为对照组。

### 1.2 实验管理

实验用黄颡鱼幼苗购自浙江嘉兴,于宁波大学鱼类营养研究室淡水养殖基地养殖车间进行为期8周的养殖实验。在实验前,将鱼苗放于300 L玻璃钢养殖桶中暂养2周,期间用蛋白质为

表 1 实验饲料配方及常规成分分析(干物质)  
Tab. 1 Formulation and proximate composition of the experimental diets (dry matter) %

项目 items	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
<b>原料组分 ingredients</b>				
酪蛋白 casein	18.30	18.30	18.30	18.30
脱脂鱼粉 defatted fish meal <sup>1</sup>	18.00	18.00	18.00	18.00
大豆浓缩蛋白 soybean protein concentrate	22.00	22.00	22.00	22.00
椰子油 coconut oil	7.00			
苏子油 perilla seed oil		7.00		
葵花籽油 sunflower seed oil			7.00	3.50
鱼油 fish oil				3.50
豆油 soybean oil	1.00	1.00	1.00	1.00
复合维生素 vitamin premix <sup>2</sup>	0.50	0.50	0.50	0.50
矿物质 mineral premix <sup>3</sup>	1.50	1.50	1.50	1.50
氯化胆碱 choline chloride	0.20	0.20	0.20	0.20
磷酸二氢钙 Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.50	1.50	1.50	1.50
面粉 flour	30.00	30.00	30.00	30.00
总量 total	100.00	100.00	100.00	100.00
<b>营养成分 nutritional ingredient<sup>4</sup></b>				
干物质/% dry matter	91.70	92.10	92.00	91.70
粗蛋白/% crude protein	48.30	47.80	47.50	48.20
粗脂肪/% crude lipid	10.90	11.20	11.20	10.90
灰分/% ash	8.76	8.50	8.62	8.54

注: 1. 脱脂鱼粉: 粗蛋白含量为84%, 粗脂肪含量为2.0%; 乙醇与鱼粉以2:1的比例混合, 在37 °C下浸提3次, 直至脂肪含量接近2.0%, 方法参考Zuo等<sup>[31]</sup>。2. 维生素预混料参照Zhou等<sup>[32]</sup>配制。3. 每千克矿物质预混料含有: 柠檬酸铁11.43 g; 硫酸锌 11.79 g; 硫酸锰(99%) 2.49 g; 五水硫酸铜(99%) 1.06 g; 硫酸镁(99%) 27.31 g; 磷酸二氢钾 233.2 g; 磷酸二氢钠 228.39 g; 乳酸钙 34.09 g; 氯化钴(99%) 0.54 g; 碘酸钾(99%) 0.06 g; 沸石粉 449.664 g。4. 营养成分为实测值

Notes: 1. defatted fish meal: 84% crude protein and 2.0% crude lipid; fish meal was defatted with ethanol (ethanol: fish meal=2:1) at 37 °C for three times until the crude lipid content decreased to approximately 2.0% which according to Zuo *et al.*<sup>[31]</sup>. 2. vitamin premix were based on Zhou *et al.*<sup>[32]</sup>. 3. mineral mixture (g/kg premix): FeC<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub> 11.43 g; ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 11.79 g; MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O (99%) 2.49 g; CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O (99%) 1.06 g; MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O (99%) 27.31 g; KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 233.2 g; NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 228.39 g; C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>CaO<sub>6</sub>·5H<sub>2</sub>O (98%) 34.09 g; CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O (99%) 0.54 g. KIO<sub>3</sub> (99%) 0.06 g; zeolite 449.66 g. 4. Nutrient composition was measured values

40%、脂肪为8%的商品饲料(购自宁波天邦股份有限公司)进行驯化, 使其适应实验养殖环境。暂养结束后, 停食24 h, 挑选体格健壮, 规格一致, 初始体质量约为(1.52±0.00) g的鱼苗, 随机分置于12个养殖桶内, 每桶30尾。每种实验饲料随机投喂3个养殖桶的实验鱼, 即每个处理组3个重复, 总共4个处理组。每天投喂2次(7:00, 17:00), 日投喂量为其体质量的4%~6%, 投喂后1 h观察其摄食情况, 期间记录每天投喂量, 并每两周称重并计数, 以此为依据调整随后两周

饲料投喂量。若有死亡的鱼及时取出并称重记录。养殖前期每隔1天换水量50%左右, 养殖中后期每天换水量50%~100%。养殖期间每天检查充气和水温情况, 实验期间不间断充氧以保证水体中含有足够的溶解氧(>6.0 mg/L), 水温为23~29.5 °C, pH为7.5~8.0。

### 1.3 样品采集与分析方法

养殖实验结束后, 饥饿24 h, 将每个实验桶中的鱼依次全部捞出, 用丁香酚(1:10 000)(上

表2 实验饲料主要的脂肪酸组成(占总脂肪酸的百分比)  
 Tab. 2 Fatty acid profiles (percentage of total fatty acids contents) of four experimental diets %

脂肪酸 fatty acid	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
10:0	2.84	0.13	0.12	0.11
12:0	26.45	0.42	0.30	0.33
14:0	13.96	1.42	1.39	2.99
16:0	15.96	11.85	11.82	16.19
18:0	5.37	3.78	0.35	0.68
24:0	0.07	0.11	0.28	0.25
ΣSFA <sup>1</sup>	64.83	17.85	14.41	20.94
16:1n-7	0.68	0.57	0.59	2.19
18:1n-9	12.55	16.53	31.19	28.41
20:1n-9	1.14	1.07	1.00	1.94
22:1n-9	2.43	2.12	2.36	3.80
24:1n-9	0.16	0.17	0.16	0.38
ΣMUFA <sup>2</sup>	16.96	20.46	35.30	36.72
18:3n-3	1.32	38.69	1.31	1.59
20:5n-3	0.78	0.65	0.59	2.90
22:6n-3	1.48	1.29	1.18	4.78
Σn-3 PUFA <sup>3</sup>	3.58	40.63	3.08	9.27
18:2n-6	13.71	20.25	46.11	30.92
18:3n-6	0.25	0.11	0.19	--
20:4n-6	0.15	0.11	--	0.37
Σn-6 PUFA <sup>4</sup>	14.11	20.47	46.30	31.29
n-3/n-6 PUFA <sup>5</sup>	0.25	1.98	0.07	0.30
HUFA <sup>6</sup>	2.41	2.05	1.77	8.05
DHA/EPA <sup>7</sup>	0.53	0.50	0.50	0.61

注: 1.饱和脂肪酸: 10:0, 12:0, 14:0, 15:0, 16:0, 18:0, 24:0; 2.单不饱和脂肪酸: 16:1n-7, 18:1n-9, 20:1n-9, 22:1n-9, 24:1n-9; 3. n-3多不饱和脂肪酸: 18:3n-3, 20:5n-3, 22:6n-3; 4. n-6多不饱和脂肪酸: 18:2n-6, 18:3n-6, 20:4n-6; 5. n-3/n-6 PUFA: Σn-3 PUFA/Σn-6 PUFA; 6.高不饱和脂肪酸: 20:5n-3, 22:6n-3, 18:3n-6, 20:4n-6; 7. DHA/EPA: 22:6n-3/22:6n-3; --: 未被检出。下同

Notes: 1. SFA, Saturated fatty acids: 10:0, 12:0, 14:0, 15:0, 16:0, 18:0, 24:0; 2. MUFA, Monounsaturated fatty acids: 16:1n-7, 18:1n-9, 20:1n-9, 22:1n-9, 24:1n-9; 3. n-3 PUFA, n-3 Polyunsaturated fatty acids: 18:3n-3, 20:5n-3, 22:6n-3; 4. n-6 PUFA, n-6 Polyunsaturated fatty acids: 18:2n-6, 18:3n-6, 20:4n-6; 5. n-3/n-6 PUFA: Σn-3 PUFA/Σn-6 PUFA; 6. HUFA, Highly unsaturated fatty acids: 20:5n-3, 22:6n-3, 18:3n-6, 20:4n-6; 7. DHA/EPA: 22:6n-3/22:6n-3. --: not detectable. The same below

海化学试剂公司)麻醉后,称重计数,计算增重率、特定生长率、饲料系数和成活率。每个实验桶随机取5尾鱼,称重、测体长,分别剥离内脏团、肝脏和肠道,分离肠系膜脂肪团,用4℃预冷生理盐水(0.68%,氯化钠溶液)冲洗后滤纸吸干,分别称重,计算肥满度、肝体比、脏体比

和肠脂比;收集肝脏用于脂肪酸分析;剥离侧线以上的背部肌肉,置于封口袋中,用于肌肉脂肪酸含量的测定。然后每个实验桶随机选取6尾实验鱼作为全鱼样品,用于鱼体常规成分分析。另取4尾鱼,从尾部静脉抽取血液样本,注入1.5 mL离心管,静置于4℃冰箱中过夜,后

3 500 r/min离心8 min制得血清,置于-80 °C冰箱,用于分析血清指标。每个实验桶随机取4尾鱼,剥离肝脏置于1.5mL的离心管中,并迅速放入液氮中保存,用于肝脏抗氧化酶的检测。

饲料和鱼体常规成分的分析参照AOAC<sup>[33]</sup>方法。其中粗蛋白含量检测采用蛋白质测定仪检测(Leco FB-528);粗脂肪含量检测采用索氏抽提法;水分含量检测采用105 °C烘干恒重法;灰分检测采用马弗炉550 °C焚烧失重法测定。

血清指标,总蛋白(total protein, TP)、白蛋白(albumin, ALB)、球蛋白(globulin, GLOB)、白蛋白/球蛋白(albumin/globulin, A/G)、谷草转氨酶(aspartate aminotransferase, AST)、总胆固醇(total cholesterol, CHOL)、甘油三酯(triglyceride, TG)、血糖(blood glucose, GLU)和肌酸激酶(creatine kinase, CK)生化指标由宁波大学医学院附属医院使用全自动生化分析仪(日立7600-110,日本,东京)进行检测。

肝脏抗氧化酶分析:超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)和谷胱甘肽S转移酶(glutathione S-transferase, GST)均采用南京建成生物工程研究所生产的相关试剂盒测定,相应操作均参照说明书进行。

饲料、肝脏和肌肉组织脂肪酸分析的测定方法参照Zuo等<sup>[34]</sup>,并稍作改进。取适量饲料、肝脏和肌肉样品冷冻干燥48 h,在研钵中充分磨碎后,称取0.1 g样品,移入到12 mL螺纹玻璃管中,加入1 mol/L氢氧化钾甲醇溶液3 mL,于75 °C下水浴20 min,室温冷却。再加入2 mol/L盐酸甲醇溶液3 mL,75 °C水浴20 min。最后加入1 mL的正己烷,振荡萃取,静置分层,取上清液,用GC-MS仪器(Agilent technologies 7890B-5977A, USA)进行分析。各脂肪酸相对含量采用面积归一法进行计算<sup>[35]</sup>。

#### 1.4 计算公式及统计分析方法

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

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

饲料系数(feed conversion ratio, FCR)= $F / (W_t - W_i)$

成活率(survival rate, SR, %)= $100 \times N_t / N_0$

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

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

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

肠脂比(intraperitoneal fat ratio, IPR, %)= $100 \times W_l / W$

式中, $W_0$ 为实验鱼初始均重(g), $W_t$ 为实验终末均重(g), $F$ 为饲料摄入量(g), $W_t$ 为实验鱼终末总体质量(g), $W_i$ 为实验鱼初始总体质量(g), $t$ 为实验天数(d), $N_t$ 为实验结束时鱼数量(尾), $N_0$ 为实验初始鱼数量(尾), $W$ 为鱼体质量(g), $L$ 为鱼体长(cm), $W_h$ 为肝脏质量(g), $W_v$ 为内脏质量(g), $W_l$ 为肠系膜脂肪团质量(g)。

原始数据经Excel 2016初步整理后,用SPSS 23.0软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),并采用Turkey法进行多重比较,以 $P < 0.05$ 表示差异显著,数据采用平均值±标准误(mean±SE,  $n=3$ )表示。

## 2 结果

### 2.1 不同脂肪源对黄颡鱼生长性能、饲料利用和形态学指标的影响

经过8周的饲养实验,各实验组黄颡鱼的终末体质量(FBW)、增重率(WGR)、特定生长率(SGR)和成活率(SR)均无显著性差异( $P > 0.05$ ),而饲料系数(FCR)有显著性差异( $P < 0.05$ )(表3)。FBW、WGR和SGR均以鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组最高,其次是椰子油(CO)组,葵花籽油(SO)组最低。各组SR均在95%以上。葵花籽油(SO)组FCR最高为1.36,而鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组最低为1.25。各组间的肝体比(HSI)、肥满度(CF)均有显著性差异( $P < 0.05$ ),而脏体比(VSI)和肠脂比(IPR)无显著性差异( $P > 0.05$ )。HSI、CF和VSI均以鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组最高,葵花籽油(SO)组最低,而葵花籽油(SO)组的IPR最高为1.70%,椰子油(CO)组的IPR最低为1.00%。

### 2.2 不同脂肪源对黄颡鱼全鱼体组成成分的影响

各组间黄颡鱼的鱼体水分、粗蛋白和灰分含量无显著性差异( $P > 0.05$ ),而粗脂肪含量有显著性差异( $P < 0.05$ )(表4)。全鱼的鱼体水分含量范围在71.46%~72.03%,粗蛋白含量在14.79%~15.47%,灰分含量在0.13~0.14;椰子油(CO)组的粗脂肪含量显著高于其他3组( $P < 0.05$ ),为10.51%,

表3 饲料脂肪源对黄颡鱼生长性能和饲料利用的影响

Tab. 3 Effect of dietary lipid sources on growth performance and feed utilization of juvenile yellow catfish

生长性能和饲料利用 growth performance and feed utilization	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
初始体质量/g IBW	1.52±0.01	1.52±0.00	1.51±0.00	1.52±0.01
终末体质量/g FBW	8.11±0.29	7.98±0.36	7.79±0.21	8.60±0.45
增重率/% WGR	452.80±6.65	445.36±12.30	429.26±4.31	465.12±29.44
特定生长率/(%/d) SGR	2.99±0.07	2.96±0.08	2.93±0.05	3.09±0.09
饲料系数 FCR	1.28±0.02 <sup>ab</sup>	1.35±0.01 <sup>b</sup>	1.36±0.04 <sup>b</sup>	1.25±0.05 <sup>a</sup>
成活率/% SR	98.89±1.11	98.89±1.11	97.78±1.11	95.56±4.44
肝体比/% HSI	1.84±0.16 <sup>b</sup>	1.60±0.03 <sup>ab</sup>	1.43±0.17 <sup>a</sup>	1.87±0.06 <sup>b</sup>
脏体比/% VSI	6.38±0.25	6.32±0.19	5.89±0.29	6.42±0.10
肥满度/(g/cm <sup>3</sup> ) CF	1.64±0.00 <sup>b</sup>	1.54±0.00 <sup>a</sup>	1.53±0.00 <sup>a</sup>	1.65±0.02 <sup>b</sup>
肠脂比/% IPR	1.00±0.06	1.62±0.56	1.70±0.05	1.53±0.43

注:同行数据上标不同小写字母表示各组间差异显著( $P<0.05$ ),下同

Notes: Values in the same line with different superscripts are significantly different ( $P<0.05$ ), the same below

表4 饲料脂肪源对黄颡鱼全鱼营养成分的影响

Tab. 4 Effect of dietary lipid sources on whole body composition (percentage of live weight) of

juvenile yellow catfish

%

营养成分 nutritional ingredient	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
水分 moisture	71.46±0.56	72.03±0.44	71.94±0.80	71.55±0.65
粗蛋白 crude protein	14.79±0.22	15.47±0.23	14.99±0.27	15.08±0.12
粗脂肪 crude lipid	10.51±0.15 <sup>b</sup>	9.33±0.19 <sup>a</sup>	9.42±0.20 <sup>a</sup>	9.68±0.11 <sup>a</sup>
灰分 ash	0.14±0.00	0.13±0.00	0.14±0.00	0.13±0.00

剩余3组间无显著性差异( $P>0.05$ )。

### 2.3 不同脂肪源对黄颡鱼肌肉脂肪酸组成的影响

各组黄颡鱼肌肉中的脂肪酸组成大概反映了饲料的脂肪酸组成(表5)。椰子油(CO)组的SFA含量最高( $P<0.05$ ),为31.30%,其次是鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组,含量为24.96%,苏子油(PO)组和葵花籽油(SO)组间没有差异( $P>0.05$ );苏子油(PO)组的 $\Sigma n-3$  PUFA含量最高,显著高于其他组( $P<0.05$ ),其次是鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组,另外,苏子油(PO)组ALA的含量也显著高于其他组( $P<0.05$ );鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组中DHA和EPA显著高于其他组( $P<0.05$ ),且HUFA含量也最高( $P<0.05$ );葵花籽油(SO)组中的LA、花生四烯

酸(arachidonic acid, ARA, C20:4n-6)和 $\Sigma n-6$  PUFA含量均最高,显著高于其他组( $P<0.05$ ),而n-3/n-6 PUFA最低( $P<0.05$ )。

### 2.4 不同脂肪源对黄颡鱼肝脏脂肪酸组成的影响

椰子油(CO)组黄颡鱼肝脏中的SFA含量最高( $P<0.05$ ),为25.14%,其次是鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组,苏子油(PO)组和葵花籽油(SO)组间没有显著差异( $P>0.05$ )(表6);苏子油(PO)组中 $\Sigma n-3$  PUFA含量最高,显著高于其他组( $P<0.05$ ),其次是鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组,另外苏子油(PO)组所含ALA和EPA也显著高于其他组( $P<0.05$ );鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组中DHA含量显著高于葵花籽油(SO)组( $P<0.05$ ),与椰子油(CO)组和苏子油

表 5 饲料脂肪源对黄颡鱼肌肉脂肪酸(总脂肪酸的百分数)的影响

Tab. 5 Effect of dietary lipid sources on muscle fatty acid profiles(percentage of total fatty acid composition) of juvenile yellow catfish

脂肪酸 fatty acid	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
C14:0	8.16±0.09 <sup>c</sup>	1.30±0.05 <sup>a</sup>	1.22±0.01 <sup>a</sup>	2.16±0.04 <sup>b</sup>
C16:0	17.02±0.36 <sup>c</sup>	14.07±0.09 <sup>a</sup>	14.85±0.06 <sup>a</sup>	15.92±0.50 <sup>b</sup>
C18:0	5.93±0.01 <sup>a</sup>	6.38±0.01 <sup>b</sup>	6.42±0.10 <sup>b</sup>	6.56±0.00 <sup>b</sup>
C20:0	0.16±0.00 <sup>a</sup>	0.22±0.00 <sup>b</sup>	0.21±0.00 <sup>b</sup>	0.24±0.00 <sup>c</sup>
C22:0	0.03±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>ab</sup>	0.06±0.01 <sup>c</sup>	0.04±0.00 <sup>ab</sup>
ΣSFA	31.30±0.01 <sup>c</sup>	22.00±0.09 <sup>a</sup>	22.75±0.05 <sup>a</sup>	24.96±0.28 <sup>b</sup>
C14:1n-3	0.20±0.03 <sup>b</sup>	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.03±0.00 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>
C16:1n-7	4.93±0.39 <sup>b</sup>	2.48±0.21 <sup>a</sup>	3.02±0.23 <sup>a</sup>	3.54±0.11 <sup>a</sup>
C18:1n-9	28.04±0.29	26.20±1.95	30.54±0.63	28.02±0.57
C20:1n-9	3.10±0.53 <sup>bc</sup>	2.29±0.18 <sup>a</sup>	2.70±0.04 <sup>ab</sup>	3.43±0.17 <sup>c</sup>
C22:1n-9	0.49±0.01 <sup>a</sup>	0.66±0.01 <sup>b</sup>	0.58±0.03 <sup>ab</sup>	0.88±0.04 <sup>c</sup>
ΣMUFA	36.80±0.58	31.67±2.26	36.86±0.49	35.90±0.80
C18:3n-3	0.74±0.32 <sup>a</sup>	16.56±0.00 <sup>d</sup>	1.58±0.07 <sup>c</sup>	1.02±0.02 <sup>b</sup>
C18:4n-3	0.06±0.02 <sup>a</sup>	0.39±0.03 <sup>b</sup>	0.05±0.01 <sup>a</sup>	0.11±0.01 <sup>a</sup>
C20:3n-3	0.28±0.02 <sup>ab</sup>	3.08±0.03 <sup>c</sup>	0.24±0.01 <sup>a</sup>	0.37±0.03 <sup>b</sup>
C20:4n-3	0.33±0.00 <sup>b</sup>	2.31±0.01 <sup>d</sup>	0.28±0.01 <sup>a</sup>	0.62±0.00 <sup>c</sup>
C20:5n-3	0.58±0.01 <sup>b</sup>	0.84±0.04 <sup>c</sup>	0.30±0.01 <sup>a</sup>	1.42±0.00 <sup>d</sup>
C22:5n-3	0.36±0.02 <sup>a</sup>	0.63±0.05 <sup>b</sup>	0.36±0.06 <sup>a</sup>	0.80±0.01 <sup>b</sup>
C22:6n-3	5.69±0.56 <sup>a</sup>	5.69±0.81 <sup>a</sup>	5.02±0.65 <sup>a</sup>	9.87±0.39 <sup>b</sup>
Σn-3 PUFA	8.03±0.59 <sup>a</sup>	29.50±0.84 <sup>c</sup>	7.82±0.78 <sup>a</sup>	14.20±0.35 <sup>b</sup>
C18:2n-6	9.90±0.21 <sup>a</sup>	13.64±0.45 <sup>b</sup>	23.99±0.47 <sup>d</sup>	19.48±0.35 <sup>c</sup>
C18:3n-6	0.12±0.00 <sup>a</sup>	0.16±0.01 <sup>ab</sup>	0.37±0.02 <sup>c</sup>	0.18±0.00 <sup>b</sup>
C20:2n-6	1.85±0.16 <sup>b</sup>	1.12±0.08 <sup>a</sup>	2.70±0.11 <sup>c</sup>	2.44±0.06 <sup>c</sup>
C20:3n-6	2.24±0.14 <sup>c</sup>	0.80±0.06 <sup>a</sup>	3.08±0.24 <sup>d</sup>	1.52±0.06 <sup>b</sup>
C20:4n-6	0.76±0.01 <sup>b</sup>	0.27±0.00 <sup>a</sup>	1.13±0.01 <sup>c</sup>	0.77±0.01 <sup>b</sup>
C22:4n-6	0.12±0.01 <sup>b</sup>	0.05±0.00 <sup>a</sup>	0.18±0.00 <sup>c</sup>	0.11±0.01 <sup>b</sup>
C22:5n-6	0.61±0.13 <sup>ab</sup>	0.20±0.07 <sup>a</sup>	0.77±0.12 <sup>b</sup>	0.27±0.01 <sup>a</sup>
Σn-6 PUFA	15.61±0.55 <sup>a</sup>	16.24±0.52 <sup>a</sup>	32.21±0.82 <sup>c</sup>	18.10±6.34 <sup>ab</sup>
n-3/n-6 PUFA	0.53±0.04 <sup>b</sup>	1.82±0.05 <sup>c</sup>	0.24±0.04 <sup>a</sup>	0.57±0.02 <sup>b</sup>
HUFA	12.99±1.15 <sup>a</sup>	14.54±1.37 <sup>ab</sup>	14.28±0.62 <sup>ab</sup>	18.18±0.26 <sup>b</sup>
DHA/EPA	8.97±0.34 <sup>c</sup>	7.74±0.05 <sup>b</sup>	14.87±0.04 <sup>d</sup>	6.72±0.11 <sup>a</sup>

(PO)组没有显著差异( $P>0.05$ ); 葵花籽油组(SO)黄颡鱼肝脏中LA、ARA和 $\Sigma$ n-6 PUFA含量均最高, 显著高于其他组( $P<0.05$ ), 而n-3/n-6 PUFA最低( $P<0.05$ )。

## 2.5 不同脂肪源对黄颡鱼血清生化指标的影响

各组间黄颡鱼血清中的总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、球蛋白(GLOB)、白蛋白/球蛋白(A/G)、谷草转氨酶(AST)、总胆固醇(CHOL)、甘油三酯

表6 饲料脂肪源对黄颡鱼肝脏脂肪酸(总脂肪酸的百分数)的影响

Tab. 6 Effect of dietary lipid sources on liver fatty acid profiles (percentage of total fatty acid composition) of juvenile yellow catfish

脂肪酸 fatty acid	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
C14:0	5.24±0.15 <sup>c</sup>	0.83±0.09 <sup>ab</sup>	0.69±0.02 <sup>a</sup>	1.10±0.04 <sup>b</sup>
C16:0	13.70±0.32 <sup>b</sup>	12.28±0.17 <sup>a</sup>	12.20±0.38 <sup>a</sup>	13.65±0.20 <sup>b</sup>
C18:0	6.11±0.15	6.55±0.17	6.10±0.07	6.56±0.35
C20:0	0.07±0.00 <sup>a</sup>	0.16±0.01 <sup>b</sup>	0.14±0.01 <sup>b</sup>	0.14±0.01 <sup>b</sup>
C22:0	0.02±0.00	0.02±0.00	0.03±0.01	0.03±0.00
ΣSFA	25.14±0.24 <sup>c</sup>	19.84±0.10 <sup>a</sup>	18.78±0.06 <sup>a</sup>	21.48±0.56 <sup>b</sup>
C14:1n-3	0.52±0.01 <sup>b</sup>	0.03±0.01 <sup>a</sup>	0.02±0.00 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>
C16:1n-7	8.47±0.07 <sup>d</sup>	4.75±0.00 <sup>a</sup>	5.61±0.01 <sup>b</sup>	7.08±0.05 <sup>c</sup>
C18:1n-9	32.42±0.53 <sup>b</sup>	27.08±1.08 <sup>a</sup>	31.15±0.82 <sup>ab</sup>	32.66±1.27 <sup>b</sup>
C20:1n-9	4.02±0.15 <sup>bc</sup>	2.33±0.03 <sup>a</sup>	3.46±0.28 <sup>b</sup>	4.46±0.23 <sup>c</sup>
C22:1n-9	0.14±0.01 <sup>a</sup>	0.26±0.02 <sup>b</sup>	0.30±0.02 <sup>b</sup>	0.25±0.01 <sup>b</sup>
ΣMUFA	45.69±0.57 <sup>b</sup>	34.47±1.10 <sup>a</sup>	40.55±0.73 <sup>a</sup>	43.86±1.66 <sup>ab</sup>
C18:3n-3	0.34±0.03 <sup>a</sup>	9.37±0.18 <sup>b</sup>	0.32±0.01 <sup>a</sup>	0.36±0.01 <sup>a</sup>
C18:4n-3	0.06±0.00 <sup>a</sup>	0.30±0.04 <sup>b</sup>	0.05±0.01 <sup>a</sup>	0.04±0.00 <sup>a</sup>
C20:3n-3	0.32±0.03 <sup>a</sup>	4.23±0.05 <sup>c</sup>	0.33±0.02 <sup>a</sup>	0.54±0.02 <sup>b</sup>
C20:4n-3	0.28±0.03 <sup>a</sup>	3.26±0.15 <sup>b</sup>	0.35±0.07 <sup>a</sup>	0.50±0.06 <sup>a</sup>
C20:5n-3	0.38±0.05 <sup>a</sup>	2.27±0.22 <sup>b</sup>	0.32±0.05 <sup>a</sup>	0.80±0.09 <sup>a</sup>
C22:5n-3	0.23±0.03 <sup>a</sup>	0.83±0.08 <sup>b</sup>	0.22±0.02 <sup>a</sup>	0.34±0.03 <sup>a</sup>
C22:6n-3	8.72±0.81 <sup>ab</sup>	11.31±0.44 <sup>ab</sup>	7.85±0.48 <sup>a</sup>	11.98±1.14 <sup>b</sup>
Σn-3 PUFA	10.32±0.95 <sup>ab</sup>	31.57±0.86 <sup>c</sup>	9.45±0.55 <sup>a</sup>	14.56±1.29 <sup>b</sup>
C18:2n-6	5.73±0.14 <sup>a</sup>	8.73±0.09 <sup>b</sup>	14.71±0.07 <sup>d</sup>	11.16±0.05 <sup>c</sup>
C18:3n-6	0.13±0.02 <sup>a</sup>	0.25±0.07 <sup>ab</sup>	0.49±0.08 <sup>b</sup>	0.16±0.01 <sup>a</sup>
C20:2n-6	2.43±0.12 <sup>a</sup>	1.67±0.01 <sup>a</sup>	4.35±0.26 <sup>b</sup>	3.82±0.40 <sup>b</sup>
C20:3n-6	3.69±0.20 <sup>c</sup>	1.46±0.05 <sup>a</sup>	5.57±0.22 <sup>d</sup>	2.44±0.17 <sup>b</sup>
C20:4n-6	2.72±0.14 <sup>c</sup>	0.73±0.09 <sup>a</sup>	3.61±0.23 <sup>d</sup>	1.67±0.18 <sup>b</sup>
C22:4n-6	0.39±0.02 <sup>bc</sup>	0.21±0.02 <sup>a</sup>	0.51±0.03 <sup>c</sup>	0.36±0.05 <sup>b</sup>
C22:5n-6	0.89±0.01 <sup>c</sup>	0.07±0.00 <sup>a</sup>	1.37±0.02 <sup>d</sup>	0.26±0.02 <sup>b</sup>
Σn-6 PUFA	15.97±0.38 <sup>b</sup>	13.12±0.31 <sup>a</sup>	30.61±0.56 <sup>d</sup>	19.87±0.56 <sup>c</sup>
n-3/n-6 PUFA	0.63±0.06 <sup>b</sup>	2.42±0.04 <sup>c</sup>	0.32±0.03 <sup>a</sup>	0.71±0.03 <sup>b</sup>
HUFA	20.18±1.31	26.25±1.83	24.84±2.01	22.76±3.23
DHA/EPA	21.25±0.31 <sup>c</sup>	4.60±0.11 <sup>a</sup>	20.89±0.93 <sup>c</sup>	14.38±0.03 <sup>b</sup>

(TG)、血糖(GLU)、肌酸激酶(CK)含量均无显著差异( $P>0.05$ )(表7)。其中鱼油与葵花籽油1:1混

合油(FO/SO)组黄颡鱼血清中的TP、ALB、GLOB和CHOL含量略高于其他3组,其次是葵花籽油



(SO)组, 椰子油(CO)组最低; 而椰子油(CO)组黄颡鱼血清中AST、TG和GLU的含量略高于其他3组。

## 2.6 不同脂肪源对黄颡鱼肝脏抗氧化酶活性的影响

不同脂肪源对黄颡鱼肝脏中超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)、谷胱甘肽S转移酶(GST)活性均有显著影响( $P<0.05$ )(表8)。各组间黄

颡鱼肝脏中SOD酶的活性, 椰子油(CO)组最高, 其次是鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组, 葵花籽油(SO)组最低; 肝脏中MDA含量, 椰子油(CO)组最低, 其次是葵花籽油(SO)组, 苏子油(PO)组最高; 黄颡鱼肝脏中GST酶活性, 椰子油(CO)组显著高于其他3组( $P<0.05$ ), 其中葵花籽油(SO)组最低。

表7 饲料脂肪源对黄颡鱼血清指标影响

Tab. 7 Effect of dietary lipid sources on haematological characteristics of juvenile yellow catfish

血清指标 haematological characteristics	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
总蛋白/(g/L) TP	35.47±1.13	36.07±1.22	37.43±1.87	39.63±1.54
白蛋白/(g/L) ALB	10.57±0.43	10.60±0.23	11.03±0.60	11.90±0.68
球蛋白/(g/L) GLOB	24.90±1.20	25.47±26.40	26.40±2.21	27.73±1.50
白蛋白/球蛋白 A/G	0.42±0.01	0.42±0.01	0.42±0.01	0.43±0.01
谷草转氨酶/(U/L) AST	353.00±66.43	321.33±60.00	333.00±59.00	313.00±52.54
总胆固醇/(mmol/L) CHOL	3.53±0.08	3.61±0.22	3.65±0.28	4.10±0.11
甘油三酯/(mmol/L) TG	2.44±0.04	2.27±0.04	2.30±0.14	2.11±0.06
血糖/(mmol/L) GLU	2.75±0.47	2.44±0.63	2.19±0.47	2.50±0.63
肌酸激酶/(U/L) CK	6964.67±1788.34	7125.33±829.43	6042.33±786.16	5057.33±1421.88

表8 饲料脂肪源对黄颡鱼肝脏抗氧化酶活性的影响

Tab. 8 Effect of dietary lipid sources on liver antioxidant enzyme activities of juvenile yellow catfish

抗氧化酶活性 antioxidant enzyme activities	饲料 diet			
	椰子油 CO	苏子油 PO	葵花籽油 SO	鱼油与葵花籽油1:1混合油 FO/SO
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	166.34±1.86 <sup>b</sup>	123.03±3.12 <sup>a</sup>	122.84±3.17 <sup>a</sup>	151.50±6.95 <sup>b</sup>
丙二醛/(nmol/mg) MDA	0.64±0.07 <sup>a</sup>	1.02±0.01 <sup>b</sup>	0.82±0.04 <sup>ab</sup>	1.00±0.09 <sup>b</sup>
谷胱甘肽S转移酶/(U/μg) GST	266.48±3.37 <sup>b</sup>	210.69±8.98 <sup>a</sup>	188.63±4.77 <sup>a</sup>	204.55±12.81 <sup>a</sup>

## 3 讨论

### 3.1 不同脂肪源对黄颡鱼生长性能、饲料利用和鱼体成分的影响

经过8周养殖实验后, 各组黄颡鱼的增重率和成活率分别达到420%和95%以上, 这表明黄颡鱼幼鱼对椰子油、苏子油、葵花籽油和鱼油与葵花籽油1:1混合油均有较好的吸收和利用能力。周秋白等<sup>[36]</sup>对黄鳝(*Monopterus albus*)的研究发现投喂鱼油、大豆油、亚麻油、猪油饲料时, 各组黄鳝的生长性能差异不显著。高坚等<sup>[26]</sup>

对泥鳅稚鱼的研究发现鱼油、大豆油、玉米油、花生油和棕榈油对泥鳅稚鱼生长无显著影响。Caballero等<sup>[27]</sup>在用含有大豆油、菜籽油、棕榈油、橄榄油和鱼油的饲料喂养虹鳟时发现各组虹鳟在鱼体增重方面没有显著差异。以上研究皆与本实验结果相似。虽然各组间的终末体质量(FBW)、增重率(WGR)和特定生长率(SGR)没有显著差异, 但是鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组较其他组稍大, 其次是椰子油(CO)组。这是因为鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组含有较多的HUFA, 同时也提供了适中

水平的ALA和LA,满足了黄颡鱼对EFA的需求,从而促进了其生长。而椰子油(CO)组黄颡鱼生长比其他2组稍好,是由于椰子油(CO)组饲料中含有大量的中链脂肪酸,主要是C12:0,这些脂肪酸都是很好的供能物质,能很快被水解吸收,在肝脏中进行氧化利用<sup>[37]</sup>。虽然椰子油缺乏必需脂肪酸,但饲料中另添加了豆油,满足了鱼体所需,因此生长较其他2组稍好。另外,本实验各组间饲料系数(FCR)存在显著差异,其中鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组最低,其次是椰子油(CO)组,说明其能被黄颡鱼充分消化利用。

本实验各组间的肥满度(CF)和肝体比(HSI)有显著差异,都是鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组最高,然后依次是椰子油(CO)组、苏子油(PO)组、葵花籽油(SO)组,这与高艳玲<sup>[38]</sup>对团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)的研究结果相似,饲料中SFA含量过高会导致肝脏脂肪沉积,肝体比升高,长期投喂会引起脂肪肝。

已有研究表明,饲料组成对鱼体成分组成有重要的影响<sup>[39]</sup>。而本实验中各组间的水分、粗蛋白和灰分含量没有显著差异,这与异育银鲫<sup>[25, 40]</sup>和泥鳅<sup>[26]</sup>实验结果相似。但鱼体粗脂肪含量有显著差异,椰子油(CO)组的鱼体脂肪含量显著高于其他3组。有研究表明PUFA能够提高脂肪酸氧化酶活性,从而降低体脂沉积<sup>[28, 41]</sup>。本实验中椰子油(CO)组饲料中PUFA含量低于其他3组,因此脂肪酸氧化酶活性未被提高,导致鱼体脂肪沉积,所以鱼体粗脂肪含量显著高于其他3组。

### 3.2 不同脂肪源对黄颡鱼肌肉和肝脏脂肪酸组成的影响

鱼体脂肪酸的组成基本反映饲料脂肪酸的组成<sup>[42-45]</sup>,这在异育银鲫<sup>[46]</sup>、黄鳝<sup>[36]</sup>、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)<sup>[47]</sup>等水产动物上均有报道。本实验结果显示,黄颡鱼肌肉和肝脏中脂肪酸含量变化与饲料中相应脂肪酸含量变化基本一致,与上述结论相同。椰子油(CO)组黄颡鱼组织中SFA含量最高,苏子油(PO)组中ALA和n-3 PUFA含量最高,葵花籽油(SO)组中LA和n-6 PUFA含量最高,而鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组中脂肪酸较为均衡。

在黄颡鱼摄食ALA含量较多的苏子油(PO)组饲料时,肝脏组织中的EPA和DHA较其他

组高,摄食LA含量较多的葵花籽油(SO)组饲料时,肝脏组织中的ARA较其他组高,这间接说明了黄颡鱼具有延长和去饱和ALA和LA的能力,这与异育银鲫<sup>[25]</sup>的研究结果相似,证实了淡水鱼类具有将18碳的PUFA转化为HUFA的去饱和酶和延长酶这一结论<sup>[3]</sup>。

而在肌肉组织中,鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组EPA和DHA的含量明显高于苏子油(PO)组,与肝脏组织存在差异;但葵花籽油(SO)组的ARA含量依然是最高,与肝脏组织相同。这说明肌肉组织中的EPA、DHA较ARA更快被利用,这是因为n-3长链多不饱和脂肪酸(n-3 LC-PUFA)比n-6 LC-PUFA更快被整合到细胞膜内<sup>[48]</sup>,所以EPA和DHA的含量相对于ARA有所下降。

各组黄颡鱼肌肉和肝脏中的C14:0含量与饲料中相比均有所下降,另外椰子油(CO)组中C12:0的含量也相对减少,而C16:0和C18:1n-9含量相比饲料中明显增加。说明黄颡鱼可能将多余的SFA延长或去饱和为C16:0和C18:1n-9,或者是因为C12:0和C14:0被氧化,用于提供能量<sup>[49]</sup>。另外,黄颡鱼各组织中HUFA(ARA、DHA)的含量相对于饲料中要高,说明了这些HUFA对鱼体的重要性,因此被保留沉积下来<sup>[50]</sup>。HUFA是细胞膜中磷脂的主要组成部分<sup>[3]</sup>,可用于细胞膜磷脂双分子层的组成,对于细胞膜的形成起到重要作用<sup>[51-52]</sup>。

### 3.3 不同脂肪源对黄颡鱼血清生化指标的影响

鱼类血液指标被广泛用来评价鱼类健康状况、营养状况及对环境的适应状况<sup>[53]</sup>。血清中的总蛋白、白蛋白浓度能准确反映机体蛋白质的吸收与代谢<sup>[40]</sup>,本实验结果显示,各组间黄颡鱼血清中总蛋白和白蛋白浓度没有显著差异,说明不同脂肪源对黄颡鱼蛋白质的吸收代谢没有影响,与张媛媛等<sup>[40]</sup>的研究结果相似。球蛋白在一定程度上反映机体的免疫水平<sup>[29]</sup>,是评价机体体液免疫水平的一个重要指标。饲料中的脂肪尤其是必需脂肪酸是水产动物免疫反应的重要调节因子,其可以提高动物机体的体液免疫和细胞免疫<sup>[54]</sup>。本实验中,各组的球蛋白浓度没有显著差异,与异育银鲫<sup>[40]</sup>的实验结果相同,说明不同脂肪源对黄颡鱼免疫水平无显著影响。

谷草转氨酶是判断鱼体肝脏器官是否损伤的指标,鱼体在正常情况下,血清中谷草转氨

酶含量较少, 只有在肝脏组织细胞遭到破坏和损害时, 其进入血液后才使血液谷草转氨酶活性增强<sup>[55-56]</sup>, 因此, 可以用其来评价肝脏的健康状况<sup>[39]</sup>。本实验结果显示, 不同油源对黄颡鱼血清中的谷草转氨酶含量没有显著影响, 与鳊(*Elopichthys bambusa*)<sup>[57]</sup>、史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)<sup>[58]</sup>、齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)<sup>[59]</sup>的研究结果不同。甘油三酯的含量能够反映鱼体利用储存脂肪的能力<sup>[60]</sup>, 在本实验中, 各组甘油三酯的含量间没有显著差异, 与陈海燕等<sup>[57]</sup>和杜震宇等<sup>[61]</sup>的研究结果不同。本实验中, 总胆固醇、血糖和肌酸激酶均无显著差异, 说明本实验中的几种油源不会改变机体的免疫水平和代谢水平。导致实验结果与其他实验不同的原因可能是鱼的种类、脂肪源的种类和含量的不同。

### 3.4 不同脂肪源对黄颡鱼肝脏抗氧化酶活性的影响

SOD在鱼体的氧化与抗氧化的平衡中起到关键作用<sup>[62]</sup>, 它能清除超氧阴离子自由基(O<sup>2-</sup>), 保护细胞免受损伤<sup>[63]</sup>; GST具有消除体内自由基和解毒的功能<sup>[64]</sup>; 而MDA是自由基引发脂质过氧化反应后的最终分解产物, 其含量越高说明机体损伤越严重<sup>[65]</sup>。有研究显示, 组织中PUFA的含量及其不饱和程度直接决定了组织可能发生的脂质过氧化程度<sup>[66]</sup>。吉红等<sup>[67]</sup>在草鱼和鲤(*Cyprinus carpio*)<sup>[68]</sup>的研究中发现, HUFA, 特别是DHA, 能提高肝脏的抗氧化能力。本研究中, 各组黄颡鱼肝脏中的HUFA含量没有显著差异, 但其含量从高到低依次是: 苏子油(PO)组、葵花籽(SO)油组、鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组、椰子油(CO)组。而椰子油(CO)组黄颡鱼肝脏SOD的活性显著高于苏子油(PO)组和葵花籽(SO)油组, 与鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组无显著差异; 椰子油(CO)组GST的活性显著高于其他3组; 椰子油(CO)组MDA含量显著低于苏子油(PO)组和鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组, 与葵花籽(SO)油组无显著差异。这与上述结论相反, 与奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus* ♀×*O. aureus* ♂)<sup>[69]</sup>、黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)<sup>[70]</sup>的实验结果相似。Song等<sup>[71]</sup>认为高含量DHA饲料可能会通过提高细胞膜脂质过氧化的敏感性和破坏抗氧化系统, 从而对肝脏组织的抗氧化能力产生影响。

## 4 结论

本实验发现, 椰子油(CO)组、苏子油(PO)组、葵花籽(SO)油组、鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组各组黄颡鱼的增重率(WGR), 特定生长率(SGR)和成活率(SR)均无显著差异, 并且增重率和成活率分别达到420%和95%以上, 说明黄颡鱼幼鱼对椰子油、苏子油、葵花籽油和鱼油与葵花籽油1:1混合油均有较好的吸收和利用能力; 而且各组间的血清生化指标几乎没有差异, 说明椰子油、苏子油、葵花籽油和鱼油与葵花籽油1:1混合油不会改变机体的免疫水平和代谢水平。以上结果说明, 在添加豆油的基础上, 椰子油、苏子油、葵花籽油和鱼油与葵花籽油1:1混合油都可以用作黄颡鱼饲料的脂肪源。

结果显示, 椰子油(CO)组组织中SFA含量最高, 苏子油(PO)组组织中ALA和n-3 PUFA含量最高, 葵花籽油(SO)组组织中LA和n-6 PUFA含量最高, 而鱼油与葵花籽油1:1混合油(FO/SO)组组织中脂肪酸较为均衡, 这说明鱼体组织中脂肪酸组成基本反映饲料脂肪酸组成。并且苏子油(PO)组肝脏组织中的EPA和DHA较其他组高, 葵花籽油(SO)组肝脏组织中的ARA较其他组高, 说明了黄颡鱼具有延长和去饱和ALA和LA的能力。

### 参考文献:

- [1] Brown T D, Francis D S, Turchini G M. Can dietary lipid source circadian alternation improve omega-3 deposition in rainbow trout[J]. *Aquaculture*, 2010, 300(1-4): 148-155.
- [2] 王煜恒, 王爱民, 刘文斌, 等. 不同脂肪源对异育银鲫鱼种生长、消化率及体成分的影响[J]. *水产学报*, 2010, 34(9): 1439-1446.  
Wang Y H, Wang A M, Liu W B, et al. Effects of dietary oil sources on growth performance, apparent digestibility and body composition of *Carassius auratus gibelio*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(9): 1439-1446(in Chinese).
- [3] 吉红, 田晶晶. 高不饱和脂肪酸(HUFAs)在淡水鱼类中的营养作用研究进展[J]. *水产学报*, 2014, 38(9): 1650-1665.  
Ji H, Tian J J. Research progresses of the nutritional effects of highly unsaturated fatty acids (HUFAs) in the

- freshwater fish[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38(9): 1650-1665(in Chinese).
- [4] 岳彦峰, 彭士明, 施兆鸿, 等. 脂肪酸营养对鱼类生长、脂代谢及免疫性能影响的研究进展[J]. *现代渔业信息*, 2011, 26(11): 13-19.  
Yue Y F, Peng S M, Shi Z H, *et al.* The effects of fatty acid nutrition on the growth, lipid metabolism and immune performance of the fish[J]. *Modern Fisheries Information*, 2011, 26(11): 13-19(in Chinese).
- [5] 谭肖英, 刘永坚, 田丽霞, 等. 鱼类对饲料脂肪源利用的研究进展[J]. *饲料广角*, 2007(5): 38-41.  
Tan X Y, Liu Y J, Tian L X, *et al.* The research progress on using feed fat source for fish[J]. *Feed China*, 2007(5): 38-41(in Chinese).
- [6] Gunstone F D. The world's oils and fats[M]//Turchini G M, Ng W K, Tocher D R. *Fish Oil Replacement and Alternative Lipid Sources in Aquaculture Feeds*. Boca Raton, Florida: Taylor and Francis Group, 2010.
- [7] Ng W K, Low S Y. Evaluation of spent bleaching clay from palm oil refining as an ingredient for diets of red hybrid tilapia, *Oreochromis sp.*[J]. *Journal of Applied Aquaculture*, 2005, 17(4): 87-97.
- [8] Turchini G M, Torstensen B E, Ng W K. Fish oil replacement in finfish nutrition[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2009, 1(1): 10-57.
- [9] Turchini G M, Ng W K, Tocher D R. *Fish Oil Replacement and Alternative Lipid Sources in Aquaculture Feeds*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [10] 韩庆, 夏维福, 罗玉双, 等. 黄颡鱼蛋白酶活性的研究[J]. *水利渔业*, 2004, 24(6): 6-7.  
Han Q, Xia W F, Luo Y S, *et al.* Studies on the activity of proteinase in *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Reservoir Fisheries*, 2004, 24(6): 6-7(in Chinese).
- [11] Ye W J, Tan X Y, Chen Y D, *et al.* Effects of dietary protein to carbohydrate ratios on growth and body composition of juvenile yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco* (Siluriformes, Bagridae, *Pelteobagrus*)[J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(12): 1410-1418.
- [12] Tan X Y, Xie P, Luo Z, *et al.* Dietary manganese requirement of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*, and effects on whole body mineral composition and hepatic intermediary metabolism[J]. *Aquaculture*, 2012, 326-329: 68-73.
- [13] Zhou Q C, Jin M, Elmada Z C, *et al.* Growth, immune response and resistance to *Aeromonas hydrophila* of juvenile yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco*, fed diets with different arginine levels[J]. *Aquaculture*, 2015, 437: 84-91.
- [14] 董金和. 中国渔业统计年鉴2013[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.  
Dong J H. *China Fishery Statistics Yearbook 2013*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013 (in Chinese).
- [15] 倪勇, 伍汉霖. 江苏鱼类志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.  
Ni Y, Wu H L. *Fishes of Jiangsu Province*[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2006 (in Chinese).
- [16] 王武, 王峰, 张东升. 黄颡鱼养殖技术讲座(一)江黄颡鱼的生物学[J]. *内陆水产*, 2004, 29(4): 13-14.  
Wang W, Wang F, Zhang D S. Yellow catfish farming technology seminar ( I ) biology of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Inland Fisheries*, 2004, 29(4): 13-14(in Chinese).
- [17] 马旭洲, 甘炼, 袁琰. 淮河江黄颡生物学特性及其养殖前景[J]. *中国水产*, 2005(9): 22-24.  
Ma X Z, Gan L, Yuan Y. Biology characteristics and culture foreground of *Pelteobagrus vachellis* Richardson[J]. *China Fisheries*, 2005(9): 22-24(in Chinese).
- [18] 周伟, 王俊, 金斌松, 等. 黄颡鱼群体遗传变异分析[J]. *水产学报*, 2016, 40(10): 1531-1541.  
Zhou W, Wang J, Jin B S, *et al.* Genetic variation based on the mitochondrial DNA control region of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) fingerlings[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(10): 1531-1541(in Chinese).
- [19] 李伟纯, 马旭洲, 王武. 瓦氏黄颡鱼胃、前肠及肝胰脏的主要消化酶活力[J]. *上海水产大学学报*, 2008, 17(4): 423-428.  
Li W C, Ma X Z, Wang W. Digestive enzyme activities in stomach, foreintestine and hepatopancreas of *Pelteobagrus vachelli* Richardson[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17(4): 423-428(in Chinese).
- [20] 黄峰, 严安生, 熊传喜, 等. 黄颡鱼的含肉率及鱼肉营养评价[J]. *淡水渔业*, 1999, 29(10): 3-6.  
Huang F, Yan A S, Xiong C X, *et al.* Evaluation of the nutrition and the rate of flesh in the whole body of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Freshwater Fisheries*, 1999, 29(10): 3-6(in Chinese).
- [21] 段中华, 孙建贻. 瓦氏黄颡鱼的繁殖生物学研究[J]. 水

- 生生物学报, 1999, 23(6): 610-616.
- Duan Z H, Sun J Y. Studies on the reproductive biology of *Pelteobagrus vachelli* (Richardson)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1999, 23(6): 610-616(in Chinese).
- [22] 王武, 张东升, 王峰. 黄颡鱼养殖技术讲座(五)江黄颡鱼的成鱼饲养[J]. 内陆水产, 2004, 29(8): 9-11.
- Wang W, Zhang D S, Wang F. Yellow catfish farming technology seminar(V) adult fish breeding of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Inland Fisheries, 2004, 29(8): 9-11(in Chinese).
- [23] 杨英豪. 大豆浓缩蛋白对瓦氏黄颡鱼幼鱼摄食、生长、消化和蛋白质代谢的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Yang Y H. Effects of dietary soy protein concentrate levels on feed intake, growth performance, digestion and protein metabolism of juvenile darkbarbel catfish *Pelteobagrus vachelli*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese).
- [24] 张世亮. 饲料中糖结构、糖水平及糖脂比对瓦氏黄颡鱼幼鱼生长及糖代谢的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Zhang S L. Effects of dietary carbohydrate source, level and carbohydrate-to-lipid ratio on growth performance and glycometabolism of juvenile darkbarbel catfish, *Pelteobagrus vachelli*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011 (in Chinese).
- [25] 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).
- [26] 高坚, 李洋, 叶伟钊, 等. 不同脂肪源对泥鳅稚鱼生长性能及脂肪酸组成的影响[J]. 水生生物学报, 2016, 40(1): 1-9.
- Gao J, Li Y, Ye W Z, *et al.* The growth performances and the fatty acid compositions of dojo loach *Misgurnus anguillicaudatus* fry fed with different lipid sources[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, 40(1): 1-9(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] 朱大世. 饥饿和不同脂肪源对草鱼体脂含量及脂肪合成酶的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- Zhu D S. The effect of starvation and different fatty acids on the fatty contents and FAS activity of grass carp[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005 (in Chinese).
- [29] 王爱民, 韩光明, 封功能, 等. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生产性能、营养物质消化及血液生化指标的影响[J]. 水生生物学报, 2011, 35(1): 80-87.
- Wang A M, Han G M, Feng G N, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth performance, nutrient digestibility and blood biochemical indices of gift tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2011, 35(1): 80-87(in Chinese).
- [30] 谭肖英. 黄颡鱼脂类营养生理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- Tan X Y. Nutrient physiology of lipid in yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012 (in Chinese).
- [31] Zuo R T, Ai Q H, Mai K S, *et al.* Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth, nonspecific immunity, expression of some immune related genes and disease resistance of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) following natural infestation of parasites (*Cryptocaryon irritans*)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2012, 32(2): 249-258.
- [32] Zhou Q C, Mai K S, Tan B P, *et al.* Partial replacement of fishmeal by soybean meal in diets for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2015, 11(3): 175-182.
- [33] AOAC. Official Methods of Analysis[M] 18th ed. Arlington, VA: Association of Official Analytical Chemists, 2006.
- [34] Zuo R T, Ai Q H, Mai K S, *et al.* Effects of dietary docosahexaenoic to eicosapentaenoic acid ratio (DHA/EPA) on growth, nonspecific immunity, expression of some immune related genes and disease resistance of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) following natural infestation of parasites (*Cryptocaryon irritans*)[J]. Aquaculture, 2012, 334-337: 101-109.
- [35] 冯大伟, 李八方, 赵雪, 等. 鲤鱼、鲑鱼和鳕鱼皮中脂

- 肪酸的气相色谱-质谱(GC/MS)分析与比较[J]. 水利渔业, 2006, 26(5): 21-23.
- Feng D W, Li B F, Zhao X, *et al.* Analysis and comparison of fatty acids in the skin of common carp, squid and cod using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)[J]. *Reservoir Fisheries*, 2006, 26(5): 21-23(in Chinese).
- [36] 周秋白, 朱长生, 吴华东, 等. 饲料中不同脂肪源对黄颡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).
- [37] Luo L, Xue M, Vachot C, *et al.* Dietary medium chain fatty acids from coconut oil have little effects on postprandial plasma metabolite profiles in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquaculture*, 2014, 420-421: 24-31.
- [38] 高艳玲. 不同脂肪源和复合肉碱对团头鲂生长、部分生理机能及体组织脂肪酸组成的影响[D]. 苏州: 苏州大学, 2009.
- Gao Y L. Effects of different lipid diets on growth performance and physiological functions and fatty acids composition of juvenile blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[D]. Suzhou: Suzhou University, 2009 (in Chinese).
- [39] Hansen A C, Rosenlund G, Karlens Ö, *et al.* Total replacement of fish meal with plant proteins in diets for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) I — Effects on growth and protein retention[J]. *Aquaculture*, 2007, 272(1-4): 599-611.
- [40] 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).
- [41] 赵华, 王康宁. 多不饱和脂肪酸对动物体脂沉积及其基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2004, 16(1): 1-5, 46.
- Zhao H, Wang K N. Effect of polyunsaturated fatty acids (PUFA) on body fat deposition and its relative gene expression in animals[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2004, 16(1): 1-5, 46(in Chinese).
- [42] Regost C, Arzel J, Robin J, *et al.* Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in turbot (*Psetta maxima*): 1. growth performance, flesh fatty acid profile, and lipid metabolism[J]. *Aquaculture*, 2003, 217(1-4): 465-482.
- [43] Ji H, Li J, Liu P. Regulation of growth performance and lipid metabolism by dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2011, 159(1): 49-56.
- [44] Li F J, Lin X, Lin S M, *et al.* Effects of dietary fish oil substitution with linseed oil on growth, muscle fatty acid and metabolism of tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22(3): 499-508.
- [45] Francis D S, Turchini G M, Jones P L, *et al.* Effects of dietary oil source on growth and fillet fatty acid composition of Murray cod, *Maccullochella peelii peelii*[J]. *Aquaculture*, 2006, 253(1-4): 547-556.
- [46] 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).
- [47] 李思萌, 吴立新, 姜志强, 等. 饲料脂肪源对大菱鲆幼鱼生长性能和肌肉脂肪酸组成的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(5): 1421-1430.
- Li S M, Wu L X, Jiang Z Q, *et al.* Effects of dietary lipid source on growth performance and muscle fatty acid composition of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(5): 1421-1430(in Chinese).
- [48] Leyton J, Drury P J, Crawford M A. Differential oxidation of saturated and unsaturated fatty acids in vivo in the rat[J]. *British Journal of Nutrition*, 1987, 57(3): 383-

- 393.
- [49] Olsen R E, Henderson R J. Muscle fatty acid composition and oxidative stress indices of Arctic charr, *Salvelinus alpinus* (L.), in relation to dietary polyunsaturated fatty acid levels and temperature[J]. *Aquaculture Nutrition*, 1997, 3(4): 227-238.
- [50] Skonberg D I, Rasco B A, Dong F M. Fatty acid composition of salmonid muscle changes in response to a high oleic acid diet[J]. *Journal of Nutrition*, 1994, 124(9): 1628-1638.
- [51] Skalli A, Robin J H. Requirement of n-3 long chain polyunsaturated fatty acids for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles: growth and fatty acid composition[J]. *Aquaculture*, 2004, 240(1-4): 399-415.
- [52] Ng W K, Koh C B, Din Z B. Palm oil-laden spent bleaching clay as a substitute for marine fish oil in the diets of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2006, 12(6): 459-468.
- [53] 周玉, 郭文场, 杨振国, 等. 鱼类血液学指标研究的进展[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(2): 163-165.  
Zhou Y, Guo W C, Yang Z G, *et al.* Advances in the study of haematological indices of fish[J]. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2001, 10(2): 163-165(in Chinese).
- [54] 陈水春. 饲料脂肪及不同脂肪源对鱼类的影响[J]. *现代渔业信息*, 2008, 23(10): 7-11.  
Chen S C. Effect of dietary fat and different fat sources on fish[J]. *Modern Fisheries Information*, 2008, 23(10): 7-11(in Chinese).
- [55] 张璐, 李静, 谭芳芳, 等. 饲料中不同维生素A含量对花鲈生长和血清生化指标的影响[J]. *水产学报*, 2015, 39(1): 88-96.  
Zhang L, Li J, Tan F F, *et al.* Effects of different dietary vitamin A levels on growth and serum biochemical parameters for Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(1): 88-96(in Chinese).
- [56] 桂丹, 刘文斌. 不同营养添加剂对热应激异育银鲫血液生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2008, 20(2): 228-233.  
Gui D, Liu W B. Effects of different nutritional additives on serum biochemical indices of heat-stressed carp *Carassius auratus gibelio*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2008, 20(2): 228-233(in Chinese).
- [57] 陈海燕, 朱邦科, 樊启学, 等. 不同脂肪源对鳃幼鱼生长、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).
- [58] 高露姣, 施兆鸿, 艾春香. 不同脂肪源对施氏鲟幼鱼血清生化指标的影响[J]. *海洋渔业*, 2005, 27(4): 319-323.  
Gao L J, Shi Z H, Ai C X. Effect of dietary lipid sources on the serum biochemical indices of *Acipenser schrenckii* juvenile[J]. *Marine Fisheries*, 2005, 27(4): 319-323(in Chinese).
- [59] 向泉, 陈建, 周兴华, 等. 5种脂肪源对齐口裂腹鱼生长性能及血清生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2010, 22(2): 498-504.  
Xiang X, Chen J, Zhou X H, *et al.* Effects of five lipid sources on growth performance and serum biochemical indices of *Schizothorax prenanti*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(2): 498-504(in Chinese).
- [60] 朱邦科, 曹文宣. 鲢早期发育阶段鱼体脂肪酸组成变化[J]. *水生生物学报*, 2002, 26(2): 130-135.  
Zhu B K, Cao W X. Fatty acid composition and their changes during early life stage of silver carp *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, 26(2): 130-135(in Chinese).
- [61] 杜震宇, 刘永坚, 郑文晖, 等. 三种脂肪源和两种降脂因子对鲈生长、体营养成分组成和血清生化指标的影响[J]. *水产学报*, 2002, 26(6): 542-550.  
Du Z Y, Liu Y J, Zheng W H, *et al.* The effects of three oil sources and two anti-fat liver factors on the growth, nutrient composition and serum biochemistry indexes of *Lateolabrax japonicus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(6): 542-550(in Chinese).
- [62] Halliwell B, Gutteridge J M C. *Free Radicals in Biology and Medicine*[M]. 3rd ed. Oxford: Clarendon Press, 1999: 170-171.
- [63] Mourente G, Bell J G, Tocher D R. Does dietary tocopherol level affect fatty acid metabolism in fish?[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2007, 33(3): 269-280.
- [64] 瞿建宏, 陈家长, 胡庚东, 等. 苯酚胁迫下罗非鱼组织中过氧化氢酶与谷胱甘肽-S-转移酶的动态变化[J]. 生

- 态环境, 2006, 15(4): 687-692.
- Qu J H, Chen J Z, Hu G D, *et al.* Dynamic changes of catalase and glutathione-s-transferase in the different tissues of tilapia exposed to phenol[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 687-692(in Chinese).
- [65] 王成强, 徐后国, 梁萌青, 等. 饲料亚麻酸含量对大规格鲈鱼生长性能、抗氧化指标和血清生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(10): 3123-3133.
- Wang C Q, Xu H G, Liang M Q, *et al.* Effects of dietary  $\alpha$ -linolenic acid content on growth performance, antioxidant indices and serum biochemical indices of large size Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(10): 3123-3133(in Chinese).
- [66] Porter N A, Caldwell S E, Mills K A. Mechanisms of free radical oxidation of unsaturated lipids[J]. *Lipids*, 1995, 30(4): 277-290.
- [67] 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.
- 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(in Chinese).
- [68] 吉红, 周继术, 曹福余, 等. DHA对鲤抗氧化能力影响的初步研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2009, 18(2): 142-149.
- Ji H, Zhou J S, Cao F Y, *et al.* Effect of DHA on anti-oxidation capacity in common carp (*Cyprinus carpio* L.)[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2009, 18(2): 142-149(in Chinese).
- [69] 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*  $\times$  *O. aureus*[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 1998, 120(2): 331-336.
- [70] Peng S M, Chen L Q, Qin J G, *et al.* Effects of replacement of dietary fish oil by soybean oil on growth performance and liver biochemical composition in juvenile black seabream, *Acanthopagrus schlegelii*[J]. *Aquaculture*, 2008, 276(1-4): 154-161.
- [71] Song J H, Fujimoto K, Miyazawa T. Polyunsaturated (n-3) fatty acids susceptible to peroxidation are increased in plasma and tissue lipids of rats fed docosahexaenoic acid-containing oils[J]. *Journal of Nutrition*, 2000, 130(12): 3028-3033.



## Effects of different lipid sources on growth performance, body composition, the serum biochemical indices, fatty acids composition and antioxidant capacity in juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)

LU You, JIN Min, YUAN Ye, XIONG Jia, MA Hongna, ZHOU Qicun\*

(Laboratory of Fish Nutrition, School of Marine Sciences, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** An 8-week feeding trial was conducted to evaluate the effects of different lipid sources on growth performance, body composition, the serum biochemical indices, fatty acids composition and antioxidant capacity in juvenile yellow catfish. Four isoproteic and isolipidic diets were formulated to contain different lipid sources: coconut oil, perilla oil, sunflower oil, fish oil+sunflower oil (1 : 1) mix oil, respectively, on the basis of adding soybean oil. Each diet was randomly assigned to feed three replicate groups of juvenile yellow catfish whose initial body weight was approximately (1.52±0.00) g. The results showed that the different dietary lipid sources didn't have significant influence on final body weight (FBW), weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and survival rate (SR), but had significant differences in feed conversion ratio (FCR). The SR of all groups was more than 95%. The hepatosomatic index (HSI) and condition factor (CF) showed significant differences among all groups. However, they didn't have significant differences in the viscerosomatic index (VSI) and intraperitoneal fat ratio (IPR). The HSI and CF of fish fed fish oil+sunflower oil (1 : 1) mix oil were significantly higher than other groups. The moisture, the crude protein, the ash content were not significantly affected by lipid sources. But the crude lipid of fish fed coconut oil, which was 10.51%, was significantly higher than other groups. Fatty acid composition of muscle and liver in fish generally reflected the composition of the diet. Furthermore, the different dietary lipid sources had significant differences in the fatty acid composition in the muscle and liver. The saturated fatty acid (SFA) content of fish fed coconut oil was the highest, the  $\alpha$ -linolenic acid (ALA) and n-3 polyunsaturated fatty acids (n-3 PUFA) content of fish fed perilla oil the were the highest, the linoleic acid (LA) and n-6 polyunsaturated fatty acids (n-6 PUFA) content of fish fed sunflower oil were the highest, and the fatty acid composition of fish fed fish oil+sunflower oil (1 : 1) mix oil is more balanced. No significant difference was found among all treatments in total protein (TP), albumin (ALB), globulin (GLOB), A/G, aspartate aminotransferase (AST), total cholesterol (CHOL), triglyceride (TG), blood glucose (GLU) and creatine kinase (CK) in the serum. While the activities of superoxide dismutase (SOD), malondialdehyde (MDA) and glutathione S-transferase (GST) in liver were significantly influenced by lipid sources. Fish fed coconut oil had significantly higher activity of SOD as well as GST, but lower content of MDA, in serum than the other treatments. These results indicate that coconut oil, perilla oil, sunflower oil and fish oil+sunflower oil (1 : 1) mix oil can be used as dietary lipid sources of yellow catfish, on the basis of adding soybean oil. And the fatty acid composition of fish body basically reflected the fatty acid composition of diet and the essential fatty acids of freshwater fish were LA and ALA.

**Key words:** *Pelteobagrus fulvidraco*; different lipid sources; growth performance; fatty acid composition

**Corresponding author:** ZHOU Qicun. E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (31272670); Major Agricultural Scientific and Technological Special Project of Ningbo, China (2012C10025); Collaborative and Innovation Projects of Zhejiang in 2011 (201101503); First Level Discipline Construction Projects of Zhejiang (20150108); Open Fund of Zhejiang Provincial Top Key Discipline of Aquaculture (20150108)