

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2013.00108

饲料脂肪水平对梭鱼脂肪沉积、脂肪代谢酶及抗氧化酶活性的影响

张春暖^{1,2}, 王爱民¹, 刘文斌², 杨文平¹, 於叶兵¹, 吕林兰¹, 黄金田¹, 齐志涛¹

1. 盐城工学院 海洋技术系, 江苏省沿海池塘养殖生态重点实验室, 江苏 盐城 224051;

2. 南京农业大学 动物科技学院, 江苏省水产动物营养重点实验室, 江苏 南京 210095

摘要: 为了探讨饲料脂肪水平对梭鱼(*Chelon haematocheilus*)脂肪沉积、脂肪代谢酶及抗氧化酶活性的影响,选取 360 尾平均体质量为(5.4±0.2) g 的梭鱼鱼种,随机分为 6 组,每组 3 个重复,每个重复 20 尾鱼,分别投喂脂肪含量为 2.71%、5.79%、8.23%、11.85%、14.39%、16.91%的 6 组等氮饲料,饲养 60 d,测定相应生物学指标及酶活。研究结果表明,随着脂肪水平的升高,肝体指数、脏体指数显著升高($P<0.05$),肥满度 8.23%组最大,其显著高于 2.71%组($P<0.05$);梭鱼全鱼、肝脂肪含量显著升高($P<0.05$),14.39%组全鱼脂肪含量最高,16.91%组肝脂肪含量最高。饲料脂肪水平对肝脂肪代谢酶有显著影响($P<0.05$),其中脂蛋白酯酶(LPL)、肝酯酶(HL)、总酯酶(GE)活性随着饲料脂肪水平的升高显著增高($P<0.05$),16.91%组显著高于 2.71%、5.79%、8.23%组($P<0.05$);苹果酸脱氢酶活性呈显著下降趋势($P<0.05$);血液中甘油三酯(TG)、总胆固醇(CHO)、游离脂肪酸(EFA)有升高趋势,但各组差异不显著($P>0.05$);脂肪水平 16.91%组高密度脂蛋白胆固醇(HDL)含量最高,显著高于脂肪水平 2.71%的组($P<0.05$);肝脏超氧化物歧化酶(SOD)活性随着饲料脂肪水平的升高呈先上升后下降的趋势,8.23%组活性最高,丙二醛(MDA)含量 16.91%组显著高于其他 5 组($P<0.05$)。结果显示,肝是梭鱼脂肪沉积的主要场所,肝脂肪沉积比肌肉更敏感,高脂肪饲料还使脂肪分解酶的活性增强,血脂含量增加;适宜的饲料脂肪水平可提高梭鱼的抗氧化能力,脂肪水平过高则会导致抗氧化能力下降。

关键词: 梭鱼; 脂肪水平; 脂肪沉积; 脂肪代谢; 抗氧化

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2013)01-0108-08

梭鱼(*Chelon haematocheilus*)主要分布在中国沿海地区,属硬骨鱼纲、鲈形目、鲷科、梭鱼属,具有生长快、肉质鲜嫩、营养丰富等特点,属广温、广盐性鱼类,是亚洲地区最主要的经济代表种之一。梭鱼为杂食性鱼类,可以摄食环境中的有机碎屑,对维持养殖水域生态平衡和环境优化可起到重要作用^[1]。

在鱼类营养中,脂肪作为鱼类重要的营养素之一,不但给鱼类提供了生长和生命活动所需的能量,还为鱼类提供维持正常生理机能所需的必需脂肪酸。当饵料脂肪含量不足时,可能导致鱼

类代谢紊乱,造成脂溶性维生素和必需脂肪酸缺乏;而饲料中脂肪含量过高,又会导致鱼体脂肪沉积过多,影响鱼体健康等^[2]。有关饲料营养与脂肪沉积、脂肪代谢酶和抗氧化能力之间的关系,国内外学者进行过大量研究^[3-6],Wang 等^[3]研究表明,高脂肪饲料可增加脂肪在军曹鱼(*Rachycentron canadum*)体内的沉积,改变代谢酶的活性,韩雨哲等^[7]研究表明饲料油脂与花鲈(*Lateolabrax maculatus*)肝抗氧化活力有密切关系。关于饲料脂肪水平对梭鱼脂肪代谢及抗氧化活力影响的研究尚未见报道,本实验通过检测饲料脂肪水平对梭

收稿日期: 2012-04-26; 修订日期: 2012-07-09.

基金项目: 江苏省 2011 年度科技型企业技术创新资金项目(BC2011423).

作者简介: 张春暖(1987-),女,硕士研究生,从事水产动物营养与饲料的研究. E-mail: 2010105054@njau.edu.cn

通信作者: 王爱民,博士,副教授. E-mail: blueseawam@ycit.cn

鱼脂肪沉积、脂肪代谢酶和抗氧化能力的影响, 探讨梭鱼配合饲料中适宜的脂肪添加量及为进一步研究脂肪代谢调控机制提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 实验饲料

饲料配方及营养组成如表 1 所示。6 组实验饲料以优质进口鱼粉、豆粕、菜粕、棉粕和肉骨粉为蛋白源, 将饲料的粗蛋白水平固定在 34%左右; 以鱼油为脂肪源, 鱼油添加水平分别为 0、3%、6%、9%、12%、15%, 脂肪实测值分别为 2.71%、5.79%、8.23%、11.85%、14.39%、16.91%。饲料原料均来自盐城殷氏饲料公司, 原料经粉碎机粉碎后, 均过 60 目筛, 用逐级扩大法混匀后制

成直径为 1.5 mm 的颗粒饲料, 统一自然风干后, 放置于-20℃冰箱中保存备用。

1.2 实验鱼与饲养管理

实验梭鱼鱼种为同一批孵化的梭鱼, 购自江苏省盐城市射阳县达福沅特种水产殖场合作社梭鱼育苗基地, 初始体质量(5.4±0.2) g, 运回后用 5%的食盐水进行消毒, 驯养备用。驯养结束后, 挑选无病无伤、规格均一的梭鱼鱼种 360 尾, 随机分到 18 个水族箱(100 cm×80 cm×60 cm)中, 然后将 18 个水族箱随机分为 6 组, 每组设置 3 个重复。

实验采用流水循环控温养殖系统, 流水速度约为 5 L/min, 每天投饲率为 5%~10%, 根据吃食情况进行适度的调整, 每天投喂 3 次, 投喂时间分别为 6:30、12:30、18:30, 投喂前进行吸污和排

表 1 饲料配方及主要营养水平(以风干样为基础)
Tab. 1 Formulation and nutritional composition of the experimental diets (air-dry basis)

成分 content		组别 group						%
		2.71%	5.79%	8.23%	11.85%	14.39%	16.91%	
原料 ingredient								
鱼粉 fish meal		22	22	22	22	22	22	
豆粕 soybean meal		18	18	18	18	18	18	
棉粕 cottonseed meal		5	5	5	5	5	5	
菜粕 rapeseed meal		10	10	10	10	10	10	
肉骨粉 meat and bone meal		10	10	10	10	10	10	
玉米淀粉* corn starch*		28	22	16	10	4	0	
α-纤维 α-cellulose		0	3	6	9	12	13	
鱼油 fish oil		0	3	6	9	12	15	
磷酸二氢钙 ca(H ₂ PO ₄) ₂		1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	
食盐 salt		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
沸石粉 zeolite power		2	2	2	2	2	2	
预混料** premix**		3	3	3	3	3	3	
总量 total quantity		100	100	100	100	100	100	
营养组成 nutrition composition								
水分 moisture		10.34	10.96	11.21	11.59	11.86	10.67	
粗蛋白 crude protein		35.20	34.14	34.75	34.46	34.31	34.26	
粗脂肪 crude fat		2.71	5.79	8.23	11.85	14.39	16.91	
能量 energy(kJ·g ⁻¹)		14.95	15.60	16.31	16.85	18.06	18.47	

注: *玉米淀粉成分参照 GB-T 8885-2008 一级品标准. **预混料为每 kg 饲料提供以下维生素和矿物质元素: VE 60 mg; VK 5 mg; VA 15 000 IU; VD₃ 3 000 IU; VB₁ 15 mg; VB₂ 30 mg; VB₆ 15 mg; VB₁₂ 0.5 mg; 烟酸 175 mg; 叶酸 5 mg; 肌醇 1 000 mg; 生物素 2.5 mg; 泛酸钙 50 mg; 铁 25 mg; 铜 3 mg; 锰 15 mg; 碘 0.6 mg; 镁 0.7 g.

Note: * Corn starch ingredient refers GB-T 8885-2008 standard of first rank standard. ** Premix provides the following vitamins and minerals (mg/kg or IU/kg): VE 60 mg; VK 5 mg; VA 15 000 IU; VD₃ 3 000 IU; VB₁ 15 mg; VB₂ 30 mg; VB₆ 15 mg; VB₁₂ 0.5 mg; nicotinic acid 175 mg; folic acid 5 mg; Inositol 1000 mg; biotin 2.5 mg; pantothenic acid 50 mg; Fe 25 mg; Cu 3 mg; Mn 15 mg; I 0.6 mg; Mg 0.7 g.

便, 饲料投下去 20 min 后排出残饵, 实验用水为曝过气的自来水, 每 5 天换水 1 次, 实验期间全天充气, 保证水质: 溶氧>5.0 mg/L, pH 值 7.0~8.2, 氨氮 0.1~0.2 mg/L, 亚硝酸盐 0.05~0.20 mg/L, 水温 24~28℃。每天对天气、水温、吃食、死亡等情况进行记录, 养殖实验共进行 60 d。

1.3 样品的采集

实验开始前取 5 尾鱼, 用于初始样本中脂肪的测定, 饲养 60 d 后, 禁食 24 h, 每缸随机取 6 尾梭鱼, 先用 MS-222 对鱼体进行麻醉, 然后用肝素钠(含量 1%)润过的针管从尾静脉采血, 每 3 尾鱼的血放在 1 个 2 mL 的离心管中, 4℃下, 3 500 r/min 离心 10 min, 血浆置于-20℃冰箱中保存备用; 然后在低温下解剖每条鱼, 取肌肉、肝胰脏, 滤纸吸干、称重, 置于-20℃冰箱中保存, 称肝胰脏、内脏质量, 量体长, 分别计算肝体指数、脏体指数和肥满度。计算公式如下:

肝体指数(hepatosomatic index, %)=100×肝胰脏质量/体质量

肥满度(condtion factor)=体质量/体长³

脏体指数(Viscero-somatic index, %)=100×内脏质量/体质量

血液中甘油三酯(TG)(甘油磷酸氧化酶-过氧化物酶法)、胆固醇(CHO)(胆固醇氧化酶-过氧化物酶法)、高密度脂蛋白(HDL)、游离脂肪酸(EFA)含量均采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒进行测定。

脂肪代谢酶测定: 匀浆液的制备参照南京建成生物工程研究所提供的试剂盒说明书: 准确称

取一定量的组织, 用 0.86%的生理盐水按质量体积比 1:9 进行匀浆, 3 000r/min 离心 10 min, 取上清液, 即为酶液。用铜试剂测定生成游离脂肪酸的量即可分别计算出脂蛋白酯酶(LPL)、肝酯酶(HL)的活性, 总酯酶是 LPL 和 HL 的总和。苹果酸脱氢酶活力通过比色法测定。详细操作见南京生物工程研究所提供的试剂盒说明书。

抗氧化酶活性的测定: 匀浆液制备同上。肝胰脏过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)活性及丙二醛(MDA)含量用南京生物工程研究所提供的试剂盒测定, 详细操作见试剂盒说明书。

全鱼、肌肉、肝脂肪的含量均采用索氏抽提法^[8]测定。

1.5 数据处理

实验原始数据先用 Excel2007 做初步处理后, 用 SPSS16.0 软件进行 One-ANOVA 单因素方差分析, 并用 Duncan 进行多重比较分析, 显著性水平为 $P<0.05$, 数据均用平均值±标准误($\bar{x} \pm SE$)表示。

2 结果与分析

2.1 饲料脂肪水平对梭鱼形体指标的影响

由表 2 可知, 饲料脂肪水平 16.91%组的肝体指数最高, 其显著高于除 14.39%组之外的其他各组($P<0.05$)。16.91%组的脏体指数最高, 其显著高于 8.23%水平以下的各组($P<0.05$), 但和 11.85%和 14.39%组相比差异不显著($P>0.05$)。8.23%组的肥满度最高, 显著高于 2.71%组($P<0.05$), 但和其他组相比差异不显著($P>0.05$)。

2.2 饲料脂肪水平对梭鱼脂肪沉积的影响

由表 3 可知, 随着饲料脂肪水平的升高, 梭

表 2 饲料脂肪水平对梭鱼形体指标的影响
Tab. 2 Effect of dietary lipid levels on body indexes of *Chelon haematocheilus*

指标 indicator	组别 group					
	2.71%	5.79%	8.23%	11.85%	14.39%	16.91%
肝体指数 HSI	1.82±0.80 ^b	1.85±0.23 ^b	1.86±0.83 ^b	2.07±0.15 ^b	2.36±0.10 ^a	2.62±0.18 ^a
脏体指数 VSI	15.72±1.64 ^b	15.72±0.29 ^b	15.73±0.63 ^b	16.75±0.25 ^{ab}	16.72±0.83 ^{ab}	17.70±0.29 ^a
肥满度 CF	1.30±0.48 ^b	1.42±0.69 ^a	1.44±0.21 ^a	1.39±0.18 ^a	1.38±0.61 ^{ab}	1.37±0.28 ^{ab}

注: 同行肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$).
Note: Mean values in the same row with different superscripts were significantly different ($P<0.05$).

鱼全鱼、肝脂肪沉积显著升高($P<0.05$), 饲料脂肪水平最低组的全鱼、肝脂肪含量均最低, 其显著低于脂肪水平分别为 11.85%、14.39%、16.91% 的 3 组($P<0.05$), 和其他两组无显著差异($P>0.05$)。饲料脂肪水平对梭鱼肌肉脂肪沉积无显著影响($P>0.05$)。

2.3 饲料脂肪水平对脂肪代谢酶的影响

由表 4 可知, 随着饲料脂肪水平的升高, 肝脏苹果酸脱氢酶呈现下降的趋势, 脂肪水平最低组显著高于其他 5 组($P<0.05$), 5.79%、8.23% 组显著高于 14.39%、16.91% 组($P<0.05$), 11.85% 组与其他 4 组之间差异不显著($P>0.05$); 肝胰脏脂蛋

白酯酶、肝酯酶、总酯酶随着饲料脂肪水平的升高呈升高趋势, 16.91% 组显著高于 2.71%、5.79% 组($P<0.05$), 其他各组之间差异不显著($P>0.05$), 肌肉脂蛋白酯酶各组之间差异不显著($P>0.05$)。

2.4 饲料脂肪水平对梭鱼血脂的影响

由表 5 可知, 随着饲料脂肪水平的升高, 梭鱼血浆中甘油三酯、胆固醇、游离脂肪酸的含量略有升高, 但各组之间差异不显著($P>0.05$), 16.91% 组高密度脂蛋白胆固醇含量显著高于 2.71%、5.79% 组($P<0.05$), 其他各组差异不显著($P>0.05$)。

2.5 饲料脂肪水平对梭鱼抗氧化指标的影响

由表 6 可知, 随着饲料脂肪水平的升高, 肝

表 3 饲料脂肪水平对梭鱼脂肪沉积的影响
Tab. 3 Effect of dietary lipid levels on lipid deposition of *Chelon haematocheilus*

指标 indicator	组别 group						
	初样 initial	2.71%	5.79%	8.23%	11.85%	14.39%	16.91%
全鱼脂肪 whole body crude fat	4.46	6.89±0.77 ^c	8.12±0.64 ^{bc}	8.66±0.81 ^b	9.27±1.24 ^{ab}	10.49±0.88 ^a	9.34±0.75 ^{ab}
肌肉脂肪 muscle crude fat	3.88	3.71±0.70	3.59±0.79	3.67±0.35	3.69±1.29	4.58±0.81	4.85±0.46
肝脂肪 liver crude fat	—	13.22±1.09 ^c	15.22±1.23 ^{bc}	15.38±0.84 ^{abc}	15.92±1.28 ^{ab}	15.84±1.61 ^{ab}	17.56±0.89 ^a

注: 同行肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$)
Note: Mean values in the same row with different superscripts were significantly different ($P<0.05$).

表 4 饲料脂肪水平对梭鱼脂肪代谢酶的影响
Tab.4 Effect of dietary lipid levels on lipid metabolize enzyme indexes of *Chelon haematocheilus*

指标 indicator	脂肪水平 lipid level					
	2.71%	5.79%	8.23%	11.85%	14.39%	16.91%
苹果酸脱氢酶/(U·L ⁻¹) MDH	9.31±0.96 ^a	5.85±4.02 ^b	6.04±2.61 ^b	3.35±1.52 ^{bc}	2.60±1.07 ^c	2.61±1.36 ^c
肝酯酶/(U·L ⁻¹) HL	0.26±0.32 ^c	0.31±0.47 ^{bc}	0.35±0.98 ^{abc}	0.37±0.26 ^{ab}	0.37±0.82 ^{ab}	0.43±0.36 ^a
脂蛋白酯酶/(U·L ⁻¹) LPL	2.52±0.22 ^c	3.11±0.26 ^c	3.30±0.54 ^{bc}	3.74±0.48 ^{bc}	4.40±1.39 ^{ab}	5.47±1.38 ^a
总酯酶/(U·L ⁻¹) GE	2.72±0.25 ^c	3.49±0.17 ^{bc}	3.56±1.00 ^{bc}	4.04±0.54 ^{abc}	4.77±1.47 ^{ab}	5.62±1.48 ^a
肌肉脂蛋白酯酶/(U·L ⁻¹) MLPL	0.31±0.29	0.36±0.20	0.35±0.16	0.37±0.18	0.42±0.28	0.47±0.07

注: 同行肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$)
Note: Mean values in the same row with different superscripts were significantly different ($P<0.05$).

表 5 饲料脂肪水平对梭鱼血浆不同脂肪成分的影响
Tab. 5 Effect of dietary lipid levels on blood biochemical indexes of *Chelon haematocheilus*

指标 indicator	脂肪水平 lipid level					
	2.71%	5.79%	8.23%	11.85%	14.39%	16.91%
甘油三酯(mg·mL ⁻¹) TG	2.84±1.64	2.61±0.67	3.30±0.76	3.63±1.22	3.96±0.93	4.59±0.60
总胆固醇(mg·mL ⁻¹) CHO	1.86±0.37	1.83±0.48	2.17±0.78	2.08±0.79	2.21±0.61	2.36±0.97
游离脂肪酸(μmol·L ⁻¹) EFA	0.83±0.37	0.84±0.51	1.19±0.48	1.33±0.49	1.89±1.47	1.93±1.21
高密度脂蛋白胆固醇(mg·mL ⁻¹) HDL	1.07±0.28 ^c	1.14±0.35 ^{bc}	1.33±0.58 ^{abc}	1.96±0.54 ^{abc}	2.02±0.22 ^{ab}	2.21±0.39 ^a

注: 同行肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$)
Note: Mean values in the same row with different superscripts were significantly different ($P<0.05$).

表 6 饲料脂肪水平对梭鱼肝抗氧化的影响
Tab. 6 Effect of dietary lipid levels on antioxidant index of *Chelon haematocheilus*

指标 indicator	脂肪水平 lipid level					
	2.71%	5.79%	8.23%	11.85%	14.39%	16.91%
过氧化氢酶/(U·mg ⁻¹) CAT	57.77±16.16	58.35±3.98	65.95±14.99	65.76±5.11	70.61±9.94	71.12±12.51
超氧化物歧化酶/(U·mg ⁻¹) SOD	39.77±3.39 ^{ab}	39.90±2.23 ^{ab}	41.87±6.71 ^a	38.44±4.89 ^{ab}	37.80±3.24 ^{ab}	35.23±1.17 ^b
丙二醛(nmol·mg ⁻¹) MDA	7.61±4.21 ^d	8.03±2.44 ^d	41.54±32.46 ^{cd}	68.94±9.69 ^{bc}	87.11±26.64 ^b	136.19±11.98 ^a
谷胱甘肽过氧化物酶 (U·mg ⁻¹) GSH-PX	3.11±0.77	3.58±0.44	4.49±0.52	4.26±1.01	3.98±1.05	3.55±1.56

注：同行肩标不同字母表示差异显著(P<0.05).
Note: Mean values in the same row with different superscripts were significantly different (P<0.05).

超氧化物歧化酶(SOD)呈先升高后降低的趋势, 8.23%脂肪组显著高于饲料脂肪水平最高组(P<0.05), 其他各组之间差异不显著(P>0.05); 丙二醛(MDA)含量不断升高, 16.91%脂肪组显著高于其他 5 组(P<0.05), 11.85%、14.39%组又显著高于脂肪水平较低的 3 组(P<0.05); 饲料脂肪水平对过氧化氢酶活性(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)含量无显著影响(P>0.05)。

3 讨论

3.1 饲料脂肪水平对脂肪沉积和形体指标的影响

饲料中脂肪水平不合理会造成鱼类体内脂肪蓄积, 当饲料提供的脂肪大于鱼体的需求时, 对鱼体的增重产生负作用^[9]。研究饲料脂肪水平对鱼类形体及脂肪沉积的影响, 可以更加清楚鱼体对脂肪的适宜需求量。Kaushik 等^[10]研究表明, 高脂肪饲料可提高虹鳟(*Salmo gairdneri* R.)的鱼体脂肪含量; Wang 等^[3]的实验证明军曹鱼(*Rachycentron canadum*)随着饲料脂肪水平的增加, 肝、肌肉和全鱼脂肪含量都增加; 类似结论在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[4]中也有报道; Regost 等^[11]研究发现大菱鲆肝脂肪沉积量随着饲料脂肪含量的增加而增加, 但是肌肉中脂肪含量受饲料脂肪含量影响不明显, 本实验得出与之相似的实验结果; 韩光明等^[12]报道吉富罗非鱼饲料中过多的脂肪容易在肌肉和肝中积累; 可见脂肪沉积的部位和程度因鱼种类的不同而异。本实验得出, 饲料脂肪水平在 2.71%~14.39%范围内, 随着脂肪

水平的升高, 全鱼脂肪沉积量也随之升高, 但当饲料脂肪水平达到 16.91%时, 全鱼中脂肪的沉积量并非最大, 这一结论与 Peres 等^[13]对鲈(*Dicentrarchus Labrax*) 的研究结果相似, 即当饲料脂肪水平达到一定程度时, 脂肪水平增加并不能增加全鱼脂肪的沉积量; 肝中脂肪含量随着饲料脂肪水平的增加一直升高, 当饲料脂肪水平为 16.91%时, 肝中脂肪含量可达到最高, 为 17.56%, 显著高于饲料脂肪水平含量较低的两组(P<0.05), 证明肝是梭鱼沉积脂肪的主要器官。

Nanton 等^[5]研究发现鳕(*Melanogrammus aeglefinus*)饲料中脂肪含量超过 14%时, 其肝体指数和肝脂含量显著升高; 冯健^[14]报道红姑鱼(*Sciaenops ocellatus*)肝胰脏脂肪含量与饲料脂肪水平成正相关, 各组红姑鱼发生营养性脂肪肝的程度与饲料脂肪水平成正相关; 刘波等^[15]报道投喂高脂组饲料的翘嘴红鲌肝脂肪、肝体比、脏体比都有升高。本实验得出相似的结论, 在饲料脂肪水平最高的两组, 肝出现不同程度的发白、发黄现象, 此现象与脂肪添加量呈正相关, 且这两组的肝体比显著高于其他各组(P<0.05), 这可能是肝分解脂肪的代谢负担加重导致肝组织增大, 因此, 合理的脂肪营养是预防鱼类肝疾病的关键因素。

3.2 饲料脂肪水平对脂肪代谢酶的影响

脂蛋白脂肪酶(LPL)主要催化血浆中乳糜微粒(CM)和极低密度脂蛋白中的甘油三酯(TG)水解。肝酯酶(HL)也是参与脂蛋白代谢的酶, 还参

与 LDL 的清除^[16]。郑珂珂等^[17]报道高脂肪水平饲料诱导瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)肝中 LPL mRNA 表达水平显著升高。王爱民^[18]报道在高脂肪和禁食后再投喂对吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)肝 LPL 活性共同影响下, 在再投喂后第 6 h 内, 高脂肪显著促进了吉富罗非鱼肝 LPL 活性的升高。在本实验中随着脂肪水平的升高肝脂蛋白酯酶、肝酯酶活性都显著升高, 可能是由于, 高脂肪饲料为梭鱼提供大量甘油三酯, 体内新陈代谢旺盛, 急需大量 LPL 分解甘油三酯, 因而促进肝分泌更多的 LPL, 导致饲喂高脂肪饲料的实验鱼 LPL 活性显著升高。

Lee 等^[19]研究证明, 苹果酸脱氢酶活性的高低直接关系到还原型烟酰胺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)的生成量, 进而影响体内脂肪的合成。Wang 等^[3]研究表明, 军曹鱼肝中苹果酸脱氢酶的活性随着饲料脂肪水平的升高而降低。对多数鱼类的研究发现, 与脂肪合成相关酶的活性会随着食物中脂肪含量的增加而降低, 如高脂肪的食物会降低银大麻哈鱼(*O. kisutch* Walbaum)^[6]、黑鲈(*Dicentrarchus labrax*)等^[20]许多种鱼类的脂肪合成酶活性, 本实验结果与此结论一致。

3.3 饲料脂肪水平对血脂含量的影响

血液是动物体运输营养物质和代谢废物的载体, 血脂水平可以反映鱼类脂肪的代谢情况。如果肝细胞结构或功能受到损害, 血浆中的胆固醇浓度可急剧上升^[21]。本实验研究表明总胆固醇、甘油三酯含量都随着饲料脂肪水平的升高而稍有升高, 各组差异不显著($P>0.05$), 脂肪水平最高组的高密度脂蛋白胆固醇含量显著高于脂肪水平最低组($P<0.05$), 这是由于高密度脂蛋白胆固醇是胆固醇从组织细胞运回肝进行代谢转变的工具, 它可以为血浆脂蛋白代谢提供载体蛋白 C 和胆固醇脂, 还可摄取肝外组织中的自由胆固醇^[21], 通过逆向运输, 运回肝代谢。当饲料脂肪水平升高时, 梭鱼肝和血液中总胆固醇的浓度升高时, 促使血液高密度脂蛋白胆固醇的含量也增加, 有利于清除血液和组织细胞中过剩的胆固醇, 以调节肝中脂肪和血液中脂肪的代谢平衡。杜震宇等^[22]发

现草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)摄食高脂肪饲料后血脂水平升高, 本实验结果与此报道一致。甘晖等^[23]报道奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus*×*Oreochromis aures*)随着饲料脂肪水平的升高, 血浆胆固醇和甘油三酯水平下降, 高密度脂蛋白胆固醇含量升高, Lin 等^[24]曾报道患脂肪肝病的草鱼脂肪的脂质含量与血清甘油三酯含量呈反相变化趋势, 本实验结果与以上结论有一定的差异, 这可能与鱼的种类、生长阶段、脂肪水平等因素有关, 具体原因有待进一步研究。

3.4 饲料脂肪水平对肝抗氧化指标的影响

鱼体中最主要的抗氧化指标包括 SOD、CAT、GSH-PX 等抗氧化酶活性^[7, 25], 它们的基本功能是清除超氧化物自由基如超氧阴离子(O_2^-)和过氧化氢(H_2O_2)。MDA 作为脂质过氧化反应的主要代谢产物, 是反映氧化应激的重要指标, 其含量的升高实际上是脂质过氧化反应增强, 脂质过氧化物增多的表现^[26]。本实验研究得出在饲料脂肪水平为 8.23% 时 SOD 活性最高, MDA 含量显著低于脂肪含量较高的 14.39%、16.91% 组($P<0.05$), 即鱼体抗氧化能力较好, 说明适宜的脂肪添加量可以增强抗氧化酶活力, 减少脂质过氧化物而提高鱼体的抗氧化能力。王朝明等^[27]报道胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)饲料中脂肪含量为 6.88% 时, 其抗氧化能力最强, 脂肪水平过低或过高, 都会影响胭脂鱼的抗氧化活力, 本实验结果与此结论一致。MDA 含量随着饲料脂肪水平不断上升, 表明外源脂肪的添加对细胞脂质过氧化有一定的诱导作用。已有报道指出, 当饲料中添加过多的油脂而摄入的 VE 等抗氧化物质并没提高时, 极易造成机体的氧化损伤^[28]。本研究发现当饲料脂肪水平为 16.91% 时, MDA 的含量可达 132.19 nmol/mg, 表明鱼体的抗氧化能力显著降低。

4 结论

高脂肪饲料使梭鱼肝体指数、脏体指数增大, 脂肪沉积量显著升高, 肝是梭鱼脂肪沉积的主要器官, 肝脂肪沉积比肌肉更敏感, 高脂肪饲料还使脂肪分解酶的活性增强, 血脂的含量增加; 饲

料中适宜的脂肪水平可提高梭鱼的抗氧化能力, 过高脂肪水平导致抗氧化能力下降。

参考文献:

- [1] 施兆鸿, 彭士明, 侯俊利. 我国鳊、梭鱼类资源开发及生态养殖前景的探讨[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(2): 120–124.
- [2] 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.
- [3] Wang J T, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary lipid level on growth performance, lipid deposition, hepatic lipogenesis in juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J]. Aquaculture, 2005, 249: 439–447.
- [4] 曹俊明, 关国强, 刘永坚, 等. 饲料蛋白质、脂肪、碳水化合物水平对草鱼生长和组织营养成分组成的影响[J]. 水产科技情报, 1997, 24 (2): 56–60.
- [5] Nanton D A, Lall S P, McNiven M A. Effects of dietary lipid level on liver and muscle lipid deposition in juvenile haddock, *Melanogrammus aeglefinus* L[J]. Aquacult Res, 2001, 32: 225–234.
- [6] Lin H, Romsos D R, Tack P I, et al. Influence of dietary lipid on lipogenic enzyme activities in Coho salmon *Oncorhynchus kisutch* (Walbaum)[J]. Nutrition, 1977, 107: 846–854.
- [7] 韩雨哲, 姜志强, 任同军, 等. 氧化鱼油与棕榈油对花鲈肝抗氧化酶及组织结构的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(4): 798–806.
- [8] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术 [M]. 第 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 46–56.
- [9] Barbara G H, Karl D S, Delbert M G, et al. Effects of dietary protein and lipid levels on growth, protein digestibility, feed utilization and body composition of Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. Aquaculture, 2008, 283(1–4): 156–162.
- [10] Kaushik S J, Medale F, Fauconneau B, et al. Effect of digestible carbohydrates on protein/energy utilization and on glucose metabolism in rainbow trout (*Salmo gairdneri* R.)[J]. Aquaculture, 1989, 79: 63–74.
- [11] Regost C, Arzel J, Cardinal M, et al. Dietary lipid level, hepatic lipogenesis and flesh quality in turbot (*Pset-tamaxima*)[J]. Aquaculture, 2001, 193(324): 291–309.
- [12] 韩光明, 王爱民, 徐跑, 等. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼体沉积及脂肪酸组成的影响. [J]. 中国水产科学, 2011, 18(2): 338–349.
- [13] Peres H, Oliva-Teles A. Effect of dietary lipid level on growth performance and feed utilization by European sea bass juveniles(*Dicentrarchus Labrax*)[J]. Aquaculture, 1999, 179: 325–334.
- [14] 冯健. 4 种不同脂肪源对太平洋鲑生长和体组成的影响[J]. 水生生物学报, 2006, 30(3): 256–260.
- [15] 刘波, 唐永凯, 俞菊华, 等. 饲料脂肪对翘嘴红鲌生长、葡萄糖激酶和葡萄糖-6-磷酸酶活性与基因表达的影响[J]. 中国水产科学, 2005, 15(6): 1023–1033.
- [16] 张晓刚, 陈运贞. 肝脂酶与脂蛋白代谢[J]. 国外医学: 临床生物化学与检验学分册, 2002, 23(1): 48–49.
- [17] 郑珂珂, 朱晓鸣, 韩冬, 等. 饲料脂肪水平对瓦氏黄颡鱼生长及脂蛋白脂酶基因表达的影响[J]. 水生生物学报, 2010, (4): 815–821.
- [18] 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: 105.
- [19] Lee Y B, Kauffman R G. Cellularity and lipogenic enzyme changes activities of porcine intramuscular adipose tissue[J]. J Anim Sci, 1974, 38: 538–544.
- [20] 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 (1–4): 169–186.
- [21] 北京医学院. 生物化学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1981: 145.
- [22] 杜震宇, 刘永坚, 田丽霞, 等. 草鱼摄食高脂饲料后血脂变化的初步研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(增刊): 77–79.
- [23] 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.
- [24] Lin D, Mao Y Q, Cai F S. Nutritional lipid liver disease of grass carp *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Chin J Oceanol Limn, 1990, 8: 363–374.
- [25] Cheung C C C, Siu W H L, Richardson B, et al. Antioxidant responses to benzo[a]pyrene and Aroclor 1254 exposure in the green-lipped mussel, *Perna viridis*[J]. Environ Poll, 2004, 128(3): 393–403.
- [26] Martinez-Alvarez R M, Hidalgo M C, Morales D, et al. Physiological changes of sturgeon *Acipenser naccarii* caused by increasing environmental salinity[J]. J Exp Biol, 2002, 205(23): 3699–3706.
- [27] 王朝明, 罗莉, 张桂众, 等. 饲料脂肪水平对胭脂鱼幼鱼生长、体组成和抗氧化能力的影响[J]. 淡水渔业, 2010(5): 47–53.
- [28] Strphan G, Guillaume J, Lamour F. Lipid peroxidation in turbot (*Scophthalmus maximus*) tissue: effect of dietary vitamin E and dietary n-6 or n-3 polyunsaturated fatty acids[J]. Aquaculture, 1995, 130: 251–268.

Effects of dietary lipid levels on fat deposition, lipid metabolize enzyme and antioxidant activities of *Chelon haematocheilus*

ZHANG Chunnuan^{1,2}, WANG Aimin¹, LIU Wenbin², YANG Wenping¹, YU Yebing¹, LU Linlan¹, HUANG Jintian¹, QI Zhitao¹

1. Department of Ocean Technology, Yancheng Institute of Technology, Key Laboratory of Aquaculture and Ecology of Coastal pool of Jiangsu Province, Yancheng 224051, China;

2. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: We evaluated the effects of dietary lipid levels on fat deposition, lipid metabolism enzymes, and antioxidant activity in *Chelon haematocheilus*. The fish (mean weight 5.40 ± 0.16 g) were assigned to one of six treatment groups (triplicate, $n=20$ fish/replicate) and fed one of six isonitrogenous diets containing 2.71%, 5.79%, 8.23%, 11.85%, 14.39%, or 16.91% lipid for 60 d. Increases in the dietary lipid level were associated with a significant increase in the hepatosomatic and viscerosomatic indexes ($P<0.05$). Condition factor was highest in the group fed 8.23% lipid, and was significantly higher than the group fed 2.71% lipid ($P<0.05$). There was a significant increase in fat deposition in the whole body and liver as the level of dietary lipid increased. The whole body lipid content was highest in the group fed 14.39% lipid whereas liver lipid was highest in the group fed 16.91% lipid. Dietary lipid had a significant effect on lipid metabolic enzymes ($P<0.05$). Lipoprotein lipase, HL, and the general esterase all increased with an increase in dietary lipid levels. The levels were significantly higher in the group fed 16.91% lipid than in the groups fed $\leq 8.23\%$ lipid ($P<0.05$). Conversely, the levels of malic dehydrogenase tended to decrease with increasing dietary lipid levels. Levels were significantly higher in the group fed 2.71% lipid than in all other groups ($P<0.05$). Blood fat also increased as the level of dietary lipid increased, but there was no change in TG, CHO, and EFA. High density lipoproteins were significantly higher in the group fed 16.91% lipid than in those fed 2.71% lipid ($P<0.05$). Liver superoxide dismutase (SOD) activity increased then decreased as the level of dietary lipid increased. The point of inflection was around 8.23% lipid. Malondialdehyde (MDA) content was significantly higher in the fish fed 16.91% lipid than that of other five groups ($P<0.05$). In summary, our results suggest that higher dietary lipid increases the hepatosomatic and viscerosomatic indexes as well as fat deposition. The liver is the primary place for fat deposition, so was more sensitive than muscle. The higher levels of dietary lipid also increased lipid enzymatic activity and blood fat content. Optimal dietary lipid levels enhanced antioxidant activity in *C. haematocheilus*, although excess lipid levels were associated with a decrease in antioxidant activity.

Key words: *Chelon haematocheilus*; lipid level; fat deposition; lipid metabolism; digestive enzyme; antioxidation

Corresponding author: WANG Aimin. E-mail: blueseawam@ycit.cn