

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2012.00436

尼罗罗非鱼幼鱼饲料的适宜脂肪需要量

涂玮¹, 田娟², 文华², 蒋明², 吴凡², 刘伟², 张明明¹, 孙立威¹

1. 华中农业大学 水产学院, 湖北 武汉 430070;

2. 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 湖北 武汉 430223

摘要: 选用初始体质量为 (46.14 ± 4.67) g 的尼罗罗非鱼(*Oreochromis nilotica*)360 尾, 随机分成 6 组(每组 4 重复, 每重复 15 尾), 分别饲喂添加鱼油水平为 0%(对照组)、3%、6%、9%、12%和 15%的纯化饲料(实测脂肪水平为 0.20%、2.70%、6.11%、8.04%、11.13%和 14.85%)。饲养 8 周后, 以尼罗罗非鱼幼鱼的生长、体组成、血清生化及脂肪代谢酶活性等指标为判断依据, 确定其饲料的脂肪需要量。结果表明, 随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼的增重率、特定生长率以及蛋白质效率均呈现先上升后下降的趋势, 饲料系数呈现先下降后上升的趋势。饲料脂肪水平的升高使尼罗罗非鱼肝体比及全鱼和肌肉的脂肪含量显著增加($P < 0.05$)。随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼血清总胆固醇和甘油三酯含量呈先上升后下降的趋势, 各实验组显著高于对照组($P < 0.05$); 血清高密度脂蛋白含量呈先上升后稳定的趋势; 血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性均在饲料脂肪水平为 6.11%时最小, 在 14.85%时达到最大。随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼脂蛋白酯酶、肝脂酶和肠道脂肪酶活性均呈先升高后下降的趋势, 脂肪酸合成酶活性显著下降($P < 0.05$)。对增重率、蛋白质效率、饲料系数和血清高密度脂蛋白胆固醇进行回归分析得出, 尼罗罗非鱼幼鱼饲料最适脂肪水平分别为 8.86%、9.75%、9.40%和 8.30%, 因此确定尼罗罗非鱼幼鱼饲料适宜的脂肪需要量为 8.30%~9.75%。

关键词: 尼罗罗非鱼; 脂肪需求量; 脂肪沉积; 血清生化指标; 脂肪代谢酶; 活性

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2012)03-0436-09

脂肪是鱼类必需脂肪酸的来源, 是鱼体各种组织器官修复和生长的必需原料, 为鱼类生长发育提供能量, 同时也是许多中间代谢反应的必需物质和脂溶性维生素的载体。研究表明, 在饲料中添加适量的脂肪, 可提高鱼类增重率和饲料转化效率, 改善饲料适口性, 降低饲料和代谢产物对水环境的污染^[1-2]。饲料中脂肪不足或必需脂肪酸添加不足将导致过多的蛋白质被消耗用于鱼体能量需要, 且不能满足动物对脂肪酸的需要, 从而影响水产动物的正常生长、发育和繁殖, 甚至导致脂溶性维生素和必需脂肪酸缺乏症^[3]; 而添加过多则会导致鱼体代谢紊乱, 脂肪沉积过多,

抗病力下降, 抑制鱼类生长, 同时导致饲料易氧化变质, 不利于饲料的贮藏与加工^[4-6]。

尼罗罗非鱼(*Oreochromis nilotica*)是联合国推荐的优质水产养殖品种, 也是中国主要的出口水产品品种。目前国内外已报道了奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus* ♀ × *Oreochromis aureus* ♂)幼鱼^[5][体质量为 (1.34 ± 0.20) g]和吉富罗非鱼(GIFT)幼鱼^[7][体质量为 (2.63 ± 0.16) g]饲料适宜的脂肪需要量分别为 12%和 7.67%~9.34%, 而有关更大规格罗非鱼饲料脂肪适宜需求量的研究很少, 仅见庞思成^[8]从鱼体生长性能指标得出尼罗罗非鱼(128~160 g)适宜的脂肪需要量为 10%左右。为

收稿日期: 2011-10-25; 修订日期: 2011-12-05.

基金项目: 国家罗非鱼现代产业技术体系建设经费项目(CARS-49); 农业部公益性行业科研专项经费项目(201003020); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(2011JBFA21).

作者简介: 涂玮(1986-), 男, 硕士, 主要从事罗非鱼饲料脂肪营养研究. E-mail: jacktuwei@163.com

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

此, 本实验以初始体质量为(46.14±4.67) g 的尼罗罗非鱼为研究对象, 通过研究饲料脂肪水平对其生长性能、全鱼和肌肉的基本成分、血清生化和脂肪代谢酶活性等指标的影响, 确定其饲料中适宜的脂肪需要量, 旨在为其配合饲料中添加脂肪提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料配制

实验饲料采用纯化饲料, 以酪蛋白和明胶为

蛋白源, 糊精为糖源, 鱼油为脂肪源。采用单因子浓度梯度法配制鱼油添加水平为 0%、3%、6%、9%、12%和 15%的 6 种实验饲料(实测脂肪水平依次为 0.20%、2.70%、6.11%、8.04%、11.13%和 14.85%), 其中脂肪水平的增减用纤维素调平。各原料粉碎过 60 目筛, 称重后混匀, 少量的组分采用逐级扩大法混合, 用饲料机制成直径为 2 mm, 长约 6 mm 的圆柱形颗粒, 自然风干后, 选取颗粒大小适宜饲料用胶袋密封, 置于冰柜中冷藏备用, 实验饲料配方见表 1。

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

成分 ingredient	饲料脂肪水平/% lipid level						%
	0.20	2.70	6.11	8.04	11.13	14.85	
酪蛋白 casein	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	32.0	
明胶 glutin	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	
鱼油 fish oil	0	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0	
糊精 dextrin	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	
纤维素 cellulose	20.0	17.0	14.0	11.0	8.0	5.0	
羧甲基纤维素钠 CMC-Na	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
氯化胆碱 choline chloride	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
无机盐预混料mineral premix ^a	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	
维生素预混料vitamin premix ^a	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
营养组成 proximate composition							
粗蛋白 crude protein	30.77	30.75	30.02	30.08	29.32	30.26	
粗脂肪 crude lipid	0.20	2.70	6.11	8.04	11.13	14.85	
灰分 ash	2.95	3.07	3.09	3.09	2.30	2.61	
水分 moisture	9.48	9.54	9.91	9.94	12.68	13.34	

注: a根据Hsieh等^[9]配制无机盐预混料和维生素预混料。
Note: a Mineral premix and vitamin premix were formulated according to formula of Hsieh et al^[9].

1.2 实验鱼和饲养管理

实验用鱼由长江水产研究所罗非鱼保种基地提供, 其原种由长江水产研究所 2002 年从苏丹引进。养殖实验在长江水产研究所太湖基地进行。实验开始前用商品饲料驯养 2 周, 选取体质健壮、规格整齐的实验鱼 360 尾, 初始体质量为(46.14±4.67) g, 随机分为 6 组, 每组设 4 重复, 每重复 15 尾, 饲养于 400 L 的养殖桶(直径 1 m, 深 0.4 m)。正式养殖实验期 56 d, 每天投喂 3 次(8:30、12:30 和 16:30 各 1 次), 投饲率 3%~5%, 根据鱼体生长、

摄食情况和水温等环境状况及时调整。每日记录水温、罗非鱼摄食行为和死亡数量等, 每两天通过虹吸清理桶内污物, 桶内连续通气保持常流水, 养殖期间水温(28±4)℃, 溶氧大于 5 mg/L。

1.3 样品采集

养殖实验结束后, 将鱼体饥饿 24 h, 以桶为单位称重。每桶随机取 6 尾鱼, 其中 3 尾用于测定全鱼的营养成分; 另外 3 尾用于测定鱼体生长性能、血清生化指标和脂肪代谢酶活性。具体操作如下: 先测量体长、体高和体质量; 再从尾静脉

取血, 4℃下静置 4 h 后, 以 3 000 r/min 离心 10 min, 取血清, -80℃下冷冻保存; 然后取出内脏, 再分离出肝和全肠; 最后取肌肉(第一根背鳍至最后一根背鳍之间, 侧线以上白肌)。将所有样品存放在-80℃冰箱备用。

1.4 指标测定

1.4.1 生长性能测定 根据以下公式, 计算增重率(WGR)、特定生长率(SGR)、饲料系数(FCR)、蛋白质效率(PER)、肝体比(HIS)和脏体比(VSI)。

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

$$\text{特定生长率(SGR, \% / d)} = (\ln W_t - \ln W_0) / 56 \times 100;$$

$$\text{饲料系数(FCR)} = W_f / (W_t - W_0);$$

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

$$\text{肝体比(HIS, \%)} = W_h / W \times 100;$$

$$\text{脏体比(VSI, \%)} = W_v / W \times 100;$$

式中, W_t 代表末体质量(g), W_0 代表初体质量(g), 56 为饲养天数(d), W_f 为投喂饲料的总质量(g), D 为饲料中干物质的含量(%), P 为饲料中蛋白质含量(%), W 为鱼体质量(g), W_h 为鱼体肝质量(g), W_v 为鱼体内脏质量(g)。

1.4.2 常规营养成分测定 水分含量采用冷冻干燥法, 使用 CHRIST 型冷冻干燥机, 冷冻干燥 48 h, 粗蛋白采用凯氏定氮法(GB/T5009.3), 粗脂肪采用索氏抽提法(GB/T5009.6), 粗灰分采用灼烧称重法(GB/T5009.4)。

1.4.3 血清生化指标测定 血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)的含量和谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)的活性由全自动生化分析仪(sysmex-800)测定, 所用试剂均购自 Sysmex 公司。

1.4.4 脂肪代谢酶活性的测定

(1)粗酶液制备 每尾鱼取 1.0 g 全肠(前、中、后各取一段), 加入 9 倍体积 4℃双蒸水, 冰浴匀浆(10 000 r/min, 10 s/次, 连续 4 次), 3 000 r/min 离心 10 min, 取上清测肠道脂肪消化酶活性; 取 0.1 g 肝组织加入 9 倍体积 4℃生理盐水, 用同上方法

制备粗酶液, 测定脂蛋白脂酶和肝脂酶活性; 脂肪酸合成酶粗酶液的制备方法为: 将鱼致死, 立刻取 1.0 g 肝胰脏, 加 2 mL 抽提液^[10]匀浆, 冷冻离心 50 min(20 000 r/min, 4℃), 上清液于-80℃冰箱冻存。

(2)脂肪代谢酶活性的测定方法 肠道脂肪酶测定参照聚乙烯醇橄榄油乳化液水解法^[11], 并参考黎军胜等^[12]的研究, 其活力单位定义为在 pH=7.3, 35℃条件下, 每分钟每克组织分解脂肪产生 1 μmol 脂肪酸为 1 个活力单位(U/g)。脂肪酸合成酶(FAS)酶活根据田娟等^[13]的方法测定, 其活力单位定义为 1 min 氧化 14 nmol NADPH 的酶量(U/g)。脂蛋白酯酶和肝脂酶活性采用南京生物工程研究所试剂盒方法测定, 定义为每克肝脏组织每小时产生 1 μmol 的游离脂肪酸为 1 个酶活单位(U/g), 其中总脂酶活性=脂蛋白脂酶活性+肝脂酶活性。

1.5 数据分析

数据均以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示, 用 SPSS16.0 统计软件中 One-way ANOVA 进行方差分析, 并用 Duncan 进行多重比较, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同饲料脂肪水平下尼罗罗非鱼幼鱼生长性能和饲料利用情况

由表 2 可知, 随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼幼鱼增重率、特定生长率以及蛋白质效率均呈先增加后下降的趋势, 各实验组显著高于对照组($P < 0.05$); 各脂肪添加组的饲料系数呈先下降后上升的趋势, 在脂肪水平为 8.04%时最低, 各实验组显著低于对照组($P < 0.05$)。肝体比随脂肪水平增加而上升, 实验组显著高于对照组($P < 0.05$), 各实验组脏体比和存活率与对照组相比差异不显著($P > 0.05$)。

经统计分析表明, 尼罗罗非鱼幼鱼增重率(y)和饲料脂肪水平(x)的二次曲线回归方程为: $y = -0.783 4x^2 + 13.879x + 88.042 (R^2 = 0.919 9)$, 当脂肪水平为 8.86%时, 增重率最大(图 1)。饲料系数(y)

和饲料脂肪水平(x)的二次曲线方程为: $y=0.0091x^2-0.1711x+2.1851$ ($R^2=0.8703$), 当饲料脂肪水平为 9.40%时, 饲料系数最小(图 2)。蛋白质效率(y)和饲料脂肪水平(x)的二次曲线方程为: $y=-0.0112x^2+0.2184x+1.6013$ ($R^2=0.9128$), 当饲料脂肪水平为 9.75%时, 蛋白质效率最大(图 3)。

2.2 不同饲料脂肪水平下尼罗罗非鱼幼鱼全鱼和肌肉组成

由表 3 可见, 随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼幼鱼全鱼的水分含量逐渐下降, 其中 11.13%组和 14.85%组显著低于对照组($P<0.05$); 全鱼的粗脂肪含量不断升高, 各实验组显著高

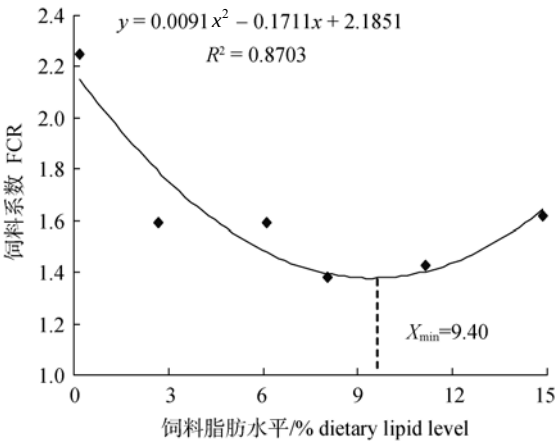


图 2 饲料脂肪水平与饲料系数二次回归分析
Fig.2 Second-order regression analysis between FCR and dietary lipid level

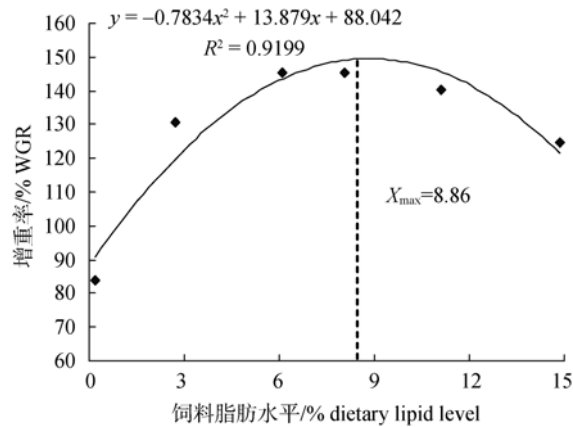


图 1 饲料脂肪水平与增重率二次回归分析
Fig.1 Second-order regression analysis between weight gain rate (WGR) and dietary lipid level

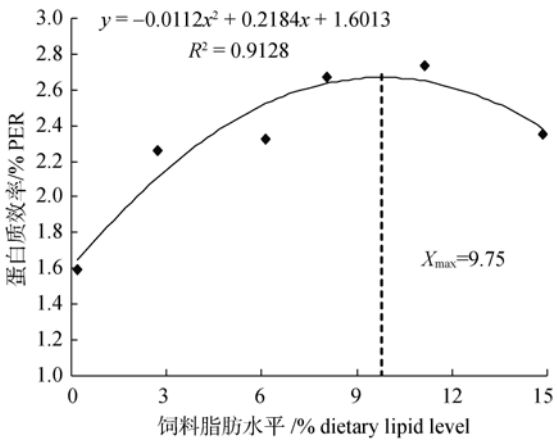


图 3 饲料脂肪水平与蛋白质效率的二次回归分析
Fig.3 Second-order regression analysis between protein efficiency ratio (PER) and dietary lipid level

表 2 饲料脂肪水平对尼罗罗非鱼生长性能和饲料利用的影响
Tab.2 Effect of dietary lipid levels on growth performance and feed utilization of *Oreochromis nilotica*

n=8; $\bar{x} \pm SD$

指标 index	饲料脂肪水平/% lipid level					
	0.20	2.70	6.11	8.04	11.13	14.85
初始体质量/g initial weight	45.98±0.62	45.93±0.45	46.50±0.62	46.05±0.59	46.28±0.88	46.13±0.68
终末体质量/g final weiht	84.52±2.82 ^a	105.86±2.82 ^b	113.60±2.51 ^c	112.90±1.57 ^c	111.59±1.19 ^c	103.60±2.88 ^b
增重率/% WGR	83.99±7.63 ^a	130.42±6.53 ^b	145.44±5.88 ^c	145.19±3.97 ^c	140.19±6.23 ^c	124.81±8.28 ^b
特定生长率/(%·d ⁻¹) SGR	1.09±0.07 ^a	1.49±0.05 ^b	1.60±0.04 ^c	1.60±0.03 ^c	1.57±0.05 ^c	1.45±0.07 ^b
肝体比/% HSI	1.86±0.17 ^a	2.10±0.20 ^b	2.18±0.16 ^{bc}	2.24±0.14 ^{bc}	2.29±0.19 ^{bc}	2.40±0.16 ^c
脏体比/% VSI	6.53±0.37	6.89±0.45	6.83±0.36	6.70±0.34	6.89±0.20	6.93±0.53
饲料系数 FCR	2.25±0.06 ^a	1.59±0.11 ^b	1.59±0.08 ^b	1.38±0.03 ^c	1.43±0.04 ^c	1.62±0.05 ^b
蛋白效率/% PER	1.60±0.04 ^a	2.26±0.15 ^b	2.33±0.11 ^b	2.67±0.06 ^c	2.73±0.07 ^c	2.35±0.07 ^b
存活率/% survival	100	100	100	100	100	100

注: 同行上标字母不同代表显著差异($P<0.05$).
Note: Figures in the same row with different letters are significantly different($P<0.05$).

于对照组($P<0.05$)。各组全鱼的粗蛋白和灰分含量差异不显著($P>0.05$)。

随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼幼鱼肌肉的粗蛋白含量呈先下降后上升趋势, 8.04%组显著降低($P<0.05$); 肌肉的粗脂肪含量不断升高, 各实验组显著高于对照组($P<0.05$)。各组肌肉的水分和灰分含量差异不显著($P>0.05$)。

2.3 不同饲料脂肪水平下尼罗罗非鱼血清生化指标

由表 4 可见, 随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼幼鱼的血清总胆固醇含量与甘油三酯含量均呈现先升高后降低的趋势, 各实验组显著高于对照组($P<0.05$); 血清高密度脂蛋白含量呈先上升后稳定的趋势, 在 6.11%组达到稳定, 并显著高于对照组($P<0.05$); 血清低密度脂蛋白含量变

化不规律, 2.70%组和 14.85%组显著低于对照组($P<0.05$), 11.13%组显著高于对照组($P<0.05$)。血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性均在脂肪水平为 6.11%时最小, 在 14.85%时最大。

以饲料脂肪水平为自变量(x), 以血清高密度脂蛋白胆固醇含量为因变量(y)作回归直线, 得回归方程: $y=0.114\ 4x+1.556\ 4(R^2=0.932\ 2)$ 和 $y=2.505\ 9$, 通过折线法求得两直线相交值, 即尼罗罗非鱼幼鱼获得最佳血清高密度脂蛋白含量时, 饲料脂肪水平为 8.30%(图 4)。

2.4 不同饲料脂肪水平下尼罗罗非鱼幼鱼脂肪代谢酶活性

由表 5 可知, 随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼幼鱼肠道脂肪酶活性呈先上升后下降的趋

表 3 饲料脂肪水平对全鱼和肌肉常规体组成的影响
Tab. 3 Effect of dietary lipid levels on body and muscle composition of *Oreochromis nilotica*

指标 index	饲料脂肪水平/% lipid level					
	0.20	2.70	6.11	8.04	11.13	14.85
全鱼 Whole body						
水分 moisture	73.69±1.92 ^b	72.31±1.70 ^{ab}	72.23±1.37 ^{ab}	72.20±1.23 ^{ab}	71.53±1.32 ^a	71.14±1.05 ^a
粗蛋白 crude protein	17.15±0.28	16.84±0.84	16.76±1.04	16.70±0.83	16.44±1.60	16.35±0.61
粗脂肪 crude lipid	4.01±0.56 ^a	4.79±0.13 ^b	5.06±0.53 ^{bc}	5.65±0.61 ^{cd}	6.02±0.30 ^{de}	6.61±0.50 ^e
粗灰分 ash	3.81±0.27	3.93±0.16	3.67±0.15	3.88±0.17	3.72±0.21	3.74±0.11
肌肉 muscle						
水分 moisture	78.24±0.18	77.98±0.08	77.92±0.50	78.27±0.39	78.21±0.58	77.67±0.24
粗蛋白 crude protein	18.78±0.78 ^b	18.22±0.19 ^{ab}	17.99±0.38 ^{ab}	17.82±0.54 ^a	17.94±0.09 ^{ab}	18.78±0.50 ^b
粗脂肪 crude lipid	1.38±0.05 ^a	1.79±0.18 ^b	1.82±0.18 ^b	1.90±0.09 ^b	2.04±0.09 ^{bc}	2.19±0.20 ^c
灰分 ash	1.25±0.03	1.25±0.02	1.29±0.02	1.24±0.03	1.26±0.03	1.27±0.02

注:同行上标字母不同代表显著差异($P<0.05$).
Note: Figures in the same row with different letters are significantly different($P<0.05$).

表 4 饲料脂肪水平对尼罗罗非鱼血清生化指标的影响
Tab. 4 Effect of dietary lipid levels on serum biochemical indices of *Oreochromis nilotica*

指标 index	饲料脂肪水平/% lipid level					
	0.20	2.70	6.11	8.04	11.13	14.85
总胆固醇/(mmol·L ⁻¹) TCHO	3.28±0.08 ^a	3.74±0.13 ^b	3.99±0.25 ^b	4.78±0.41 ^d	4.47±0.44 ^{cd}	4.16±0.36 ^{bc}
甘油三酯/(mmol·L ⁻¹) TG	1.03±0.09 ^a	1.32±0.04 ^b	1.37±0.13 ^b	2.02±0.19 ^d	2.18±0.14 ^d	1.66±0.10 ^c
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol·L ⁻¹) HDL-C	1.64±0.06 ^a	1.76±0.13 ^a	2.30±0.15 ^b	2.34±0.13 ^b	2.35±0.19 ^b	2.48±0.17 ^b
低密度脂蛋白胆固醇/(mmol·L ⁻¹) LDL-C	0.66±0.08 ^{cd}	0.49±0.04 ^a	0.58±0.07 ^{bc}	0.72±0.04 ^d	0.83±0.05 ^e	0.53±0.01 ^{ab}
谷丙转氨酶/(U·L ⁻¹) ALT	20.00±2.16 ^{ab}	22.50±1.29 ^{bc}	18.20±1.30 ^a	24.75±2.06 ^c	35.00±2.83 ^d	38.33±3.79 ^d
谷草转氨酶/(U·L ⁻¹) AST	49.33±4.72 ^c	32.33±1.63 ^a	28.00±2.65 ^a	40.00±2.65 ^b	40.75±2.75 ^b	64.50±3.00 ^c

注: 同行上标字母不同代表显著差异($P<0.05$).
Note: Figures in the same row with different letters are significantly different($P<0.05$).

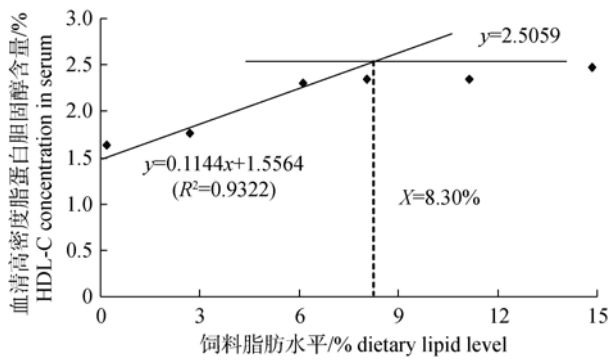


图 4 饲料脂肪水平对血清高密度脂蛋白含量影响的回归分析

Fig.4 Regression analysis between dietary lipid level and serum HDL-C concentration

势, 11.13%组达到最大, 且显著高于对照组($P<0.05$); 脂蛋白酯酶、肝脂酶和总酯酶(脂蛋白酯酶+肝脂酶)活性均呈先上升再下降最后趋于稳定的趋势, 且在脂肪水平为 8.04%时达到最大, 显著高于其他各组($P<0.05$); 脂肪酸合成酶活性呈不断下降的趋势, 与对照组相比, 各实验组酶活显著降低($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 饲料脂肪水平对罗非鱼幼鱼生长性能与脂肪沉积的影响

在鱼类饲料中添加适宜的脂肪能提高鱼类的生长性能和饲料利用。本实验通过对增重率、饲料效率和蛋白质效率进行二元回归综合分析得出, 在脂肪水平为 8.86%~9.75%范围内, 尼罗罗非鱼

幼鱼能获得最佳的生长性能和饲料利用。Chou等^[5]研究表明, 奥尼罗非鱼幼鱼[体质量为(1.34±0.20) g]在 12%的饲料脂肪水平下生长最快。王爱民等^[7]认为吉富罗非鱼幼鱼[体质量为(2.63±0.16) g]适宜的脂肪水平为 7.67%~9.34%。庞思成^[8]对体质量为(128~160) g的尼罗罗非鱼研究结果表明其适宜的饲料脂肪含量为 10%。本实验结果与王爱民和庞思成的研究基本一致, 比Chou等的研究结果要低, 这种差异可能由鱼的生长阶段及饲养条件等因素不同引起。

本实验结果显示, 随饲料脂肪水平的升高, 尼罗罗非鱼幼鱼的肝体比以及全鱼和肌肉的脂肪含量显著增加。同时在黑线鳉(*Melanogrammus aeglefinus*)^[14]、厚唇弱棘鲷(*Hephaestus fuliginosus*)^[15]、尖吻鲈(*Lates calcarifer*)^[16]、奥尼罗非鱼^[17]、条纹鲈(*Morone saxatilis*)^[18]、鲇(*Clarias macrocephal*×*C.gariepinus*)^[19]和鲤(*Cyprinus carpio*)^[20]的研究中也得到证实, 鱼体脂肪含量与饲料脂肪水平呈正相关性。说明饲料脂肪含量的增加促进了脂肪在尼罗罗非鱼体中的蓄积。

3.2 饲料脂肪水平对尼罗罗非鱼血清生化指标的影响

在血液中, 一般甘油三酯的升降都伴随着胆固醇的升降^[21], 本实验中尼罗罗非鱼幼鱼甘油三酯与胆固醇的变化趋势基本一致, 随饲料脂肪水平的升高呈先升高后降低的趋势, 且总胆固醇含量更易受到脂肪水平的影响。在正常情况下, 血

表 5 饲料脂肪水平对尼罗罗非鱼幼鱼脂肪代谢相关酶的影响

Tab. 5 Effect of dietary lipid levels on lipid metabolism enzyme of *Oreochromis nilotica*

指标 index	饲料脂肪水平/% lipid level					
	0.20	2.70	6.11	8.04	11.13	14.85
肠道 intestine						
肠道脂肪酶 intestinal lipase	246.22±19.81 ^a	244.26±23.72 ^a	259.86±8.62 ^a	271.63±18.45 ^{ab}	291.33±18.23 ^b	267.27±18.28 ^{ab}
肝 liver						
脂蛋白酯酶 lipoprotein lipase	3.66±0.28 ^a	6.02±0.34 ^a	14.38±1.08 ^b	48.08±2.47 ^d	25.88±1.97 ^c	26.70±1.48 ^c
肝脂酶 hepatic lipase	3.35±0.23 ^a	7.61±0.38 ^a	16.37±1.08 ^b	42.62±3.13 ^d	38.10±3.64 ^c	34.95±3.01 ^c
总脂酶 total lipase	7.02±0.29 ^a	13.63±0.72 ^b	30.75±1.51 ^c	90.69±3.48 ^f	63.98±4.05 ^d	61.66±1.92 ^d
脂肪酸合成酶 fatty acid synthetase	256.84±10.76 ^f	176.02±9.36 ^c	116.24±6.64 ^d	73.13±7.00 ^c	52.31±4.17 ^b	32.21±2.48 ^a

注: 同行上标字母不同代表差异显著($P<0.05$)

Note: Figures in the same row with different letters are significantly different ($P<0.05$)

清中转氨酶的活性保持在较低水平,当组织受损或病变时,血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性将显著升高^[22-23]。本实验结果显示,14.85%组的血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性均显著升高,可能由于高脂水平饲料导致鱼体肝病^[24],从而引起血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性同时升高。

高密度脂蛋白把机体内的胆固醇运回肝代谢,而低密度脂蛋白的作用正好相反,是向组织转运肝合成的内源性胆固醇^[25],两者在血液中分别以HDL-C和LDL-C形式运输胆固醇。本实验中,尼罗罗非鱼幼鱼血清HDL-C含量随饲料脂肪水平增加呈先上升后稳定的趋势,这可能与饲料中添加的鱼油有关。有研究报道表明,富含多不饱和脂肪酸(EPA和DHA)的鱼油具有升高大鼠血清HDL-C的作用^[26-27]。通过折线法进一步分析得出,当饲料脂肪水平为8.30%时,尼罗罗非鱼幼鱼达到最佳的血清HDL-C含量。本实验中,血清LDL-C含量变化不规律,有关饲料脂肪水平对尼罗罗非鱼血清LDL-C含量的影响还需进一步研究。

3.3 饲料脂肪水平对尼罗罗非鱼脂肪代谢酶活性的影响

鱼类的机械消化能力很差,主要靠消化酶进行化学性消化,因此消化酶的活性能反映其消化能力^[6]。饲料的脂肪水平会影响到鱼类肠道脂肪酶的活性。宋理平等^[15]在厚唇弱棘鲷研究中发现,随饲料脂肪水平的增加,鱼体肠道脂肪酶活性呈上升趋势,当饲料脂肪添加量为15.1%时,鱼体肠道脂肪酶活性显著高于3.1%。而王重刚等^[28]发现,真鲷(*Pagrosomus major*)稚鱼的脂肪酶活力与饲料脂肪含量呈负相关。本实验结果显示,在11.13%以内,随饲料脂肪水平的升高,尼罗罗非鱼幼鱼肠道脂肪酶活性呈上升趋势,且11.13%组显著高于对照组;当饲料脂肪水平由11.13%升高到14.85%时,肠道脂肪酶活性下降了8.26%。这与上述结果均存在差异。这种差异可能由鱼种、生长阶段、饲料条件等因素不同引起。

肝是动物脂肪酸 β -氧化代谢的重要部位,是鱼类随营养状况而改变脂肪蓄积的主要调节性贮

脂器官^[29]。脂蛋白脂酶(LPL)和肝脂酶(HL)是鱼类肝中参与脂肪降解的2种关键酶,合称为总脂酶(TL)。LPL是一种糖蛋白,存在于多种细胞和组织中,主要催化乳糜微粒和极低密度脂蛋白中的甘油三酯水解,产生甘油并释放出游离脂肪酸。HL在肝细胞中合成,可作为配体促进低密度脂蛋白和乳糜微粒进入肝细胞,并直接参与高密度脂蛋白胆固醇的逆转运和高密度脂蛋白残粒的分解^[30]。目前关于饲料脂肪水平对鱼类脂蛋白脂酶和肝脂酶活性的影响尚未见报道,但在对人和小鼠的研究中发现,脂蛋白脂酶和肝脂酶活性降低与脂肪肝发生密切相关,患脂肪肝的患者和小鼠肝中LPL和HL活性显著降低^[31-32]。本实验中,11.13%组的LPL、HL和TL活性显著低于8.04%组,分别降低了46.17%、10.61%和29.45%。同时梁旭方等^[33]研究表明,真鲷LPL基因在肝中存在营养诱导性表达,当饲喂高脂饲料时,诱导产生的大量肝LPL将为肝提供更多的来源于食物的游离脂肪酸,使肝有可能出现营养诱导性脂肪蓄积。因此推测本实验中,11.13%的脂肪水平可能已经导致尼罗罗非鱼幼鱼肝因脂肪蓄积过多产生脂肪肝。

脂肪酸合成酶(fatty acid synthetase, FAS)是脂肪酸合成的一个复合体系,肝FAS在动物体脂生成、沉积中发挥重要作用。已有研究表明,饲料脂肪水平越高,吉富罗非鱼^[34]和鲆^[35]的脂肪酸合成酶活性越低。本实验结果亦证实高脂饲料对脂肪酸合成酶活性存在抑制作用。其原因可能是,当外源性脂肪充足时,鱼类自身需要合成的脂肪减少,使得作为脂肪合成原料的脂肪酸需要量减少,从而导致脂肪酸合成酶活性下降。同时已有研究证实,n-3多不饱和脂肪酸是FAS基因表达的强抑制剂^[36]。本实验所用饲用鱼油富含n-3多不饱和脂肪酸^[37],因而随鱼油添加量增加,n-3多不饱和脂肪酸对FAS基因表达抑制作用越强。

4 结论

本实验通过对生长性能指标,血清生化指标以及脂肪代谢相关酶活性的综合分析得出,体质

量为 (46.14 ± 4.67) g的尼罗罗非鱼饲料适宜的脂肪需要量为8.30%~9.75%。

参考文献:

- [1] Silva S S, Gunasekera R M, Shim K F. Interaction of varying dietary protein and lipid levels in young red tilapia: evidence of protein sparing[J]. *Aquaculture*, 1991, 95: 305-318.
- [2] Dias J, Alvarez M J, Diez A, et al. Regulation of hepatic lipogenesis by dietary protein energy in juvenile European seabass (*Dicentrarchus labrax*)[J]. *Aquaculture*, 1998, 161: 169-186.
- [3] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 36-46.
- [4] Du Z Y, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary lipid level on growth, feed utilization and body composition by juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Aquacult Nutr*, 2005(11): 139-146.
- [5] Chou B S, Shiau S Y. Optimal dietary lipid level for growth of juvenile hybrid tilapia *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus* [J]. *Aquaculture*, 1996, 143: 185-195.
- [6] 王爱民, 吕富, 杨文平, 等. 饲料脂肪水平对异育银鲫生长性能、体脂沉积、肌肉成分及消化酶活性的影响[J]. *动物营养学报*, 2010, 22(3): 625-633.
- [7] 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): 80-86.
- [8] 庞思成. 饲料中脂肪含量对罗非鱼生长的影响[J]. *饲料研究*, 1994 (12): 10-11.
- [9] Hsieh S L, Hu C Y, Hsu Y T, et al. Influence of dietary lipids on the fatty acid composition and stearoyl-CoA desaturase expression in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) under cold shock [J]. *Comp Biochem Physiol*, 2007, 147: 438-444.
- [10] 李伟国. 饲料脂肪源对中华绒螯蟹生长、体脂沉积和 FAS 的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- [11] 中山大学生化系生化微生物教研室. 生化技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 1957: 57-62.
- [12] 黎军胜, 李建林, 吴婷婷. 饲料成分与环境温度对奥尼罗非鱼消化酶活性的影响[J]. *中国水产科学*, 2004, 11(6): 585-588.
- [13] 田娟, 冷向军, 李小勤, 等. 肉碱对草鱼生长性能、体成分和脂肪代谢酶活性的影响[J]. *水产学报*, 2009, 33(2): 295-302.
- [14] Nanton D, Lall S P, Kim J D, et al. Effect of dietary lipid on growth and biochemical composition of juvenile haddock, *Melanogrammus aeglefinus*[J]. *Proc World Aquac*, 2001, 195(3-4): 311-319.
- [15] 宋理平, 韩勃, 冒树泉, 等. 脂肪水平对厚唇弱棘鲷生长及肠道脂肪酶活性的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2010, 30(1): 13-17.
- [16] Catacutan M R, Coloso R M. Growth of juvenile Asian seabass, *Lates calcarifer*, fed varying carrying carbohydrate and lipid levels[J]. *Aquaculture*, 1997, 149(1-2): 137-144.
- [17] 甘晖, 李坚明, 冯广朋, 等. 饲料脂肪水平对奥尼罗非鱼幼鱼生长和血浆生化指标的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2009, 18(1): 35-41.
- [18] Gaylord T G, Gatlin A M. Dietary lipid level but not L-carnitine affects growth performance of hybrid striped bass (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*)[J]. *Aquaculture*, 2000, 190(3): 237-246.
- [19] Garling D L, Wilson R P. Effects of dietary carbohydrate-to-lipid ratio on growth and body composition of fingerling channel catfish[J]. *Prog Fish-Cult*, 1977, 39: 43-47.
- [20] Takeuchi T, Watanabe T, Ogino C. Availability of carbohydrate and lipid as dietary energy sources for carp[J]. *Bull Jpn Soc Sci Fish*, 1979, 45: 977-982.
- [21] 何志谦. 人类营养学[M]. 第2版. 北京: 人民卫生出版社, 2000: 95-123.
- [22] 高露姣, 施兆鸿, 艾春香. 不同脂肪源对施氏鲟鱼血清生化指标的影响[J]. *海洋渔业*, 2005, 27(4): 319-323.
- [23] 惠天朝, 施明华, 朱荫媚. 硒对罗非鱼慢性镉中毒肝抗氧化酶及转氨酶的影响[J]. *中国兽医学报*, 2000, 20(3): 264-266.
- [24] 冯健, 贾刚. 饲料中不同脂肪水平诱导红姑鱼脂肪肝病的研究[J]. *水生生物学报*, 2005, 29(1): 61-64.
- [25] 周顺伍. 动物生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 144-145.
- [26] Kobatake Y, Kuroda K, Jinnouchi H, et al. Differential effects of dietary eicosapentaenoic and docosahexaenoic fatty acids on lowering of triglyceride and cholesterol levels in the serum of rats on hypercholesterolemic diet [J]. *Nutr Sci Vitaminol*, 1984, 30(4): 357-372.
- [27] 刘玉军, 孙明堂, 张枢泉, 等. 浓缩鱼油对高脂饲料大鼠血脂水平的影响[J]. *营养学报*, 1988, 10(2): 119.
- [28] 王重刚, 陈品健, 顾勇, 等. 不同饵料对真鲷稚鱼消化酶活性的影响[J]. *海洋学报*, 1998, 20(1): 103-106.
- [29] Mori A S. Characteristics of serum lipoprotein features associated with lipid levels of muscle and liver from five species of fish [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1993(59): 1565-1571.
- [30] 朱瑞俊, 李小勤, 谢骏, 等. 饲料中添加氯化胆碱对草鱼成鱼生长、脂肪沉积和脂肪代谢酶活性的影响[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(3): 527-535.
- [31] Reue K, Doolittle M H. Naturally occurring mutations in mice affecting lipid transport and metabolism[J]. *J Lipid Res*, 1996, 37: 1387-1405.

- [32] 倪燕君, 刘厚钰, 张顺财, 等. 肝脂酶、脂蛋白脂肪酶在脂肪肝病中的作用[J]. 中华消化杂志, 1999, 19(5): 324–327.
- [33] 梁旭方, 白俊杰, 劳海华, 等. 真鲷脂蛋白脂肪酶基因表达与内脏脂肪蓄积营养调控定量研究[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(6): 625–631.
- [34] 王爱民, 韩光明, 韦信键, 等. 吉富罗非鱼 FAS 基因的克隆及再投喂和饲料脂肪水平对其表达的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(7): 1113–1120.
- [35] Jantrarotai W, Sitasi P, Rajchapakdee S. The optimum carbohydrate to lipid ratio in hybrid *Clarias catfish* (*Clarias-macrocephal* × *C. gariepinus*) diet containing raw broken rice[J]. Aquaculture, 1994, 127(1): 61–68.
- [36] Clarke S D, Jump D B. Dietary polyunsaturated fatty acid regulation of gene transcription [J]. Annu Rev Nutr, 1994, 14: 83–98.
- [37] 宋永康, 林虬, 苏德森, 等. 饲用鱼油脂肪酸营养成分分析[J]. 台湾海峡, 2005, 24(3): 299–303.

Optimal dietary lipid requirement of advanced juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*

TU Wei¹, TIAN Juan², WEN Hua², JIANG Ming², WU Fan², LIU Wei², ZHANG Mingming¹, SUN Liwei¹

1. College of Fisheries, Huangzhong Agriculture University, Wuhan 430070, China;

2. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China

Abstract: Dietary lipids play an important role in fish nutrition as a source of energy, essential fatty acids, and as a vector for fat-soluble vitamins that are needed to maintain the biological structure and normal function of cell membranes. A number of studies have shown that increasing the proportion of lipid in fish feed reduces the need for protein and results in improved growth, feed conversion efficiency, and palatability, and reduces environmental pollution from the feed and its metabolites. However, little is known about the dietary lipid requirements of juvenile *Oreochromis niloticus*. Our objective was to determine the optimal dietary lipid requirement of advanced juvenile *O. niloticus*. We randomly assigned fish ($n=360$) with average initial body weight of (46.14 ± 4.67) g into 6 groups consisting of 4 replicates ($n=15$ fish/replicate). Each group was fed a diet containing either 0 (control group), 3%, 6, 9%, 12%, or 15% fish oil for 8 weeks (actual lipid level was 0.20%, 2.70%, 6.11%, 8.04%, 11.13%, and 14.85%, respectively). We measured growth, lipid deposition, serum biochemical indexes, and lipid metabolism enzyme activities at the end of the trial. Weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR), and protein efficiency ratio (PER) initially increased with increasing lipid concentrations but then decreased. Conversely, the feed conversion ratio (FCR) first decreased then increased. Using second order regression analysis, we estimated that the optimal level of dietary lipid to promote WGR, FCR, and PER was 8.86%, 9.75% and 9.40%, respectively. An increase in dietary lipid levels was associated with a significant increase in the hepatosomatic index (HSI) and crude fat content in both the whole body and muscle ($P<0.05$). Serum total cholesterol (TCHO) and triglyceride (TG) levels first increased then decreased as the level of dietary lipid increased. High density lipoprotein cholesterol (HDL-C) content first increased then plateaued as levels of dietary lipid increased. Broken-line regression analysis of the HDL-C content against dietary lipid level indicated that the dietary lipid requirement for optimal HDL-C content was 8.30%. Alanine aminotransferase (ALT) and aspartate aminotransferase (AST) activity were highest in the group fed 11.13% dietary lipid and lowest in the group fed 6.11% dietary lipid. Intestine lipase, lipoprotein lipase (LPL), hepatic lipase (HL) and total lipase (TL) activity tended to first increase and then decrease as the level of dietary lipid increased. Conversely, fatty acid synthase (FAS) activity decreased significantly ($P<0.05$). Our comprehensive analysis of growth performance, body composition, serum biochemical indexes, and lipid metabolism enzyme activity suggests that the optimal level of dietary lipid for advanced juvenile *O. niloticus* is between 8.30%–9.75%.

Key words: *Oreochromis niloticus*; lipid requirement; lipid deposition; serum biochemical index; lipid metabolism enzyme; activity

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