

王文娟, 孟骞骞, 李美静, 等. 日粮脂肪水平对鲤生长、血清生化指标、糖代谢及抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9): 1908-1916.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.09.013

日粮脂肪水平对鲤生长、血清生化指标、糖代谢及抗氧化能力的影响

王文娟¹, 孟骞骞¹, 李美静^{1,2}, 姚祖兵^{1,2}, 王宇江¹, 吴满塘¹, 张梦勤¹, 王文秀³

(1. 西南大学水产学院, 重庆 荣昌 402460; 2. 海南大学海洋学院, 海南 海口 570228; 3. 山东省滨州畜牧兽医研究院, 山东 滨州 256600)

摘要: 为探讨日粮脂肪水平对鲤生长、血清生化指标、糖代谢酶活性及抗氧化能力的影响, 本试验配制了 3.68%、7.60%、11.52%、15.44% 4 种日粮脂肪水平。以 (17.91±0.16) g 幼鲤为研究对象, 开展了 58 d 的饲养试验。结果发现, 随着日粮脂肪水平的增加, 幼鲤的粗脂肪含量上升, 水分含量下降。随日粮脂肪水平的升高, 幼鲤血清中甘油三酯、总胆固醇、高密度脂蛋白、低密度脂蛋白含量上升。15.44% 日粮脂肪水平幼鲤的 6-磷酸果糖激酶、丙酮酸激酶、乳酸脱氢酶活性及乳酸含量均显著高于 3.68% 日粮脂肪水平幼鲤 ($P<0.05$)。15.44% 日粮脂肪水平幼鲤肝脏的过氧化氢酶活性显著高于其他 3 个日粮脂肪水平 ($P<0.05$)。由此可见, 日粮脂肪水平过高会导致鲤生长性能下降, 影响鱼体组成及糖酵解, 造成氧化应激。

关键词: 幼鲤; 生长性能; 血清生化指标; 糖代谢; 氧化应激

中图分类号: S96 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)09-1908-09

Effects of dietary fat levels on growth, serum biochemical indices, glyco-metabolism and antioxidant capacity of common carp

WANG Wen-juan¹, MENG Qian-qian¹, LI Mei-jing^{1,2}, YAO Zu-bing^{1,2}, WANG YU-jiang¹,
WU Man-tang¹, ZHANG Meng-qin¹, WANG Wen-xiu³

(1. College of Fisheries, Southwest University, Rongchang 402460, China; 2. College of Marine Science, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. Shandong Binzhou Animal Science & Veterinary Medicine Academy, Binzhou 256600, China)

Abstract: In order to study the effects of dietary fat levels on growth, serum biochemical indices, activities of glucose metabolic enzymes and antioxidant capacity of common carp, four dietary fat levels (3.68%, 7.60%, 11.52%, 15.44%) were formulated. A 58-day feeding experiment was carried out with (17.91±0.16) g juvenile common carp as the research object. The results showed that with the increase of dietary fat level, the crude fat content of juvenile common carp increased, while the water content decreased. The contents of serum triglyceride, total cholesterol, high-density lipoprotein and low-density lipoprotein increased with the increase of dietary fat level. The activities of 6-phosphofructokinase, pyruvate kinase, lactate dehydrogenase and lactic acid content of juvenile common carp at 15.44% dietary fat level were significantly higher than those of juvenile common carp at 3.68% dietary fat level ($P<0.05$). The catalase activity in liver

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 山东省外专双百计划资助项目 (WST2018014)

作者简介: 王文娟 (1979-), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要从事水产动物营养与饲料研究。(E-mail) wangwenjuan1997@163.com

通讯作者: 王文秀, (E-mail) ww1997@126.com

and pancreas of juvenile common carp at 15.44% dietary fat level was significantly higher than that at other three dietary fat levels ($P<0.05$). Thus, high dietary fat level will lead to the decline of growth performance, affect the body composition and glycolysis, resulting in oxidative stress in common carp.

Key words: juvenile common carp; growth performance; serum biochemical indices; glycometabolism; oxidative stress

脂类是鱼类重要的营养元素,鱼类体内的脂肪不仅具备基本的供能、储能作用,还具有提供必需脂肪酸,溶解脂溶性维生素等多种功能^[1]。鱼类脂肪摄入不足时,必需脂肪酸、脂溶性维生素也会随之缺乏,从而导致鱼类生长迟缓甚至停滞、抗病力低下及代谢紊乱^[2];同时,鱼类将增加对蛋白质饲料的消耗以保证机体能量的供给从而造成蛋白质资源的浪费。因此,适当增加日粮中的脂肪含量,不仅能够满足鱼类对脂类的需要量,节约蛋白质饲料,提高饲料利用率并减少养殖水体中氮的排放,有利于水产养殖业的可持续发展^[3]。

然而,高水平脂肪的摄入会增加动物体内脂质的异常沉积、引发机体肥胖、代谢紊乱和炎症,导致生长受到抑制^[4]。在对人和小鼠的研究中发现,肥胖往往伴随着血糖的升高。目前关于水产动物糖脂代谢的研究大多集中于探究饲料糖类水平对糖代谢、脂代谢或日粮脂肪水平对脂代谢的影响,关于脂肪水平对鱼类糖代谢影响的报道较少。鱼类属于先天性糖尿病体质,高脂肪饲料的摄入量关乎鱼类的健康和生长。在糖脂比对鱼类影响的试验中发现,随着糖脂比的升高,瓦氏黄颡鱼^[5]、暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)^[6]、建鲤(*Cyprinus carpio* var. *jian*)^[7]、吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[8]的肠道淀粉酶活性、血糖水平、血浆胰岛素水平以及肝脏/肝胰脏的糖酵解酶如葡萄糖激酶(*GK*)、磷酸果糖激酶(*PFK*)、丙酮酸激酶(*PK*)活性及*PK* mRNA的表达升高,肠道脂肪酶活性及肝脏糖异生酶如磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶(*PEPCK*)活性下降。在日粮糖类水平相等(粗纤维除外)的情况下,摄食含5%、10%脂肪日粮的大黄鱼肝脏糖酵解酶如*GK*、*PFK*、*PK*及*PEPCK*活性因不同的糖源、糖水平呈现出不同的结果。由此推测,日粮脂类可能是一个次于糖类的影响糖代谢的因素,对于鱼类的生长和健康亦非常重要。因此,本研究以鲤(*Cyprinus carpio*)为试验动物,通过调节日粮中脂肪含量,结合幼鲤生长性能、形体指标、血清生化指标等探讨日粮脂肪水平对鱼类糖代谢及抗氧化能力的影响,为富含脂肪日粮在鱼类上的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

本试验日粮以豆粕和鱼粉为主要蛋白质来源,非转基因大豆油为主要脂肪来源,次粉为主要糖类来源,制备4组不同脂肪水平的饲料,日粮脂肪水平分别为3.68%、7.60%、11.52%及15.44%(表1)。其中,所用氯化胆碱的有效含量为60%。每1 kg预混料提供 V_A 5 100 IU、 V_{D_3} 4 800 IU、 V_E 4.8 mg、 V_{K_3} 0.30 mg、 V_{B_1} 3.00 mg、 V_{B_2} 1.80 mg、 V_{B_6} 1.20 mg、 $V_{B_{12}}$ 0.03 mg、甲硫氨酸 6.00 mg、硫酸铜 1.80 mg、硫酸铁 12.00 mg、硫酸锰 3.60 mg;硫酸锌 6.00 mg;碘化钾 0.60 mg;轻质碳酸钙 0.36 mg。

将豆粕、麸皮等原料粉碎后过60目筛,采用逐级扩大方法混匀,按照配方比例加入豆油和适量水充分混合,用制粒机挤压成直为2 mm的颗粒饲料,在恒温鼓风干燥箱(65℃)烘干后,于-20℃冰箱中保存备用。风干日粮营养成分含量(表2)为实测值。

表1 风干日粮组成

Table 1 Composition of air-dried daily ration

日粮组成	日粮脂肪水平			
	3.68%	7.60%	11.52%	15.44%
鱼粉(%)	24.00	24.00	24.00	24.00
豆粕(%)	33.40	33.40	33.40	33.40
豆油(%)	0.00	4.00	8.00	12.00
次粉(%)	20.00	20.00	20.00	20.00
麸皮(%)	8.20	8.20	8.20	8.20
微晶纤维(%)	12.00	8.00	4.00	0.00
磷酸二氢钙(%)	1.50	1.50	1.50	1.50
氯化胆碱(%)	0.30	0.30	0.30	0.30
预混料(%)	0.60	0.60	0.60	0.60

表2 风干日粮营养成分含量

Table 2 Nutrient content of air-dried daily ration

营养成分	日粮脂肪水平			
	3.68%	7.60%	11.52%	15.44%
粗蛋白(%)	38.30	39.37	38.25	39.13
粗脂肪(%)	3.39	7.17	10.83	14.83
粗灰分(%)	8.41	7.96	7.89	7.98

1.2 试验鱼与饲养管理

试验用鲤幼鱼购买于甘家祠渔场(重庆荣昌, 105.6°E, 29.4°N), 购买的鱼苗经 3% NaCl 溶液消毒后暂养于西南大学水产学院养殖基地水泥池(2.35 m×1.20 m×0.70 m)中, 7 d 后挑选规格相近、健康活泼的幼鱼 300 尾, 每尾(17.90±0.16) g 随机分为 4 组, 每组 3 个重复, 每个重复 25 尾鱼, 养殖于玻璃水族缸(1.10 m×0.40 m×0.40 m)中。每日定时(8:00, 13:00, 18:00)投喂, 待鱼饱食, 清理剩余饵料和粪便。投喂期间观察并记录水温、摄食及生长情况, 微流水养殖, 24 h 持续充氧, 每日换水 1/3。养殖试验期间, 维持养殖水体溶氧量高于 6.5 mg/L, 水温为 25~30 ℃, pH 值为 7.0~7.7, 水体铵态氮浓度低于 0.05 mg/L, 养殖周期为 58 d。

1.3 样品采集及分析方法

1.3.1 样品采集 养殖试验结束后, 禁食 24 h, 统计每个水族缸中所投喂的饲料质量、幼鲤的尾数, 并称取每缸鱼总质量, 用于计算生长性能。每个缸中随机挑选 3 尾鱼, 测量体质量和量取体长; 采用尾静脉采血方式收集血液于离心管中, 静置 2 h, 以 3 000 r/min 离心 10 min, 取血清, 保存备测; 将鱼放在冰盘上解剖, 分离内脏团、肝胰脏以及肠道, 分别称质量并测定肠道长度; 将肝胰脏样品取出, 液氮速冻后保存于-80 ℃冰箱中, 用于测定肝胰脏糖代谢酶活性及抗氧化酶活性; 另取 5 尾鱼剪碎后冻干, 保存于-20 ℃冰箱中以测定鱼体成分。

1.3.2 分析方法 参考张丽英的方法^[9]对饲料常规营养成分及鱼体成分进行测定, 即分别采用 105 ℃烘箱干燥法、半微量凯氏定氮法、鲁氏残留法及马弗炉灰化法测定鱼体水分、粗蛋白、粗脂肪及粗灰分含量。

用日立 7600-110 型全自动生化分析仪测定血清中的总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白(LDL)、高密度脂蛋白(HDL)及葡萄糖(GLU)含量。

取肝胰脏组织块约 0.2 g 于玻璃匀浆器中, 加入 9 倍体积的 0.86% 冷生理盐水, 在冰浴中充分研磨, 制成匀浆液, 将匀浆液移入 1.5 ml 离心管中, 3 000 r/min 冷冻离心 10 min, 取上清液待测。肝胰脏丙酮酸激酶(PK)、乳酸脱氢酶(LDH)、乳酸(LD)含量、超氧化物歧化酶(T-SOD)、过氧化氢酶(CAT)

及谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性及组织蛋白(TP)含量采用南京建成生物公司生产的试剂盒测定; 磷酸果糖激酶(PFK)及己糖激酶(HK)活性采用苏州梦犀生物公司生产的试剂盒测定。

1.4 计算公式

1.4.1 生长指标 生长指标包括增重率(WGR)、特定生长率(SGR)、饲料系数(FCR)、成活率(SR)。

$$WGR = (W_t - W_0) / W_0 \times 100\%$$

$$SGR = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$$

$$FCR = F / (W_t - W_0)$$

$$SR = N_t / N_0 \times 100\%$$

式中: W_t 为终末质量(g); W_0 为初始质量(g); t 为养殖周期(58 d); F 为饲料质量(g); N_t 为终末每缸鱼总数; N_0 为初始每缸鱼总数。

1.4.2 形体指标 形体指标包括脏体比(VSI)、肠长系数(ILI)、肥满度(CF)。

$$VSI = W_v / W \times 100\%$$

$$ILI = L_{vi} / L \times 100\%$$

$$CF = W / L^3 \times 100\%$$

式中: W 为体质量(g); W_v 为内脏团质量(g); L_{vi} 为肠长(cm); L 为体长(cm)。

1.5 统计分析

用 SAS9.4 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 并使用 Duncan's 法进行多重比较, 结果以平均值±标准差表示, $P < 0.05$ 表示显著差异。

2 结果

2.1 日粮脂肪水平对幼鲤生长及形体指标的影响

日粮脂肪水平对饲料系数(FCR)、增重率(WGR)、特定生长率(SGR)无显著影响($P > 0.05$) (表 3)。随着日粮脂肪水平的升高, 饲料系数(FCR)逐渐增加, 但差异不显著($P > 0.05$)。试验期间, 各试验组幼鲤成活率(SR)均为 100%。本试验条件下, 尽管日粮脂肪水平较高的两组幼鲤肥满度(CF)在数值上高于脂肪水平较低的两组幼鲤, 但日粮脂肪水平对幼鲤脏体比(VSI)、肠长系数(ILI)及肥满度(CF)无显著影响($P > 0.05$)。

2.2 日粮脂肪水平对幼鲤鱼体组成的影响

不同日粮脂肪水平对幼鲤粗蛋白含量无显著影响(表 4)。幼鲤水分含量随日粮脂肪水平的升高逐渐降低, 15.44% 日粮脂肪水平幼鲤水分含量(70.29%±1.81%)显著低于其余 3 组($P < 0.05$)。

幼鲤粗脂肪含量随日粮脂肪水平的升高而持续升高,其中,15.44%日粮脂肪水平幼鲤粗脂肪含量显著高于11.52%日粮脂肪水平,11.52%日粮脂肪水平幼鲤粗脂肪含量显著高于3.68%日粮脂肪水平,

15.44%日粮脂肪水平幼鲤粗脂肪含量显著高于其他3个日粮脂肪水平($P<0.05$)。3.68%和7.60%日粮脂肪水平幼鲤粗灰分含量显著高于11.52%日粮脂肪水平($P<0.05$)。

表3 不同日粮脂肪水平的幼鲤生长指标和形体指标

Table 3 Growth and morphometric parameters of juvenile common carp under different dietary fat levels

形体指标	日粮脂肪水平			
	3.68%	7.60%	11.52%	15.44%
初始体质量(g)	17.81±0.05a	17.96±0.04a	18.01±0.34a	17.87±0.02a
终末体质量(g)	64.71±2.85a	64.70±5.05a	64.85±8.70a	59.11±5.74a
增重率(%)	263.29±15.94a	260.27±28.60a	259.49±42.39a	230.80±31.78a
特定增长率(%)	2.22±0.08a	2.21±0.14a	2.20±0.19a	2.06±0.17a
饲料系数	1.25±0.15a	1.31±0.06a	1.49±0.23a	1.66±0.15a
成活率(%)	100.00±0a	100.00±0a	100.00±0a	100.00±0a
脏体比(%)	7.11±0.66a	7.00±1.46a	6.53±0.86a	7.35±0.85a
肠长系数	1.52±0.24a	1.58±0.21a	1.60±0.20a	1.66±0.24a
肥满度(%)	2.45±0.16a	2.49±0.23a	2.61±0.26a	2.59±0.20a

同一行数据后不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。

表4 不同日粮脂肪水平的幼鲤鱼体组成

Table 4 Body composition of juvenile common carp under different dietary fat levels

鱼体组成	日粮脂肪水平			
	3.68%	7.60%	11.52%	15.44%
水分(%)	76.78±0.95a	74.82±0.61a	73.71±2.57a	70.29±1.81b
粗脂肪(%)	5.37±0.34c	7.39±0.55bc	9.13±1.71b	12.19±1.83a
粗蛋白(%)	15.36±0.52a	15.25±0.40a	14.87±0.89a	15.09±0.06a
粗灰分(%)	2.44±0.08a	2.41±0.16a	2.11±0.06b	2.26±0.06ab

同一行数据后不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。

2.3 日粮脂肪水平对幼鲤血清生化指标的影响

随着日粮脂肪水平的提高,幼鲤血清中葡萄糖(GLU)、总胆固醇(TC)及甘油三酯(TG)含量呈现逐渐升高的趋势,但各日粮脂肪水平幼鲤血清中葡萄糖(GLU)含量差异不显著($P>0.05$)(表5)。3.68%日粮脂肪水平幼鲤血清中总胆固醇(TC)含量[(4.41±0.24) mmol/L]显著低于其他3个日粮脂肪水平($P<0.05$),11.52%和15.44%日粮脂肪水平的幼鲤血清中的甘油三酯(TG)含量显著高于7.60%日粮脂肪水平($P<0.05$)。随着日粮脂肪水平升高,幼鲤血清中高密度脂蛋白(HDL)和低密度脂蛋白(LDL)含量表现出升高的趋势,3.68%日粮脂肪水平幼鲤血清中高密度脂蛋白(HDL) [(2.96±

0.16) mmol/L]和低密度脂蛋白(LDL) [(4.41±0.24) mmol/L]含量均显著低于其他3个日粮脂肪水平($P<0.05$)。其中15.44%日粮脂肪水平的幼鲤血清中高密度脂蛋白(HDL)和低密度脂蛋白(LDL)含量均最高,分别为(3.82±0.14) mmol/L和(5.86±0.32) mmol/L。

2.4 日粮脂肪水平对鲤幼鱼肝胰脏糖代谢酶活性的影响

本试验条件下,日粮脂肪水平对幼鲤肝胰脏糖酵解酶活性及乳酸(LD)含量有显著影响($P<0.05$)(表6)。7.60%日粮脂肪水平幼鲤肝胰脏己糖激酶(HK)活性最高,显著高于其他3个日粮脂肪水平($P<0.05$)。随着日粮脂肪水平升高,幼鲤肝胰脏6-磷酸

果糖激酶(PFK)活性升高,3.68%日粮脂肪水平幼鲤肝胰脏 6-磷酸果糖激酶(PFK)活性最低,显著低于 11.52%和 15.44%日粮脂肪水平($P<0.05$)。随着日粮脂肪水平升高,幼鲤肝胰脏丙酮酸激酶(PK)及乳酸脱氢酶(LDH)活性呈现出先降低后升高的趋势。7.60%日粮脂肪水平幼鲤肝胰脏丙酮酸激酶(PK)活性最低,15.44%日粮脂肪水平最高,显著高于其他 3

个日粮脂肪水平($P<0.05$)。7.60%和 11.52%日粮脂肪水平幼鲤肝胰脏乳酸脱氢酶(LDH)活性均显著低于 3.68%日粮脂肪水平,15.44%日粮脂肪水平幼鲤肝胰脏乳酸脱氢酶(LDH)活性显著高于 3.68%日粮脂肪水平。3.68%和 7.60%日粮脂肪水平幼鲤肝胰脏乳酸(LD)含量显著低于 11.52%和 15.44%日粮脂肪水平幼鲤($P<0.05$)。

表 5 不同日粮脂肪水平的幼鲤血清生化指标

Table 5 Serum biochemical indices of juvenile common carp under different dietary fat levels

血清生化指标	日粮脂肪水平			
	3.68%	7.60%	11.52%	15.44%
血糖 (mmol/L)	2.65±0.64a	3.03±0.81a	3.22±0.43a	3.55±0.87a
总胆固醇 (mmol/L)	4.41±0.24b	5.48±0.29a	5.48±0.17a	5.86±0.32a
甘油三酯 (mmol/L)	2.29±0.39ab	2.14±0.17b	2.87±0.22a	2.97±0.11a
高密度脂蛋白 (mmol/L)	2.96±0.16b	3.65±0.21a	3.51±0.11a	3.82±0.14a
低密度脂蛋白 (mmol/L)	4.41±0.24b	5.48±0.29a	5.48±0.17a	5.86±0.32a

同一行数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

表 6 不同日粮脂肪水平的幼鲤肝胰脏糖代谢酶活性和乳酸含量

Table 6 Activities of glucose metabolic enzymes and lactic acid content in liver and pancreas of juvenile common carp under different dietary fat levels

肝胰脏糖代谢酶和乳酸	日粮脂肪水平			
	3.68%	7.60%	11.52%	15.44%
己糖激酶 [nmol/(min·mg)]	2.91±0.60b	8.31±0.84a	4.41±0.40b	4.30±0.85b
6-磷酸果糖激酶[nmol/(min·mg)]	2.90±0.45b	4.86±1.45ab	6.66±0.97a	6.32±1.09a
丙酮酸激酶 (U/g)	133.08±13.40b	96.50±2.44c	124.47±18.08b	169.14±5.43a
乳酸脱氢酶 (KU/g)	14.39±0.88b	10.08±0.46c	9.70±1.42c	21.04±0.28a
乳酸 (mmol/g)	0.68±0.07b	0.61±0.04b	1.02±0.09a	1.06±0.13a

同一行数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.5 日粮脂肪水平对鲤幼鱼肝胰脏抗氧化能力的影响

日粮脂肪水平对肝胰脏抗氧化酶活性存在影响(表 7)。15.44%日粮脂肪水平幼鲤肝胰脏过氧化

氢酶(CAT)活性高于其他 3 个日粮脂肪水平($P<0.05$)。各日粮脂肪水平间幼鲤肝胰脏总超氧化物歧化酶(T-SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性差异不显著($P>0.05$)。

表 7 不同日粮脂肪水平的幼鲤肝胰脏抗氧化酶活性

Table 7 Antioxidant enzymes activities in hepatopancreas of juvenile common carp under different dietary fat levels

肝胰脏抗氧化酶	日粮脂肪水平			
	3.68%	7.60%	11.52%	15.44%
总超氧化物歧化酶 (U/mg)	8.96±1.76a	9.85±2.34a	7.50±1.98a	12.85±1.51a
过氧化氢酶 (U/mg)	21.92±1.16b	19.03±1.24b	20.71±3.75b	28.05±1.84a
谷胱甘肽过氧化物酶 (U/mg)	7.43±2.70a	6.96±1.05a	5.37±0.37a	8.28±0.23a

同一行数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

3 讨论

3.1 日粮脂肪水平对幼鲤生长性能的影响

脂类在鱼、虾类生命代谢过程中具有多种生理功用,是鱼、虾类所必需的营养物质。日粮中脂肪不足会导致机体代谢紊乱,营养缺乏,饲料利用率下降、生长抑制等^[4]。陈云飞^[10]指出适当增加饲料中脂肪含量能有效促进草鱼增重率和特定生长率的提高。在点篮子鱼(*Siganus guttatus*)^[11]、额尔齐斯河银鲫(*Carassius auratus gibelio* Block)^[12]、白甲鱼(*Onychostoma simum*)^[13]、异育银鲫幼鱼(*Carassius auratus gibelio*)^[14]、吉富罗非鱼^[15]的试验中也得到了类似的结果。然而,饲料中过多的脂肪不利于鱼类的生长。李雪菲^[16]、许明珠^[17]等在美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)及拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*)仔蟹的试验中持续增加饲料中的脂肪水平,动物的WGR和SGR降低。关于黄鳝(*Monopterus albus* Zuiew)^[18]、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)^[19]、杂交石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus* × *Epinephelus polyphekadion*)^[20]的研究结果也证实了这一点。本试验中,随着日粮脂肪水平的提高,WGR和SGR下降,FCR上升。然而,付世建等^[21]发现南方鲇的生长性能随饲料脂肪水平的升高而升高,这可能与其所设置的脂肪水平未超出南方鲇的需要量有关。

3.2 日粮脂肪水平对幼鲤形体指标和鱼体组成的影响

鱼类的形体指标能够初步反映鱼体的营养状况和健康状况,包括脏体比、肠长系数、肥满度等。当鱼类从饲料中摄入的脂肪较高时,导致脂肪在腹腔、肝胰脏以及肠道等部位积累^[22]。本试验中,日粮脂肪水平对脏体比、肥满度及肠长系数无显著影响,这与Marins等^[23]在比目鱼(*Hippoglossus hippoglossus* L.)中的试验结果相同。然而,在军曹鱼(*Rachycentron canadum*)^[24]、鳙鱼(*Melanogrammus aeglefinus*)^[25]、吉富罗非鱼^[26]的试验中发现,饲料脂肪水平的升高会显著提升鱼体的脏体比和肥满度。造成这些差异的原因可能是不同种类鱼类脂肪沉积的部位不同。

鱼体的粗脂肪含量是影响鱼肉品质和营养价值的重要指标,也是决定水产品加工性能的关键因素,研究表明,鱼体脂肪含量通常随着饲料脂肪含量的升高而升高^[22]。本试验中,随日粮脂肪水平的

升高,鱼体脂肪含量显著增加,水分含量持续降低,与点篮子鱼^[11]、军曹鱼^[24]、梭鱼(*Chelon haematocheilus*)^[27]、淡水黑鲷(*Hephaestus fuliginosus*)^[28]、春鲤(*Cyprinus longipectoralis*)^[29]及黑尾近红鲷(*Ancherythroculter nigrocauda*)^[30]等的研究结果相似。鉴于形体指标的结果,本试验中,随着日粮脂肪水平的升高,脂肪可能在非内脏部位如肌肉中的沉积增加。高攀等^[12]在关于额尔齐斯河银鲫的研究中也发现日粮脂肪水平对脏体比、肝体比及肥满度没有影响,全鱼及肌肉脂肪含量随日粮脂肪水平的升高显著升高。

3.3 日粮脂肪水平对幼鲤血清生化指标的影响

血清生化指标是反映鱼体生理状况的重要指标,受饲料、环境等多种因素的影响。在大菱鲆(*Psetta maxima*)^[31]、红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)^[32]、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)^[33]、大西洋鲑(*Salmo salar*)^[34]及血鹦鹉(*Vieja synspila* × *Amphilophus citrinellus*)^[35]等鱼的血液指标中发现,当所投喂的饲料脂肪含量升高时,对应的试验鱼血清中TC、TG含量会随之升高,本试验亦如此。体内脂质主要是以血浆脂蛋白的形式运输,其中HDL的作用是将肝脏外的胆固醇输入肝脏进行分解,而LDL的作用正好相反,将内源性胆固醇输送到肝外的各个组织^[36]。本试验中,血清HDL与LDL含量均随日粮脂肪水平的升高而显著升高,与大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[37]、梭鱼^[38]、额尔齐斯河银鲫^[12]的研究结果相似,表明随着日粮脂肪水平的增加,机体脂代谢增强。血糖是机体维持稳态的重要指标之一^[39],受饲料成分、应激反应等多种因素的影响,肌糖原和肝糖原对于维持血糖的平稳起到重要作用。马红娜等^[40]、陆游等^[41]分别以葡萄糖和小麦淀粉作为糖源饲喂大黄鱼,发现在任何糖类水平下,10%日粮脂肪水平与5%日粮脂肪水平的血糖含量差异不显著;在不同糖类水平下,肝糖原和肌糖原含量对日粮脂肪水平的响应不同,例如,当饲料中小麦淀粉或葡萄糖含量为10%和20%时,10%日粮脂肪水平大黄鱼肌糖原含量显著低于5%日粮脂肪水平,当淀粉含量为30%时,10%日粮脂肪水平大黄鱼肌糖原含量又显著高于5%日粮脂肪水平。肝糖原对饲料中葡萄糖水平的响应比淀粉水平更敏感,不同葡萄糖水平,10%日粮脂肪水平大黄鱼肌糖原、肝糖原含量与5%日粮脂肪水平大黄鱼肌糖原、肝

糖原含量差异均显著;而日粮中不同小麦淀粉水平,不同脂肪水平间大黄鱼肝糖原含量差异不显著。本试验次粉含量为 20%,随着日粮脂肪水平的升高,血糖呈现上升趋势,但差异不显著。因此,如果延长饲喂时间或者增加日粮脂肪水平变化的幅度,超出机体对血糖的调节能力,血糖可能会呈现显著性差异。

3.4 日粮脂肪水平对鲤肝胰脏糖代谢酶活性的影响

糖的无氧酵解及有氧氧化、糖异生、磷酸戊糖途径等是鱼类重要的糖代谢途径。*HK*、*PFK*、*PK* 是糖酵解的关键酶。以小麦淀粉为饲料糖源的大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 的试验结果^[41]表明,糖酵解酶、糖异生酶活性与脂肪水平无关。而在本试验中,脂肪水平较高时,鲤肝胰脏 *PFK* 和 *PK* 的活性较高,与翘嘴红鲌 (*Erythrocyprinus ilishaeformis*)^[42] 及以葡萄糖为糖源的大黄鱼的研究结果^[40]相似,这说明饲料脂肪水平对糖酵解有影响,其作用受鱼种类以及饲料中脂肪种类、脂肪水平、糖源种类、糖含量等的影响。同时在本试验中发现,日粮脂肪水平最低时,幼鲤肝胰脏 *PK* 活性较高,与低脂组草鱼^[43]、吉富罗非鱼^[44]糖酵解酶基因表达及酶活性显著高于其他组的试验结果一致。由此可以推断对于一些鱼类,能够通过增强糖酵解供能来适应低脂日粮。在王秋梅等^[44]关于吉富罗非鱼的研究中发现,脂肪含量较高的两组试验鱼肝胰脏 *PFK* 活性较低,可能与该试验设置的脂肪水平较低有关。

在生物体内,*LDH* 的主要作用在于可逆地催化丙酮酸与 LD 之间的转化,参与机体的能量代谢调控。*LDH* 是组织损伤判定的重要指标,当鱼类受到低氧胁迫时,组织中 *LDH* 活性显著升高^[45]。本试验中当日粮脂肪水平为 15.44% 时,鲤肝胰脏 *LDH* 活性显著高于其他 3 个日粮脂肪水平,与西伯利亚杂交鲟 (*Acipenser baerii* Brandt × *A. schrenckii* Brandt)^[46] 血清 *LDH* 活性以及斜带石斑鱼 (*Epinephelus coioides*)^[47] 肝胰脏 *LDH* 活性随饲料脂肪水平升高而升高的试验结果相似。这可能与饲喂高脂肪水平日粮导致动物肝胰脏氧化受损有关^[48]。LD 是糖无氧酵解产物,同时也是供能代谢的重要底物,当肝胰脏无氧代谢能力增强时,LD 累积增加。本试验中,当日粮脂肪水平超过 11.52% 时,鲤肝胰脏 LD 含量显著增加,说明高脂日粮会导致组织无氧酵解增强。

3.5 日粮脂肪水平对鲤肝胰脏抗氧化能力的影响

鱼类的抗氧化系统对鱼体的健康和生长起着重要作用。在抗氧化酶系统中,*SOD*、*CAT* 及 *GSH-Px* 是清除自由基的主要抗氧化酶^[49-51]。*SOD* 的作用是将机体产生的超氧阴离子自由基还原成过氧化氢 (H_2O_2);*CAT* 则是将机体产生的 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2 ; *GSH-Px* 能够将有毒的过氧化物还原成无毒的羟基化合物,保护细胞膜的结构和功能不受过氧化物的损害^[52]。研究发现,过多的饲料脂肪会导致鱼体内脂质氧化产物增加,进而引起抗氧化酶活性升高,以此维持体内氧化与抗氧化的平衡^[53]。本试验中,日粮脂肪水平升高,鲤肝胰脏 *CAT* 酶活力升高,表明鱼体处于氧化应激状态,与朱婷婷等^[54]对俄罗斯鲟 (*Acipenser gueldenstaedtii*) 幼鱼的研究结果一致。随着脂肪水平的升高,褐菖鲉 (*Sebastes smarmoratus*) 肝脏^[55]、胭脂鱼 (*Myxocyprinus asiaticus*) 肝胰脏^[56] 抗氧化酶活性呈先增加后降低趋势,前者丙二醛含量持续增加,后者丙二醛含量呈先降后升的趋势。这说明抗氧化功能的发挥与日粮中的油脂种类及其含量有关,日粮中过高的或过低的脂肪含量均不利于机体的抗氧化功能;在低脂日粮中,以鱼油或鱼粉中的油脂为日粮油脂来源的鱼体抗氧化性能优于以豆油为日粮油脂来源的鱼体。

4 结论

本研究发现,日粮脂肪水平过高会导致幼鲤生长性能下降,影响鱼体组成、血脂含量及糖酵解,造成氧化应激。

参考文献:

- [1] 覃川杰,陈立侨,李二超,等. 饲料脂肪水平对鱼类生长及脂肪代谢的影响[J]. 水产科学,2013,32(8):485-491.
- [2] 徐后国. 饲料脂肪酸对鲈鱼幼鱼生长、健康及脂肪和脂肪酸积累的影响[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
- [3] LÓPEZ L, DURAZO E, VIANA M, et al. Effect of dietary lipid levels on performance, body composition and fatty acid profile of juvenile white seabass, *Atractoscion nobilis*. [J]. Aquaculture, 2009, 289(1):101-105.
- [4] 叶元土. 淡水鱼类营养与饲料存在的主要问题与发展意见[C]//中国水产学会. 中国水产学会全国水产学科前沿与发展战略研讨会论文集. 青岛:中国水产学会,2005:118-128.
- [5] 张世亮,艾庆辉,徐 玮,等. 饲料中糖/脂肪比例对瓦氏黄颡鱼生长、饲料利用、血糖水平和肝胰脏糖酵解酶活力的影响[J]. 水生生物学报,2012,36(3):466-473.

- [6] 刘襄河,叶超霞,沈碧端,等. 饲料中糖/脂肪比对暗纹东方鲀幼鱼生长、血液指标、肝代谢酶活性及 *PEPCK* 基因表达的影响[J]. 水产学报,2014,38(8):1150-1158.
- [7] 王菲,李向飞,李贵锋,等. 不同糖脂比对建鲤幼鱼生长、体组成、消化及糖酵解能力的影响[J]. 水产学报,2015,39(9):1386-1394.
- [8] 杨丽萍,郑文佳,秦超彬,等. 饲料糖脂比对吉富罗非鱼生长、血液指标和肝脏糖代谢关键酶活性及基因表达的影响[J]. 水产学报,2016,40(9):1376-1386.
- [9] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检查技术[M]. 4版. 北京:中国农业大学出版社,2016.
- [10] 陈云飞. 饲料脂肪源和脂肪水平对草鱼幼鱼生长及脂肪代谢的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2017.
- [11] 朱卫. 饲料脂肪水平对点篮子鱼生长性能、营养成分及消化酶活性的影响[D]. 上海:上海海洋大学,2013.
- [12] 高攀,李晓东,焦飞,等. 饲料脂肪源对大规格额尔齐斯河银鲤鱼种生长性能、体成分及血清生化指标的影响[J]. 西北农业学报,2021,30(9):1279-1289.
- [13] 向泉,周兴华,陈建,等. 饲料脂肪水平对白甲鱼幼鱼生长性能、体组成和血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报,2013,25(8):1805-1816.
- [14] 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.
- [15] 石柱城,董晓慧,陈刚,等. 饲料脂肪水平对吉富罗非鱼生长性能及其在低温应激下血清生化指标和肝脏脂肪酸组成的影响[J]. 动物营养学报,2012,24(11):2154-2164.
- [16] 李雪菲,田丽霞,牛津,等. 饲料脂肪水平对美国红鱼生长性能、体组成和肝脏组织结构的影响[J]. 动物营养学报,2015,27(11):3448-3456.
- [17] 许明珠,张琴,董兰芳,等. 饲料脂肪水平对拟穴青蟹仔蟹生长性能、体组成及消化酶活性的影响[J]. 动物营养学报,2017,29(3):987-994.
- [18] 郭枫. 饲料脂肪源和脂肪水平对黄鳝生长和代谢的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2019.
- [19] 蒋阳阳. 不同蛋白质、脂肪和糖水平对团头鲂幼鱼生长性能、体组成和生理生化指标的影响[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [20] 谢瑞涛. 饲料脂肪与蛋白质对杂交石斑鱼(褐点石斑鱼♀×清水石斑鱼♂)生长及代谢的影响[D]. 湛江:广东海洋大学,2021.
- [21] 付世建,谢小军,张文兵,等. 南方鲇的营养学研究:Ⅲ. 饲料脂肪对蛋白质的节约效应[J]. 水生生物学报,2001,25(1):70-75.
- [22] 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]. Aquaculture Research,2001,32(S1):225-234.
- [23] MARINS D A, VALENTE L M P, LALL S P. Effects of dietary lipid level on growth and lipid utilization by juvenile Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.) [J]. Aquaculture,2007,263(1):150-158.
- [24] 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(1/4):439-447.
- [25] HANSEN A C, ROSEN LUND G, KARLSEN O, 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.
- [26] 刘永强. 梯度脂质对吉富罗非鱼幼鱼生长、抗氧化、免疫、脂肪酸代谢及相关基因表达的影响[D]. 南宁:广西大学,2021.
- [27] 张春暖,王爱民,刘文斌,等. 饲料脂肪水平对梭鱼生长、营养物质消化及体组成的影响[J]. 江苏农业学报,2012,28(5):1088-1095.
- [28] 宋理平,韩勃,王爱英,等. 脂肪水平对淡水黑鲟生长及体成分的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版)农学卷,2010,7(1):27-31.
- [29] 涂永芹,韩冬,朱晓鸣,等. 饲料中不同蛋白、脂肪水平对春鲤生长、饲料利用和体成分的影响[J]. 水生生物学报,2012,36(5):843-850.
- [30] 李伟东,黄峰,王贵英,等. 饲料脂肪水平对黑尾近红鲷生长性能及鱼体成分的影响[J]. 粮食与饲料工业,2014(11):56-60.
- [31] 苗淑彦,苗惠君,聂琴,等. 饲料中不同种类的碳水化合物对大菱鲆生长性能和代谢反应的影响[J]. 水产学报,2013,37(6):910-919.
- [32] KIKUCHI K, FURUTA T, IWATA N, et al. Effect of dietary lipid levels on the growth, feed utilization, body composition and blood characteristics of tiger puffer *Takifugu rubripes* [J]. Aquaculture,2009,298(1):111-117.
- [33] LI X F, LIU W B, JIANG Y Y, et al. Effects of dietary protein and lipid levels in practical diets on growth performance and body composition of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) fingerlings [J]. Aquaculture,2010,303(1/4):65-70.
- [34] HAMRE K, CHRISTIANSEN R, WAAGB R, et al. Antioxidant vitamins, minerals and lipid levels in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*): Effects on growth performance and fillet quality [J]. Aquaculture Nutrition,2004,10(2):113-123.
- [35] 邬国强,汪学杰,牟希东,等. 饲料脂肪水平对血鸚鵡鱼吸收虾青素效果、生长性能和血清生化指标的影响[J]. 海洋渔业,2022,44(1):67-77.
- [36] 周顺伍. 动物生物化学[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [37] 朱婷婷,金敏,孙蓬,等. 饲料脂肪水平对大口黑鲈形体指标、组织脂肪酸组成、血清生化指标及肝脏抗氧化性能的影响[J]. 动物营养学报,2018,30(1):126-137.
- [38] 张春暖,王爱民,刘文斌,等. 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[J]. 中国水产科学,2013,20(1):108-115.

- [39] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [40] 马红娜, 周飘苹, 陆游, 等. 不同脂肪和葡萄糖水平对大黄鱼生长性能、肝脏糖酵解和糖异生关键酶活性的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, 28(10): 3110-3122.
- [41] 陆游, 周飘苹, 袁野, 等. 不同小麦淀粉和脂肪水平对大黄鱼的生长性能、饲料利用及糖代谢关键酶活力的影响 [J]. 水产学报, 2017, 41(2): 297-310.
- [42] 戈贤平. 不同糖、脂含量日粮对翘嘴红鲌相关糖代谢酶的调节研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [43] 李艾璇. 草鱼对高脂、低脂摄入的代谢适应策略及鳕鱼瘦素的功能初探 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [44] 王秋梅, 李英, 张新党, 等. 饲料可消化蛋白和脂肪水平对吉富罗非鱼鱼种生长、物质代谢和抗氧化功能的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(2): 268-282.
- [45] 郭志雄, 曾泽乾, 黄建盛, 等. 急性低氧胁迫对大规格军曹鱼幼鱼肝脏氧化应激、能量利用及糖代谢的影响 [J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(3): 134-140.
- [46] 邢薇, 郁欢欢, 于凤祥, 等. 饲料脂肪水平对杂交鲟幼鱼生长、饲料消化率、抗氧化水平和肌肉脂肪酸组成的影响 [J]. 水生生物学报, 2021, 45(2): 250-258.
- [47] 董晓慧, 杨俊江, 谭北平, 等. 幼鱼和养成阶段斜带石斑鱼对饲料中脂肪的需要量 [J]. 动物营养学报, 2015, 27(1): 133-146.
- [48] XIAO A, WU T Y, ZHOU X Q, et al. A new strategy: dietary lipids protected the liver from hypoxia injury in multiple ways in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Aquaculture, 2022, 560: 738523.
- [49] 李彦洁, 马丽, 周丽亚, 等. 茶树菇非特异性过氧化酶的研究进展 [J]. 生物加工过程, 2023, 21(2): 164-175.
- [50] 赵璐, 夏玲珍, 储建林, 等. 人参皂苷的生物法制备及研究进展 [J]. 生物加工过程, 2021, 19(5): 463-471.
- [51] SHEIKHZADEH N, TAYEFI-NASRABADI H, OUSHANI A K, et al. Effects of haematococcus pluvialis supplementation on antioxidant system and metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2012, 38(2): 413-419.
- [52] 彭伟. 四逆汤中药味配伍前后药效成分变化规律及药效差异研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2015.
- [53] 孔龙, 邹琦, 程时焰, 等. 共轭亚油酸对草鱼肝脏和肌肉组织的细胞学形态、抗氧化能力以及脂肪代谢相关基因表达的影响 [J]. 水生生物学报, 2019, 43(4): 708-722.
- [54] 朱婷婷, 李琦, 朱浩拥, 等. 饲料脂肪水平对俄罗斯鲟幼鱼生长、血液生化指标及抗氧化性能的影响 [J]. 海洋渔业, 2017, 39(1): 58-67.
- [55] 施兆鸿, 岳彦峰, 彭士明, 等. 饲料脂肪水平对褐菖鲉血清生化指标、免疫及抗氧化酶活力的影响 [J]. 中国水产科学, 2013, 20(1): 101-107.
- [56] 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, 40(5): 47-53.

(责任编辑: 成纾寒)