

文章编号: 1000-0615(2019)10-2197-12

DOI: 10.11964/jfc.20190911934

液态和粉末脂肪对吉富罗非鱼幼鱼生长、健康及肌肉品质的影响

叶儒锴¹, 郑 钧¹, 李孟孟¹, 陈汉毅¹, 麻永财¹, 谢帝芝¹,
宁丽军¹, 孙丽华², 王 勇², 李远友^{1*}

(1. 华南农业大学海洋学院, 广东广州 510642;

2. 广州市优百特饲料科技有限公司, 广东广州 511300)

摘要: 在目前的水产配合饲料生产中, 油脂一般以液态形式添加到饲料原料中或者在真空环境中喷涂到饲料颗粒上, 以脂肪粉进行应用的研究报道很少。本研究以豆油(SO, 亚油酸: 亚麻酸=9: 1)和一种由豆油和菜籽油等组成的复合油(BO, 亚油酸: 亚麻酸=5: 1)为脂肪源, 分别以液态和粉末形式添加到饲料原料中制备4种配合饲料(SO1、BO1、SOp、BOp)。用其在室内水族箱中喂养初始平均体质量为15.38 g的吉富罗非鱼幼鱼8周后, 各饲料投喂组鱼的增重率、特定生长率、饲料系数、肝体比、脏体比无显著性差异。与豆油饲料(SO1)投喂组鱼相比, SOp组的肝脏过氧化氢酶及超氧化物歧化酶活性显著升高、肌肉粗灰分含量显著降低, SOp、BO1、BOp组的血清甘油三酯和低密度脂蛋白水平、全鱼的水分含量都显著降低, 肝脏总抗氧化能力、全鱼粗蛋白含量及肌肉剪切力都显著升高。此外, BOp组的血清过氧化氢酶活性及肌肉硬度显著高于SO1、BO1、SOp组。肝脏和肌肉的脂肪酸组成各组间差异不大, 均反映饲料的脂肪酸组成。研究表明, 与液态油相比, 脂肪粉饲料对吉富罗非鱼幼鱼的生长无不良影响, 且可改善鱼的健康及肌肉品质; 复合油的效果优于豆油。结合脂肪粉具有包装、运输、储存、添加方便等优点, 值得在水产养殖生产中进行推广应用。

关键词: 吉富罗非鱼; 幼鱼; 脂肪粉; 水产饲料; 生长性能; 生化指标; 肌肉品质

中图分类号: S 963

文献标志码: A

脂肪是包括鱼类在内的所有脊椎动物的能量和必需脂肪酸的重要来源, 也是脂溶性维生素和类胡萝卜素的载体, 在维持动物的正常生长、健康和繁殖等方面发挥重要作用^[1]。同时, 饲料中添加脂肪具有节约蛋白质和减少氮排放的作用^[2]。水产饲料中广泛使用的豆油、棕榈油和菜籽油等含有丰富的n-6和n-9多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA), 但n-3 PUFA含量低, 且缺乏长链多不饱和脂肪酸(long chain PUFA, LC-PUFA)。故单一植物油作为饲料脂肪源容易导致养殖鱼类脂肪蓄积于肝胰脏等组

织, 诱发脂肪肝病, 降低生长性能^[1,3-6]。因此, 在考虑水产配合饲料的脂肪源时, 应特别注意饲料的脂肪酸(fatty acid, FA)平衡问题。

在水产饲料的生产、运输和储存过程中, 油脂的不饱和脂肪酸容易受到氧气、光以及内源和外源因素的影响而氧化酸败^[7-8]。在传统的水产饲料生产中, 通常直接将液态油加入到饲料原料中, 通过与其他原料充分混合后, 借助饲料机制成颗粒饲料, 脂肪可能因为制备过程中的高温高压而导致营养损失^[9]。为了保证饲料产品的品质及解决营养损失问题, 研究者相

收稿日期: 2019-09-02 修回日期: 2019-09-26

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900400); 国家自然科学基金(31873040)

通信作者: 李远友, E-mail: yyli16@scau.edu.cn

继开发出了不同的饲料加工工艺,如真空喷涂技术。挤压干燥过后的颗粒饲料被送入真空喷涂混合室后,由于颗粒内外气压差,雾化后的液态油被均匀地喷洒到颗粒饲料的表面及内部^[10]。此外,也有将液态油通过包埋、吸附和纳米结晶技术转变为脂肪粉,以此减少脂质损失、氧化和酸败^[11-13]。与液态油相比,脂肪粉在运输、混合、包装、储存、使用等方面具有优越性能,已被广泛应用于家畜家禽饲料中,证明对动物的生长和脂肪代谢有着积极的作用^[14-17]。然而,关于脂肪粉在水产配合饲料中的应用研究目前少见报道。

罗非鱼是广盐性和杂食性鱼类,也是世界上养殖产量最高的鱼类之一。吉富罗非鱼(GIFT *Oreochromis niloticus*)是利用8个不同地域的尼罗罗非鱼,采用多种遗传学手段而选育出的新品系,其生长速率和耐盐性能优于纯种尼罗罗非鱼,具有环境适应性强、养殖周期短、生长速率快、遗传性状稳定、产量高、营养丰富等优点,是目前主要的罗非鱼养殖品种。其生长速率比其他品系罗非鱼快10%~30%,雄性率可达99%以上,养殖5个月其体质量可达600 g以上,出肉率高达41%^[18]。目前,生产罗非鱼配合饲料使用的脂肪源基本上是富含亚油酸的豆油,添加水平一般为5%~10%^[19-22],有关饲料脂肪酸组成对其生长性能影响的研究不多。为此,本研究以豆油[SO,亚油酸(LA):亚麻酸(ALA)=9:1]和一种由豆油、菜籽油等组成的复合油(BO, LA:ALA=5:1)作为脂肪源,分别以液态和粉末形式添加到饲料原料中制备4种颗粒配合饲料(SO1、BO1、SOp、BOp)。以它们养殖吉富罗非鱼幼鱼8周后,通过比较各饲料投喂组鱼生长性能、抗氧化指标、营养成分、肌肉品质及肝脏和全鱼脂肪酸组成,评估饲料脂肪酸组成(亚油酸和亚麻酸比)的影响及脂肪粉的应用效果。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

根据吉富罗非鱼幼鱼的营养需求情况,以菜粕和豆粕为蛋白源,以豆油(SO, LA:ALA=9:1)和一种由豆油、菜籽油等组成的复合油(BO, LA:ALA=5:1)为脂肪源,将脂肪源分别以液态和粉末形式添加到饲料原料中,制备4种等氮

(38%)、等脂(8%)配合饲料(SO1、SOp、BO1、BOp)。饲料配方及组成见表1,其脂肪酸组成见表2。豆油粉末和复合油粉末分别由相应的液态油在广州市优百特饲料科技有限公司通过吸附技术制备。即将抗氧化剂和乳化剂加入液态油中后,进行乳化均质、抗氧化工艺处理,然后通过高压泵将其雾化,使其均匀地喷洒到经高度膨化的玉米粉中进行混合吸附,从而形成均匀、稳定、流动性好、脂肪酸均衡、易于消化吸收的脂肪粉末,脂肪粉含有约40%玉米粉和60%油及少量乳化剂、抗氧化剂。将粉碎过筛后的原料干粉准确称重后,转移至混合机均匀混合20 min,然后转入混油机中加入液态油或脂肪粉继续混合15 min,结束后转入搅拌机加水(350 mL/kg,干物质)混匀20 min;然后将其制成直径约2.0 mm的“面条状”饲料,再转移至制粒机造粒制成颗粒饲料。颗粒料在空调环境(25 ℃)下阴干后装入密封袋中,于冰箱(-20 ℃)中保存待用。

1.2 实验设计

实验用吉富罗非鱼幼鱼购自广东省罗非鱼良种场。在广东省农业科学院动物科学研究所室内循环水养殖系统中驯养2周后,选用规格整齐、健康的幼鱼用于养殖实验。每种饲料设3个重复缸,每缸20尾鱼,初始平均体质量为(15.38±0.05)g。养殖实验为8周,每天饱食投喂2次(08:00和17:00)。采用室内日光灯作为光源,光周期为白天:黑夜=12:12。实验期间,每天早上使用虹吸管将缸底粪便吸出,然后各缸换水约三分之一;发现死鱼及时捞出,称重后记录重量,用于计算饲料系数。除吸底换水及投饵期外,其余时间持续充气增氧,水体溶解氧高于6.0 mg/L,水温(29.0±2.0) ℃,pH 7.0±0.4,氨氮浓度低于0.2 mg/L。

1.3 实验鱼称重、取样

养殖实验结束后,将鱼禁食24 h,从每缸随机取3尾鱼放入含有0.01% 2-phenoxyethanol麻醉剂的水中进行麻醉,然后用1 mL注射器从尾静脉采血,将血液注入1.5 mL离心管中;血液在4 ℃静置2~5 h后,于4 ℃、3 500 r/min离心10 min,将上层血清转入新的离心管后于液氮中速冻,然后保存于-80 ℃冰箱中用于后续分析。将采血后的鱼解剖,取肝脏、肌肉和前肠样品放入离心管中,在液氮中速冻后保存在-80 ℃冰箱

表 1 饲料配方和营养成分
Tab. 1 Feed formulation and nutrient component

项目 items	组别 groups			
	SOI	SOp	BOI	BOp
原料 ingredients				
菜粕 rape seed meal	24.00	24.00	24.00	24.00
豆粕 soybean meals	38.00	38.00	38.00	38.00
面粉 flour	26.18	26.18	26.18	26.18
玉米淀粉 corn starch	2.87		2.87	
豆油 soybean oil	4.30			
豆油粉末 soybean oil powder		7.17		
复合油 blend oil			4.30	
复合油粉末 blend oil powder				7.17
磷酸二氢钙 calcium dihydrogen phosphate	2.00	2.00	2.00	2.00
氯化胆碱 choline chloride	0.40	0.40	0.40	0.40
多维 vitamin premix ^a	0.75	0.75	0.75	0.75
多矿 mineral premix ^b	0.75	0.75	0.75	0.75
大豆磷脂油 soybean phospholipid	0.20	0.20	0.20	0.20
抗坏血酸棕榈酸酯 ascorbyl palmitate	0.20	0.20	0.20	0.20
蛋氨酸 methionine	0.35	0.35	0.35	0.35
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00
营养成分/% nutrient component				
水分 moisture	6.91	6.19	9.62	7.66
粗蛋白 crude protein	36.84	36.75	37.14	37.35
粗脂肪 crude lipid	7.70	7.90	7.52	7.46
粗灰分 crude ash	6.33	6.26	6.26	6.33

注: a. 多维(mg或IU/kg): 维生素A 2 000 IU, 维生素D₃ 700 IU, 维生素E 10 mg, 维生素K₃ 2.5 mg, 硫胺素2.5 mg, 核黄素5 mg; b. 多矿(mg或g/kg): 钙230 g, 钾36 g, 镁9 g, 铁10 g, 锌8 g, 锰1.9 g, 铜1.5 g, 钴250 mg, 碘32 mg, 硒50 mg
Notes: a. vitamin premix (mg or IU/kg): vitamin A 2 000 IU, vitamin D₃ 700 IU, vitamin E 10 mg, vitamin K₃ 2.5 mg, thiamin 2.5 mg, riboflavin 5 mg; b. mineral premix(mg or g/kg): Ca 230 g, K 36 g, Mg 9 g, Fe 10 g, Zn 8 g, Mn 1.9 g, Cu 1.5 g, Co 250 mg, I 32 mg, Se 50 mg

中备用。最后, 从每缸取2尾鱼用于测定肌肉质
构特性, 另取2尾鱼用于全鱼营养成分测定。所
有鱼用湿毛巾擦干后逐条称重, 记录重量。

1.4 分析测定方法

生长指标计算方法 增重率(weight gain
rate, WGR, %)= $(W_f - W_i) / W_i \times 100\%$

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

饲料系数(feed coefficient, FC)= $D_a / (W_f - W_i)$

存活率(survival rate, SR, %)= $A_f / A_i \times 100\%$

肥满度(condition factor, CF, g/cm^3)= $W_b / L_b^3 \times 100$

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

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

式中, W_i 和 W_f 分别为初始和终末的平均鱼体质量
(g), W_i 和 W_0 分别为初始和终末的鱼体总重(g),
 t 为终末养殖天数(d), D_a 为总摄入饲料量(g, 干
物质), A_i 和 A_f 分别为初始和终末的鱼体数量,

表2 实验饲料的脂肪酸组成
Tab. 2 Fatty acid composition of the experimental diets

脂肪酸 fatty acid	组别 groups			
	SOI	SOp	BOI	BOp
14:0	0.25	0.32	1.10	1.08
16:0	13.97	14.70	24.62	24.66
18:0	4.91	4.89	5.40	5.40
18:1	22.42	22.30	28.71	28.04
18:2n-6	45.62	43.47	27.03	25.64
18:3n-3	4.94	5.15	4.74	4.64
20:0	0.38	0.36	0.32	0.31
20:2n-6	—	0.19	0.27	0.24
22:0	0.45	0.46	0.29	0.27
SFA	19.95	20.73	31.73	31.72
MUFA	22.42	22.30	28.71	28.04
n-3 PUFA	4.94	5.15	4.74	4.64
n-6 PUFA	45.69	44.02	27.38	25.94

注: —未检出

Notes: —not detected

W_b 代表鱼体质量(g), W_l 和 W_v 分别代表肝脏和内脏重量(g), L_b 代表鱼体长(cm)。

生化指标测定 血清总胆固醇(T-CHO)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白(HDL-C)、低密度脂蛋白(LDL-C)、总抗氧化能力(T-AOC)、过氧化氢酶(CAT)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)和丙二醛(MDA)含量均采用南京建成生物技术研究所的试剂盒进行测定。

常规成分及脂肪酸组成分析 依照国标方法测定饲料和组织的常规营养成分。水分用常压干燥法测定, 依照GT/T6435-2014; 灰分用马弗炉灼烧法测定, 依GB/T6438-2007; 粗蛋白用凯氏定氮法测定, 依照GB/T 6433-2006; 粗脂肪用索氏抽提法测定, 依照GB/T6433-2006; 脂肪酸组成使用气相色谱仪(Agilent 7890B GC), 依照GB/T173772008气相色谱法测定^[23]。

肌肉质构特性和可食用品质测定 质构特性采用上海腾拔仪器科技有限公司生产的质构仪(Universal TA)进行测定。将测定的实验鱼背肌取下, 在TPA模式下, 使用TA 25/1000圆柱形探头, 测试前速度2.00 mm/s、测试速度1.00 mm/s、测试后速度2.00 mm/s、压缩比75%、探头

2次压缩间隔2 s, 测定指标包括剪切力、硬度、弹性、咀嚼性、胶着性和回复性。

肌肉pH值采用pH计测定, 每条实验鱼的两侧肌肉不同部位分别测定3次, 取其平均值。

肌肉熟肉率(cooking percentage, CP, %): 取背肌5 g左右(W_1)置于煮沸的水中, 5 min后取出, 用滤纸吸干表面水分, 冷却后称重(W_2)。计算公式: $CP=W_2/W_1 \times 100\%$

肌肉持水率(water holding capacity, WHC, %): 取背肌5 g左右(W_1)放在定性滤纸上, 再在上面覆盖一张滤纸, 用1 kg砝码挤压5 min后称取肌肉的质量(W_2)。计算公式: $WHC=(W_2-W_1)/W_1 \times 100\%$

1.5 数据处理

实验数据用SPSS 21.0软件进行分析, 采用ANOVA进行方差分析, 若组间差异显著, 则用Duncan氏比较, 结果以平均值±标准误(mean±SE)表示, 差异显著性均以 $P<0.05$ 为准。所有表格采用Excel 2016制作。

2 结果

2.1 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼生长性能比较

利用4种饲料投喂吉富罗非鱼幼鱼8周后, 其生长性能指标见表3。结果显示, 各饲料投喂组鱼的增重率、特定生长率、饲料系数、肝体比、脏体比均无显著性差异($P>0.05$)。说明与液态油饲料相比, 脂肪粉作为配合饲料脂肪源对吉富罗非鱼幼鱼生长没有负面影响。

2.2 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼血清生化指标、血清及肝脏抗氧化酶活性比较

血清的总胆固醇、高密度脂蛋白及丙二醛水平, 总抗氧化能力, 总超氧化物歧化酶活性等在4个组间无显著差异($P>0.05$); 但SOp、BOp、BOI组的甘油三酯和低密度脂蛋白水平显著低于SOI组, BOp组的过氧化氢酶活性显著高于其他3组($P<0.05$)(表4)。肝脏的丙二醛水平在4组间无显著差异($P>0.05$); 但SOp、BOp、BOI组的总抗氧化能力显著高于SOI组, SOp组的过氧化氢酶和总超氧化物歧化酶活性显著高于其他3组($P<0.05$)(表5)。

表 3 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼生长性能比较

Tab. 3 Comparison of growth performance of juvenile GIFT *O. niloticus* fed with different experimental diets

生长指标 growth index	组别 groups			
	SOI	SOp	BOI	BOP
初始体质量/g initial body weight	15.45±0.12	15.31±0.06	15.30±0.12	15.46±0.10
终末体质量/g final body weight	131.01±4.53 ^{ab}	140.88±4.07 ^b	127.83±2.92 ^a	132.24±4.23 ^{ab}
增重率/% WGR	751.68±33.81	815.93±76.71	736.02±22.4	755.97±11.62
特定生长率/(%/d) SGR	3.69±0.07	3.81±0.14	3.66±0.05	3.7±0.02
存活率/% SR	100	98.25	100	98.25
饲料系数 FC	1.08±0.05	1.05±0.09	1.04±0.03	1.00±0.03
肝体比/% HSI	1.51±0.12	1.42±0.06	1.55±0.06	1.54±0.11
脏体比/% VSI	7.65±0.27	8.37±0.41	8.68±0.45	7.83±0.26
肥满度/(g/cm ³) CF	3.73±0.12 ^b	3.43±0.06 ^a	3.40±0.07 ^a	3.53±0.11 ^{ab}

注: 同一行中不同小写字母表示相互间有显著差异($P < 0.05$), 下同Notes: in the same row, values without sharing a common superscript letter means significant differences ($P < 0.05$), the same below

表 4 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼血清生化指标比较

Tab. 4 Comparison of serum biochemical parameters of juvenile GIFT *O. niloticus* fed with different experimental diets

血清生化指标 serum biochemical parameters	组别 groups				mmol/L
	SOI	SOp	BOI	BOP	
总胆固醇 T-CHO	5.65±0.23	6.3±0.59	5.49±0.32	6.01±0.39	
甘油三酯 TG	0.75±0.09 ^b	0.55±0.05 ^a	0.54±0.07 ^a	0.47±0.07 ^a	
高密度脂蛋白 HDL-C	0.6±0.06	0.52±0.05	0.52±0.11	0.42±0.02	
低密度脂蛋白 LDL-C	1.3±0.12 ^b	0.84±0.15 ^a	0.66±0.06 ^a	0.58±0.17 ^a	

表 5 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼血清及肝脏抗氧化酶活性比较

Tab. 5 Comparison of serum and liver antioxidant enzyme activity of juvenile GIFT *O. niloticus* fed with different experimental diets

抗氧化酶活性 antioxidant enzyme activity	组别 groups			
	SOI	SOp	BOI	BOP
血清 serum				
总抗氧化能力/(U/mL) T-AOC	7.13±0.8	5.16±0.28	6.22±0.77	5.10±0.55
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	13.78±3.46 ^a	12.92±2.28 ^a	14.83±2.23 ^a	24.03±4.23 ^b
总超氧化物歧化酶/(U/mL) T-SOD	176.8±13.27	143.18±16.78	162.02±7.71	148.98±13.19
丙二醛/(U/mL) MDA	3.55±0.50	3.66±0.36	4.00±0.48	4.61±0.62
肝脏 liver				
总抗氧化能力/(U/mg prot) T-AOC	5.17±1.87 ^a	23.82±6.29 ^b	17.19±3.02 ^b	12.84±3.81 ^b
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	35.41±1.86 ^a	42.60±1.63 ^b	35.65±2.2 ^a	33.58±2.48 ^a
总超氧化物歧化酶/(U/mg prot) T-SOD	160.20±6.77 ^b	218.85±11.73 ^c	126.75±7.87 ^a	134.53±9.17 ^{ab}
丙二醛/(U/mg prot) MDA	4.86±0.50	5.72±0.98	6.14±0.66	7.35±1.37

2.3 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼基本生化成分比较

各组全鱼的粗灰分含量无显著性差异($P>0.05$), 但SOp、BOp、BOI组全鱼的水分含量显著低于SOI组, 粗蛋白含量显著高于SOI组, BOp组全鱼的粗脂肪含量显著低于BOI组 ($P<0.05$) (表6)。

2.4 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼肌肉品质相关指标比较

肌肉的弹性、咀嚼性、胶着性、回复性、持水率在各组间无显著性差异($P>0.05$); 但SOp、BOp、BOI组的剪切力显著高于SOI组, BOp组的硬度显著高于其他3组($P<0.05$) (表7)。

表 6 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼营养成分的比较(%干物质)

Tab. 6 Comparison of proximate composition of juvenile GIFT *O. niloticus* fed with different experimental diets(% dry matter)

营养成分 proximate composition	组别 groups			
	SOI	SOp	BOI	BOp
全鱼 whole body				
水分 moisture	81.11±0.93 ^b	76.9±0.64 ^a	78.36±0.44 ^a	78.20±0.77 ^a
粗蛋白 crude protein	57.99±0.68 ^a	61.88±0.38 ^b	64.43±0.54 ^c	64.13±1.23 ^{bc}
粗脂肪 crude lipid	23.46±1.22 ^{ab}	20.92±0.40 ^{ab}	25.24±1.73 ^b	20.38±2.05 ^a
粗灰分 crude ash	11.32±0.20	12.17±0.53	12.33±0.51	13.14±1.16
肌肉 muscle				
水分 moisture	83.18±0.35	82.32±0.36	83.25±0.28	83.30±0.30
粗蛋白 crude protein	86.65±3.68	89.68±0.30	89.62±0.53	89.66±0.46
粗脂肪 crude lipid	4.13±0.62	6.65±0.34	6.40±1.18	6.83±1.09
粗灰分 crude ash	6.51±0.71 ^b	5.12±0.20 ^a	4.77±0.25 ^a	5.87±0.10 ^{ab}

表 7 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼肌肉品质相关指标比较

Tab. 7 Comparison of textural properties and edible quality of juvenile GIFT *O. niloticus* fed with different experimental diets

肌肉品质 muscle quality	组别 groups			
	SOI	SOp	BOI	BOp
质构特性 textural properties				
剪切力/(gf) tenderness	1560±161.35 ^a	2154±109.67 ^{bc}	2631.11±92.06 ^c	2255.78±155.02 ^b
硬度/(gf) hardness	169.11±18.26 ^a	188.22±21.92 ^a	160.67±24.76 ^a	255.11±18.84 ^b
弹性/(mm) springiness	0.77±0.01	0.75±0.02	0.77±0.02	0.75±0.01
咀嚼性/(mJ) chewiness	96.37±10.23	110.35±14.11	96.48±14.95	128.41±11.13
胶着性/(mJ) gumminess	124.51±13.09	144.99±15.47	124.97±18.23	169.95±12.99
回复性 resilience	0.42±0.02	0.35±0.04	0.41±0.03	0.39±0.02
可食用品质 edible quality				
熟肉率/% CP	83.4±4.17	78.94±1.98	82.27±4.2	77.24±2.21
持水率/% WHC	8.6±0.32	8.21±1.28	7.2±0.66	6.09±0.74
pH	6.45±0.03 ^a	6.47±0.07 ^{ab}	6.46±0.03 ^{ab}	6.59±0.04 ^b

注: gf.克力, 指1 g质量物质所受到重力的大小

Notes: gf. the force of gravity on 1 g of mass

2.5 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼肌肉及肝脏脂肪酸组成

吉富罗非鱼幼鱼肝脏和肌肉脂肪酸组成相似, 反映了饲料的脂肪酸组成; 在肝脏脂肪酸组成中, SOp和BOp组的SFA、MUFA均显著低于SOI和BOI组($P<0.05$), 而n-3 PUFA则相反。总体上, SOI组的n-6 PUFA显著高于BOI ($P<0.05$); 在肌肉脂肪酸组成中, BOI组的SFA、MUFA显著高于SOI组, 而BOI组n-6 PUFA则显著低于SOI组($P<0.05$)(表8, 表9)。

3 讨论

在畜禽的研究报道中, 与传统的液体油相比, 脂肪粉饲料可显著提高育肥期湖羊的增重率^[16], 改善苗猪的生长和饲料消化率^[24-26]; 与未包埋的液体乳酸相比, 粉状乳酸可显著改善肉鸡的生长^[27]。然而, 本实验中, 脂肪粉与液态油

饲料投喂组吉富罗非鱼的生长性能无显著差异。尽管如此, 研究结果说明, 脂肪粉作为配合饲料脂肪源对吉富罗非鱼生长没有负面影响, 可作为配合饲料脂肪源进行应用。

本研究中, 从吉富罗非鱼幼鱼血清甘油三酯和低密度脂蛋白水平、抗氧化酶活性及肝脏T-SOD、CAT活性分析, 脂肪粉投喂组鱼均优于液态油组, 说明脂肪粉饲料有利于提高吉富罗非鱼的健康水平和抗氧化能力。脂肪粉的良好效果, 可能与其制备生产工艺及乳化剂和抗氧化剂添加及均质化有关, 有效降低脂肪的氧化、提高消化吸收; 采用先进的喷涂技术, 使雾化油滴分子能充分吸附到膨化玉米载体上, 以确保脂肪酸性能稳定^[28]。在养殖生产中, 为了提高养殖鱼类的抗氧化能力和健康, 一般在水产饲料中添加一些抗氧化剂, 如维生素E、槲皮素和姜黄素, 有利于降低血清中MDA浓度, 增加鱼体组织的抗氧化能力(SOD和CAT活性)^[29-30]。

表 8 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼肝脏脂肪酸组成比较
Tab. 8 Comparison of fatty acids composition in liver of juvenile GIFT *O. niloticus* fed with different experimental diets

脂肪酸 fatty acids	组别 groups				%
	SOI	SOp	BOI	BOp	
14:0	3.52±0.53 ^{ab}	2.42±0.27 ^a	4.54±0.25 ^b	3.34±0.51 ^{ab}	
16:0	20.96±0.09 ^{ab}	19.33±1.02 ^a	26.01±0.74 ^c	22.73±0.77 ^b	
18:0	12.21±0.34 ^{ab}	11.06±0.58 ^a	13.27±0.43 ^b	11.45±0.35 ^a	
18:1	27.14±0.76 ^b	23.64±0.79 ^a	27.17±1.11 ^b	26.12±0.86 ^{ab}	
18:2n-6	12.74±0.6 ^b	11.64±0.49 ^b	7.48±0.41 ^a	7.21±0.53 ^a	
18:3n-3	1.83±0.05	1.66±0.07	1.57±0.09	1.56±0.11	
20:0	0.29±0 ^b	0.25±0.02 ^a	0.25±0.01 ^a	0.24±0.01 ^a	
20:2n-6	1.22±0.05 ^b	1.13±0.02 ^b	0.76±0.03 ^a	0.76±0.08 ^a	
20:3n-6	1.19±0.14	1.34±0.15	1.15±0.11	1.00±0.09	
20:4n-6 (ARA)	5.82±1.06 ^b	5.58±0.56 ^b	2.61±0.32 ^a	3.44±0.19 ^a	
20:5n-3 (EPA)	0.06±0	0.06±0.01	0.06±0	0.06±0.02	
22:0	0.27±0.02 ^b	0.28±0.01 ^b	0.17±0.01 ^a	0.20±0.01 ^a	
22:6n-3 (DHA)	2.07±0.48 ^a	4.05±0.35 ^b	1.77±0.09 ^a	2.89±0.37 ^a	
SFA	37.25±0.9 ^b	33.34±0.65 ^a	44.25±1.39 ^c	37.97±0.84 ^b	
MUFA	27.14±0.76 ^b	23.64±0.79 ^a	27.17±1.11 ^b	26.12±0.86 ^{ab}	
n-3 PUFA	3.96±0.44 ^a	5.76±0.39 ^b	3.40±0.13 ^a	4.51±0.33 ^a	
n-6 PUFA	20.97±1.5 ^b	19.70±0.32 ^b	12.00±0.52 ^a	12.41±0.44 ^a	

表 9 不同饲料投喂组吉富罗非鱼幼鱼肌肉脂肪酸组成比较
 Tab. 9 Comparison of fatty acids composition in muscle of juvenile GIFT *O. niloticus* fed with different experimental diets

脂肪酸 fatty acids	组别 groups				%
	SOI	SOp	BOI	BOp	
14:0	1.41±0.12 ^{ab}	1.36±0.04 ^{ab}	1.57±0.12 ^b	1.21±0.10 ^a	
16:0	18.17±0.21 ^a	18.38±0.18 ^a	21.01±0.63 ^b	22.29±0.30 ^c	
18:0	6.77±0.12 ^b	6.63±0.12 ^b	5.92±0.22 ^a	7.92±0.32 ^c	
18:1	19.25±0.37 ^a	20.17±0.49 ^{ab}	22.46±0.79 ^c	21.85±0.71 ^{bc}	
18:2n-6	24.72±0.27 ^b	25.05±1.11 ^b	16.61±0.55 ^a	15.90±0.14 ^a	
18:3n-3	2.84±0.05	2.85±0.13	2.67±0.11	2.61±0.07	
20:0	0.26±0.01	0.25±0	0.24±0.01	0.25±0.01	
20:2n-6	1.64±0.03 ^b	1.58±0.08 ^b	1.08±0.05 ^a	1.14±0.03 ^a	
20:3n-6	1.51±0.05 ^b	1.43±0.04 ^b	1.21±0.04 ^a	1.59±0.08 ^b	
20:4n-6 (ARA)	3.39±0.15 ^b	2.78±0.14 ^a	2.37±0.09 ^a	3.96±0.23 ^c	
20:5n-3 (EPA)	0.11±0.01 ^b	0.07±0.01 ^a	0.09±0.01 ^{ab}	0.10±0 ^b	
22:0	0.32±0.01 ^c	0.29±0.01 ^c	0.23±0.01 ^a	0.26±0.01 ^b	
22:6n-3 (DHA)	2.46±0.13 ^b	1.87±0.08 ^a	1.79±0.08 ^a	2.52±0.16 ^b	
SFA	26.93±0.26 ^a	26.91±0.24 ^a	28.79±0.85 ^b	31.93±0.41 ^c	
MUFA	19.25±0.37 ^a	20.17±0.49 ^{ab}	22.65±0.68 ^c	21.85±0.71 ^{bc}	
n-3 PUFA	5.40±0.11 ^b	4.78±0.11 ^a	4.55±0.19 ^a	5.23±0.10 ^b	
n-6 PUFA	31.27±0.38 ^b	30.83±1.16 ^b	21.27±0.70 ^a	22.59±0.26 ^a	

水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分是鱼肉的基本组成成分，其含量的高低直接影响鱼肉的品质^[31]。本养殖实验中，脂肪粉组的全鱼水分和粗脂肪含量低于相应的液态油组，蛋白含量则相反，这符合一般规律^[32]；也说明脂肪粉饲料有助于提高罗非鱼肌肉营养价值。研究表明，蛋白含量高、脂肪含量低的鱼类，其肉质和营养价值都较高^[33]；改变饲料配方，如改变饲料的脂肪酸组成、蛋白质和脂肪的比例、添加饲料添加剂等是一种常用的鱼类肉质改良方法^[34]。硬度是衡量鱼肉品质的重要指标之一^[33]，在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[35]、舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[36]中都表明，硬度与鱼肉品质相关，硬度的提高可一定程度上改善鱼的肌肉品质。BOp组鱼的肌肉硬度显著高于BOI组，说明脂肪粉饲料可以改善吉富罗非鱼幼鱼的肌肉品质。

鱼类组织的脂肪酸组成通常在一定程度上反映饲料的脂肪酸组成^[37-39]。在本研究中，SOI

组肌肉和肝脏中的n-6 PUFA高于BOI组，与SOI饲料中亚油酸含量是BOI饲料的1.8倍有关，也说明n-6 PUFA是吉富罗非鱼主要的必需脂肪酸。在奥尼罗非鱼(*O. niloticus* ♂ × *O. aureus* ♀)中，亚油酸可基本满足其必需脂肪酸需求^[40]。有研究表明，当饲料中同时提供n-3 PUFA时，罗非鱼对n-6 PUFA的需求降低^[41]。脂肪粉饲喂的吉富罗非鱼肝脏和肌肉的脂肪酸组成与液态油无显著性差异，说明脂肪粉饲料对吉富罗非鱼营养价值没有负面影响，可作为其配合饲料的脂肪源。

在水产饲料的生产和应用中，与液态油相比，脂肪粉具有明显的优势。如脂肪源在配合饲料的制备和储存过程中可受到一定保护免受氧化；可减少配合饲料在投喂过程中油脂渗入水中，增加鱼类对油脂的消化吸收。此外，脂肪粉还具有运输、混合、包装、储存和使用方便等优点，故其已广泛用于畜禽饲料中^[24-27]。在水产养殖中，虽然微胶囊技术已被用于生产幼

鱼的饵料^[14-15,42], 但目前未见脂肪粉在幼鱼及商品鱼养殖生产中的应用报道, 也未见脂肪粉和液体油在水产养殖中的效果比较研究。从脂肪粉的优点及其在畜禽饲料中的广泛应用和本研究结果来看, 它值得在其他水产动物中开展养殖实验和推广应用。

4 结论

本研究利用豆油和一种由豆油和菜籽油等组成的复合油为脂肪源, 分别以液态和粉末形式添加制作配合饲料, 开展的养殖实验结果表明, 相较于液态油饲料, 脂肪粉饲料养殖的吉富罗非鱼幼鱼的生长不受影响, 而健康及肌肉品质指标得到改善, 值得在水产饲料及养殖生产中进行推广应用。

叶儒镡和郑钧为并列第一作者。

感谢华南农大2019届本科生麦翰林和杜日臻在本研究的养殖试验和部分测定工作中所提供的帮助。

参考文献:

- [1] Turchini G M, Ng W K, Tocher D R. Fish oil replacement and alternative lipid sources in aquaculture feeds[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [2] 王道尊, 龚希章, 刘玉芳. 饲料中脂肪的含量对青鱼鱼种生长的影响[J]. 水产学报, 1987, 11(1): 23-28.
Wang D Z, Gong X Z, Liu Y F. The effects fat content in feeds on the growth of black carp fingerlings[J]. Journal of Fisheries of China, 1987, 11(1): 23-28(in Chinese).
- [3] You C H, Chen B J, Wang M, *et al.* Effects of dietary lipid sources on the intestinal microbiome and health of golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2019, 89: 187-197.
- [4] Santigosa E, García-Meilán I, Valentín J M, *et al.* Plant oils' inclusion in high fish meal - substituted diets: effect on digestion and nutrient absorption in gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.)[J]. Aquaculture Research, 2011, 42(7): 962-974.
- [5] 王爱民, 杨文平, 於叶兵, 等. 不同脂肪含量饲料对吉富罗非鱼鱼种生长性能、脂蛋白脂酶活性及其基因表达的影响[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(2): 96-102.
Wang A M, Yang W P, Yu Y B, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth performance, activity and gene expression of lipoprotein lipase in GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) juvenile[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(2): 96-102(in Chinese).
- [6] 宋青春, 齐遵利. 水产动物营养与配合饲料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010.
Song Q C, Qi Z L. Aquatic animal nutrition and formulated feed science[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2010 (in Chinese).
- [7] Hsieh R J, Kinsella J E. Oxidation of polyunsaturated fatty acids: mechanisms, products, and inhibition with emphasis on fish[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 1989, 33: 233-341.
- [8] Watanabe T. Strategies for further development of aquatic feeds[J]. Fisheries Science, 2002, 68(2): 242-252.
- [9] 刘凡, 李艳芳. 挤压膨化技术在水产饲料生产中的应用[J]. 广东饲料, 2016, 25(11): 37-39.
Liu F, Li Y F. Application of extrusion technology in aquatic feed production[J]. Guangdong Feed, 2016, 25(11): 37-39(in Chinese).
- [10] 王春华. 硬颗粒饲料真空喷涂工艺研究[J]. 广东饲料, 2018, 27(6): 39-40.
Wang C H. Study on vacuum spraying process of hard particle feed[J]. Guangdong Feed, 2018, 27(6): 39-40(in Chinese).
- [11] Oliveira M A, Alves S P, Santos-Silva J, *et al.* Effects of clays used as oil adsorbents in lamb diets on fatty acid composition of abomasal digesta and meat[J]. Animal Feed Science and Technology, 2016, 213: 64-73.
- [12] Haider J, Majeed H, Williams P A, *et al.* Formation of chitosan nanoparticles to encapsulate krill oil (*Euphausia superba*) for application as a dietary supplement[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 27-34.
- [13] Bakry A M, Abbas S, Ali B, *et al.* Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(1): 143-182.
- [14] Ortiz-Monís M A, Mancera J M, Yúfera M. Determining gut transit rates in gilthead seabream larvae fed microdiets[J]. Aquaculture, 2018, 495: 523-527.
- [15] Stuart K, Hawkyard M, Barrows F, *et al.* Evaluation of dietary taurine concentrations in microparticulate diets

- provided to larval California yellowtail (*Seriola dorsalis*) postlarvae[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, 24(4): 3-13.
- [16] 刘融, 陶慧, 张乃锋, 等. 饲料中棕榈油脂肪粉添加水平对育肥期湖羊生长性能和营养物质消化代谢的影响[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(12): 5013-5022.
- Liu R, Tao H, Zhang N F, *et al.* Effects of palm oil powder supplemental level on growth performance and nutrient digestion and metabolism of finishing Hu sheep[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(12): 5013-5022(in Chinese).
- [17] 郑荷花, 李伟, 张莉莉, 等. 脂肪粉对断奶仔猪生产性能、养分利用率和血清生化指标的影响[J]. *畜牧与兽医*, 2013, 45(6): 14-18.
- Zheng H H, Li W, Zhang L L, *et al.* Effects of fat powders on growth performance, nutrients digestibility and serum biochemical parameters in weaned piglets[J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2013, 45(6): 14-18(in Chinese).
- [18] 李家乐, 李思发. 中国大陆尼罗罗非鱼引进及其研究进展[J]. *水产学报*, 2001, 25(1): 90-95.
- Li J L, Li S F. Introduction and research advances of *Oreochromis niloticus* in China Mainland[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2001, 25(1): 90-95(in Chinese).
- [19] 周梦馨. 三种温度条件下吉富罗非鱼对饲料的脂肪需要量及脂肪代谢研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- Zhou M X. Effects of three different temperatures on lipid requirement and metabolism of GIFT, *Oreochromis niloticus*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [20] 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.
- 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(in Chinese).
- [21] 王爱民. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生长及脂肪代谢调节的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- Wang A M. Effects of dietary lipid levels on growth and fat metabolism of GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese).
- [22] Ma F, Li X Q, Li B A, *et al.* Effects of extruded and pelleted diets with differing lipid levels on growth, nutrient retention and serum biochemical indices of tilapia (*Oreochromis Aureus*×*Tilapia Nilotica*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22(1): 61-71.
- [23] 陈清华. 兴凯湖四种鲌消化酶活力和肌肉营养成分的季节变化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- Chen Q H. The seasonal change study on digestive enzyme activity and nutritional component of four Culters in Xingkai Lake[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011 (in Chinese).
- [24] Xing J J, Van Heugten E, Li D F, *et al.* Effects of emulsification, fat encapsulation, and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility[J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(9): 2601-2609.
- [25] Yang F, Zhang S H, Kim S W, *et al.* Fat encapsulation enhances dietary nutrients utilization and growth performance of nursery pigs[J]. *Journal of Animal Science*, 2018, 96(8): 3337-3347.
- [26] Sá R, Gandarillas M, Schinckel A P, *et al.* Utilisation of a mix of powdered oils as fat supplement in nursery- and growing-pig diets[J]. *Animal Production Science*, 2018, 58(11): 2061-2070.
- [27] Natsir M H, Sjöfjan O, Umam K, *et al.* Effects of liquid and encapsulated lactic acid in broiler diets on performances, intestinal characteristics and intestinal microflora[J]. *The Journal of Poultry Science*, 2010, 47(3): 240-243.
- [28] Shivakumar K M, Chetana R, Reddy S Y. Preparation and properties of encapsulated fat powders containing speciality fat and ω /Pufa-rich oils[J]. *International Journal of Food Properties*, 2012, 15(2): 412-425.
- [29] Mahmoud H K, Al-Sagheer A A, Reda F M, *et al.* Dietary curcumin supplement influence on growth, immunity, antioxidant status, and resistance to *Aeromonas hydrophila* in *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture*, 2017, 475: 16-23.
- [30] Wang L G, Ma B H, Chen D X, *et al.* Effect of dietary level of vitamin E on growth performance, antioxidant ability, and resistance to *Vibrio alginolyticus* challenge in yellow drum *Nibeal albiflora*[J]. *Aquaculture*, 2019, 507: 119-125.
- [31] 陈伟兴, 刘清振, 范兆廷. 鱼类肉质评价及影响因素研究进展[J]. *肉类研究*, 2012, 26(10): 34-40.
- Chen W X, Liu Q Z, Fan Z T. Recent advances in research on meat quality evaluation and influencing factor of fish[J]. *Meat Research*, 2012, 26(10): 34-40(in

- Chinese).
- [32] 张晓燕. 水产动物肌肉组织中水分含量的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(19): 6265-6268, 6294.
Zhang X Y. Research progress of muscle tissue moisture in aquaculture animal[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(19): 6265-6268, 6294(in Chinese).
- [33] 刘丽, 余红心, 肖维, 等. 鱼肉品质的研究进展[J]. *内陆水产*, 2008, 33(8): 9-12.
Liu L, Yu H X, Xiao W, *et al.* Research progress on fish quality[J]. *Inland Fisheries*, 2008, 33(8): 9-12(in Chinese).
- [34] 郭振. 改变水体盐度对吉富罗非鱼肉质的影响[D]. 天津: 天津农学院, 2014.
Guo Z. The effect of salinity change on the quality of Gift muscle[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2014 (in Chinese).
- [35] 朱志伟, 李汴生, 阮征, 等. 脆肉鲩鱼肉与普通鲩鱼鱼肉理化特性比较研究[J]. *现代食品科技*, 2008, 24(2): 109-112, 119.
Zhu Z W, Li B S, Ruan Z, *et al.* Differences in the physicochemical characteristics between the muscles of *Ctenopharyngodon idellus* C. et V and *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2008, 24(2): 109-112, 119(in Chinese).
- [36] Periago M J, Ayala M D, López-Albors O, *et al.* Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L[J]. *Aquaculture*, 2005, 249(1-4): 175-188.
- [37] 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.
- [38] Turchini G M, Torstensen B E, Ng W K. Fish oil replacement in finfish nutrition[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2009, 1(1): 10-57.
- [39] 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.
- [40] Jobling M. National Research Council (NRC): nutrient requirements of fish and shrimp[J]. *Aquaculture International*, 2012, 20(3): 601-602.
- [41] 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.
- [42] Bustos R, Romo L, Yáñez K, *et al.* Oxidative stability of carotenoid pigments and polyunsaturated fatty acids in microparticulate diets containing krill oil for nutrition of marine fish larvae[J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 56(2-3): 289-293.

Effects of liquid and powdered fat on growth, health and muscle quality of juvenile GIFT *Oreochromis niloticus*

YE Rukai¹, ZHENG Jun¹, LI Mengmeng¹, CHEN Hanyi¹, MA Yongcai¹, XIE Dizhi¹,
NING Lijun¹, SUN Lihua², WANG Yong², LI Yuanyou^{1*}

(1. College of Marine Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Guangzhou UBT Feed Technology Co., Ltd., Guangzhou 511300, China)

Abstract: In the current production of aquafeeds, oils are usually added directly or by vacuum coating. However, few reports were seen about the application of fat powders in aquaculture. In this study, with soybean oil (SO, linoleic acid : linolenic acid = 9 : 1) and blend oil consisting of soybean oil and rapeseed oil (BO, linoleic acid : linolenic acid = 5 : 1) as dietary lipids, four formulated feeds (SOI, BOI, SOp and BOp) were prepared by adding SO or BO in liquid or powder forms. After the tilapia juveniles (GIFT *Oreochromis niloticus*) with an initial average weight of 15.38 g were fed with the diets in indoor aquarium for 8 weeks, the growth indexes including weight gain rate, specific growth rate, feed coefficient, hepatobody ratio and viscera ratio showed no significant difference among the four groups. However, compared with the corresponding indexes in fish fed SOI, the liver catalase and superoxide dismutase activity were significantly increased, while the muscle crude ash content was significantly decreased in fish fed SOp; the serum levels of triglyceride and low density lipoprotein, as well as the whole fish water content were significantly reduced, while the liver total antioxidant capacity, whole fish protein content and muscle shear force values were significantly increased in the SOp, BOI, BOp groups. In addition, the serum catalase activity and muscle hardness of BOp group were significantly higher than those of SOI, BOI and SOp groups. The fatty acid composition of liver and muscle showed little difference among the groups, reflecting the fatty acid profile of feed. The results indicated that compared with liquid oil, fat powder had no adverse effect on the growth of tilapia and could improve the health and muscle quality of fish. The effect of blend oil is better than that of soybean oil. Combined with the advantages of packaging, transportation, storage and usage, fat powder is worth promoting and applying in aquaculture production.

Key words: GIFT *Oreochromis niloticus*; juveniles; fat powder; aquafeed; growth performance; biochemical index; muscle quality

Corresponding author: LI Yuanyou. E-mail: yyli16@scau.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2018YFD0900400); National Natural Science Foundation of China (31873040)