

饲料脂肪水平对匙吻鲟生长、体组成、消化酶活性、血清生化及抗氧化性能的影响

刘阳洋¹, 于海波¹, 武文一¹, 钟明智¹, 邢君霞¹,
周继术¹, 吉红^{1*}, 薛敏²

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业科学院饲料研究所, 北京 100081)

摘要: 为探讨饲料脂肪水平对匙吻鲟生长、体组成、消化酶活性、血清生化指标、抗氧化性能的影响, 将鱼油与豆油等比例混合作为脂肪源, 配制成脂肪水平分别为3.01%、5.12%、7.14%、9.35%和11.64%的5种等氮膨化实验饲料, 将270尾匙吻鲟[初始体质量(81.38±0.14)g]分为5组, 每组3个重复, 每个重复18尾鱼, 在室外养殖系统微流水养殖56 d。结果显示: ①随着饲料脂肪水平的升高, 实验鱼增重率(WGR)、特定生长率(SGR)、饲料转化率、蛋白质效率(PER)、肝体比(HSI)及肥满度(CF)均呈现先升高后下降的趋势, 回归分析确定, 当SGR达到最大值时, 饲料脂肪水平为7.88%; 当PER达到最大值时, 饲料脂肪水平为9.47%; ②实验鱼肌肉、肝脏粗脂肪含量随饲料脂肪水平上升而上升, 11.64%组显著高于3.01%、5.12%和7.14%组, 全鱼及肌肉粗蛋白含量随饲料脂肪水平增加呈上升趋势, 3.01%组显著低于其他组, 7.14%、9.35%组之间没有显著性差异; ③实验鱼肌肉和肝脏主要脂肪酸组成与饲料脂肪酸组成相关, 随着饲料脂肪水平的升高, 肌肉和肝脏中n-6多不饱和脂肪酸(n-6 PUFA)比例升高, n-3/n-6降低, 肝脏中饱和脂肪酸(SFA, C16:0、C18:0)随着饲料脂肪水平上升而下降; 单不饱和脂肪酸C18:1n-9呈先上升后下降趋势; 肌肉和肝脏脂肪酸组成中, 组间n-3高不饱和脂肪酸(n-3 HUFA)、n-3 PUFA比例没有显著性差异; ④7.14%组肠蛋白酶活性显著高于9.35%组, 肝脏淀粉酶活性在脂肪水平7.14%以上组趋于稳定, 肝脏蛋白酶和脂肪酶活性在组间没有显著性差异; ⑤血清总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)及球蛋白(GLOB)浓度随饲料脂肪水平升高呈上升趋势, 血清总胆固醇(TC)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)浓度11.64%组显著高于3.01%组, 谷丙转氨酶(ALT)和谷草转氨酶(AST)活性未受到饲料脂肪水平的影响; ⑥饲料脂肪水平的上升可以显著提高血清超氧化物歧化酶(SOD)活性, 回归分析得出当SOD活性达到最大值时, 饲料脂肪水平为9.69%; 但对谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性、丙二醛(MDA)含量没有显著影响; 肝脏SOD活性11.64%组显著低于其他各组, GSH-Px活性9.35%组显著高于3.01%、5.12%、7.14%组, 与11.64%组没有显著性差异, GSH、MDA含量在组间没有显著性差异。通过对饲喂不同脂肪水平饲料实验鱼生长、饲料利用率、鱼体组成、消化酶活性及鱼体健康等方面指标综合分析, 认为本实验条件下, 匙吻鲟适宜脂肪水平为7.88%~9.69%。

关键词: 匙吻鲟; 脂肪水平; 生长; 体组成; 消化酶活性; 血清生化指标; 抗氧化性能
中图分类号: S 963 **文献标志码:** A

收稿日期: 2018-01-14 修回日期: 2018-03-19

资助项目: 陕西省科技统筹创新项目(2015KTTSNY01-05)

通信作者: 吉红, E-mail: jihong@nwsuaf.edu.cn

匙吻鲟(*Polyodon spathula*)是隶属于鲟形目(Acipenseriformes)匙吻鲟科(Polyodontidae)的滤食性淡水鱼类,为现存匙吻鲟科仅有的2个物种之一^[1-2]。匙吻鲟原产于北美密西西比河和密苏里河流域,常年生活在内陆的江河、湖泊及池塘中。该鱼肉质细嫩、味道鲜美,生长迅速,性情温顺,食物链短,且易养易捕,近年来我国许多地区已经开展匙吻鲟的养殖生产^[3]。有关匙吻鲟养殖的研究主要集中于生物学特性及生长规律、养殖及繁殖技术、消化率及消化酶、肌肉品质改善及微生态制剂对生长的影响等方面^[4-5],有关其营养需求的研究报道较少。Mims等^[6]认为池塘养殖匙吻鲟,摄食鲑类的配合饲料与摄食浮游动物相比,肥满度较为接近,但肌肉和腹部脂肪含量相对较高,匙吻鲟获得的能量超过了自身需求,匙吻鲟的天然饵料浮游动物的蛋白质水平和脂肪水平分别为65%和8.85%^[7]。Onders等^[8]研究表明,匙吻鲟摄食鳕类饲料(蛋白质水平45%,脂肪水平16%)和鲑类饲料(蛋白质水平32%,脂肪水平4.5%)对其存活和生长没有显著影响。此外有研究表明,鲟具有较高的脂肪酶活性,能有效地利用饲料脂肪,而不同种类和规格的鲟对饲料脂肪的需求量不同^[9]。

脂类为鱼类生命活动提供能量,同时为其生长发育提供必需脂肪酸。适量的脂类供应可以提高鱼类的生长速率和饲料利用率。大多数鱼类对脂肪利用能力较强,摄入的脂肪用于鱼体增重及分解供能的总利用率达90%以上,脂肪的消化能和代谢能转化为净能的效率比蛋白质和碳水化合物高5%~10%,因此脂肪是鱼类最佳的能量来源^[10]。饲料中脂肪含量适宜时,鱼类能够充分利用脂肪。但是当饲料中脂肪添加量不足时,会影响其正常的生长和发育,同时也会造成鱼体脂溶性维生素的缺乏;当饲料脂肪添加量过高时,会造成鱼体内脂肪堆积,导致鱼肉品质下降,而且会增加鱼类疾病的发生概率如肝脏病变,另外过高的脂肪也容易造成饲料氧化变质,不利于饲料的储存与加工^[11-14]。

本实验采用梯度法,旨在探讨饲料脂肪水平对匙吻鲟幼鱼生长、生物学性状、体组成、消化酶活性、血清生化指标以及肝脏抗氧化性能的影响,为确定匙吻鲟配合饲料的营养标准和设置合理的饲料脂肪水平提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

以鱼粉为主要蛋白源,鱼油与豆油1:1混合作为脂肪源,配制5个不同脂肪水平的等氮饲料^[15],饲料粗脂肪实测值分别为3.01%、5.12%、7.14%、9.35%和11.64%,所有原料粉碎后过80目筛,按配比称量后,加工成直径为3 mm的浮性膨化饲料,晾干,-20 °C冰箱保存备用。饲料配方和营养组成见表1,饲料脂肪酸组成见表2。

1.2 实验鱼与饲养管理

养殖实验在西北农林科技大学安康水产实验示范站室外养殖系统进行。实验鱼为来自安康水产实验示范站人工繁殖的同一批次鱼苗,实验前将实验鱼在室外8个水泥池(3.54 m×4.42 m×0.90 m)中进行2周的驯养,实验池中间用隔网隔开,上面架设遮阳网,控制水深0.60 m左右,水体积为9.39 m³。驯养期间投喂粗蛋白水平约42%、脂肪水平≥3%的商品膨化饲料,驯化结束后,挑选大小均匀、健康、体质量为(81.38±0.14)g的匙吻鲟,随机分为5组,每组3个重复,每个重复18尾鱼,停食24 h正式开始实验,每组随机分配,分别投喂5组实验饲料56 d。

实验期间每天饱食投喂3次(19:00、23:00和05:00)。每次投喂1 h后,捞取残饵并计数,计算残饵量。实验用水为曝气后的井水,微流水养殖,每周清理1次池底。每日监测水温、水质,并观察实验鱼的摄食行为和死亡数量等。养殖期间水温20.5~26.0 °C,pH 7.8~8.2,溶解氧5~6 mg/L,氨氮<0.1 mg/L,亚硝酸盐<0.01 mg/L,硫化物<0.05 mg/L。

1.3 样品采集

养殖实验开始前一天随机抽取6尾鱼,测定体质量、体长、全长,并留作初始样本,测定体组成。

养殖实验结束,停食24 h后,所有实验鱼测量体质量、体长、全长等指标,计算增重率、特定增长率、肥满度等参数。每个重复随机抽取2尾鱼用作全鱼样品,再随机抽取6尾鱼尾静脉采血,4 °C冰箱静置12 h,4 °C离心(4 000 r/min,10 min),上清液先冻存于液氮中,后转-80 °C冰箱保存,用作血清生化指标及抗氧化酶活性测

表 1 饲料配方及营养组成 (风干基础)
Tab. 1 Formulation and nutrient composition of the diets (air-dry basis)

项目 items	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
原料 ingredients					
鱼粉 fish meal	36.40	36.40	36.40	36.40	36.40
鱼油 fish oil	0.50	1.50	2.50	3.50	4.50
豆油 soybean oil	0.50	1.50	2.50	3.50	4.50
豆粕 soybean meal	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
菜粕 rapeseed meal	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
小麦粉 wheat meal	22.40	22.40	22.40	22.40	22.40
纤维素 cellulose ¹	8.08	6.08	4.08	2.08	0.08
抗氧化剂 BHT	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
鲟预混料 premix ²	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
三氧化二钇 Y ₂ O ₃	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
氯化胆碱 choline chloride	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
合计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 nutrient levels³					
粗脂肪 crude lipid	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
粗蛋白 crude protein	41.53	41.47	41.18	41.42	41.15
水分 moisture	10.99	10.20	10.30	10.02	10.28
粗灰分 crude ash	8.03	7.84	7.89	7.99	7.98
蛋白能量比 P/E	23.74	22.89	22.24	21.75	21.12

注: 1. 使用的纤维素是微晶纤维素。2. 鲟预混料为每千克饲料提供(g/kg): 维生素A 20.1; 维生素D 0.405; 维生素E 7.4; 维生素K₃ 0.34; 维生素B₁ 0.67; 维生素B₂ 1; 维生素B₆ 0.8; 维生素B₁₂ 0.001 4; 维生素C 10; D-泛酸 2.65; 叶酸 0.33; 烟酰胺 5.35; 氯化胆碱 35; 生物素 0.034; 肌醇 8; 铁 14; 五水硫酸铜 0.35; 锌 4; 锰 0.001 4; 镁 10; 钴 0.03; 碘 0.04; 硒 0.035。3. 蛋白能量比为计算值, 其余为实测值

Notes: 1. The cellulose used was microcrystalline cellulose. 2. Sturgeon premix provided the following per kg of diets(g/kg): vitamin A 20.1; vitamin D 0.405; vitamin E 7.4; vitamin K₃ 0.34; vitamin B₁ 0.67; vitamin B₂ 1; vitamin B₆ 0.8; vitamin B₁₂ 0.001 4; vitamin C 10; D-pantothenic acid 2.65; folic acid 0.33; nicotinamide 5.35; choline chloride 35; biotin 0.034; inositol 8; Fe 14; CuSO₄·5H₂O 0.35; Zn 4; Mn 0.001 4; Mg 10; Co 0.03; I 0.04; Se 0.035. 3. P/E was a calculated value and others were measured values

定; 冰盘上解剖取内脏团, 分离肝脏、肾、脾及肠道, 称重, 计算脏器比、肝体比、肠体比, 并取肌肉、肝胰脏于-20 °C冰箱保存, 用作体组成分析。

随后, 每个重复随机抽取6尾鱼, 解剖取背部两侧肌肉、肝胰脏、肠道、胃、肾、脾先冻存于液氮中, 后转-80 °C冰箱保存, 用作消化酶及肝脏抗氧化酶活性的测定。

1.4 样品测定

饲料、组织及全鱼的常规营养成分中水分

含量采用105 °C烘干法测定; 粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定; 粗脂肪含量采用索氏抽提法测定; 粗灰分含量采用550 °C马弗炉灼烧法测定。

脂肪酸测定分析过程中, 脂肪提取参照Folch^[16]的方法。称取饲料或组织5~10 g于50 mL离心管, 加入氯仿-甲醇(体积比2:1)溶液20 mL, 高速匀浆, 静置2 h, 再用定量滤纸过滤。然后加入4 mL蒸馏水, 3 000 r/min离心5 min, 弃上清液, 下层40 °C水浴蒸干。油脂的皂化及甲酯化参照Christie^[17]的方法。加入1 mL正己烷(色谱

表 2 实验饲料脂肪酸组成 (占总脂肪酸的百分比)
 Tab. 2 Fatty acid composition of experimental diets (percentage of total fatty acids) %

脂肪酸 fatty acid	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
C14:0	4.17	4.14	3.86	4.09	4.30
C16:0	17.91	17.96	17.74	17.93	17.33
C16:1	4.48	4.92	4.36	4.43	4.42
C18:0	4.17	4.32	4.61	4.74	4.56
C18:1n-9	26.72	26.42	25.70	25.52	26.55
C18:2n-6	19.11	21.41	24.41	24.76	26.09
C18:3n-6	0.25	0.25	0.31	0.35	0.36
C18:3n-3	5.41	4.42	3.65	3.60	2.96
C20:3n-6	1.90	1.93	2.01	1.83	1.58
C20:3n-3	4.06	2.73	2.40	2.63	1.95
C20:4n-6	0.76	0.65	0.74	0.65	1.04
C20:5n-3	0.53	0.62	0.99	0.74	0.78
C22:6n-3	11.08	10.83	9.88	9.38	8.79
SFA ¹	26.46	26.63	26.41	26.99	26.41
MUFA ²	31.40	31.56	30.23	30.12	31.16
n-6 PUFA	22.09	24.31	27.57	27.69	29.20
n-3 PUFA	21.22	18.67	16.98	16.41	14.51
PUFA ³	44.41	44.05	45.70	45.19	44.72
n-3/n-6	0.96	0.77	0.62	0.60	0.50
n-3 HUFA	15.71	14.20	13.29	12.77	11.52
HUFA ⁴	18.42	16.81	16.07	15.28	14.17

注: 1. 饱和脂肪酸。2. 单不饱和脂肪酸。3. 多不饱和脂肪酸。4. 高不饱和脂肪酸。下同

Notes: 1. SFA, saturated fatty acids. 2. MUFA, monounsaturated fatty acid. 3. PUFA, polyunsaturated fatty acid. 4. HUFA, highly unsaturated fatty acid. The same below

纯), 再加入 1 mL KOH-甲醇溶液(0.4 mol/L), 进行 30 min 的甲酯化。最后加入 2 mL 去离子水, 待分层后提取上层溶液-20 °C 保存。样品皂化甲酯化后, 直接上气相色谱质谱仪进行分析。脂肪酸组成使用气相色谱仪(Agilent 7820a, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)进行测定。脂肪酸甲酯通过与脂肪酸甲酯混合标准品(47015-U, Sigma-Aldrich, USA)进行比较鉴定。测定前取 20 μL 样品与 5 μL 十七烷酸甲酯(10 mg/mL, H4515, Sigma-Aldrich, USA)混匀, 然后取 1 μL 混合物上机检测。每个样品测 3 次。脂肪酸组成的相对值分析按面积归一化法计算, 以总脂肪酸的百分

比形式呈现。

血清生化指标 总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、球蛋白(GLOB)、白球比(A/G)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、葡萄糖(GLU)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)的浓度采用全自动生化分析仪(日立 7180)测定。

消化酶 肠蛋白酶(enteric protease)、肝脏蛋白酶(hepatic protease)、肝脏脂肪酶(lipase)、肝脏淀粉酶(α-amylase)的活性使用南京建成生物工程研究所试剂盒测定, 蛋白质浓度用考马斯亮蓝染色法进行测定。

血清、肝脏抗氧化指标 超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、谷胱甘肽(GSH)含量、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性及丙二醛(MDA)含量使用南京建成生物工程研究所试剂盒测定。

1.5 统计分析

各参数按下列公式计算:

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

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, %)= $100 \times F / (TW_t - TW_0)$;

蛋白质效率(protein efficiency ratio, PER, %)= $100 \times (TW_t - TW_0) / (F \times P_f)$;

蛋白质沉积率(protein productive value, PPV, %)= $100 \times (TW_t \times CP_t - TW_0 \times CP_0) / (F \times P_f)$

脂肪沉积率(lipid productive value, LPV, %)= $100 \times (TW_t \times CL_t - TW_0 \times CL_0) / (F \times L_f)$

肝体比(hepatosomatic index, HSI, %)= $100 \times (W_L / W_t)$;

脏体比(viscerosomatic index, VSI, %)= $100 \times (W_C - W_L) / W_t$;

肠体比(intestine index, ISI, %)= $100 \times W_I / W_t$;

鱼体肥满度(condition factor, CF, g/cm³)= $100 \times W_t / L_b^3$;

式中, N_t 为终末尾数, N_0 为初始尾数, W_t 为终末鱼体质量(g), W_0 为初始鱼体质量(g), TW_t 为实验结束时鱼体总重, TW_0 为实验开始时鱼体总重, F 为摄食量(g), t 为饲养天数(d), P_f 为饲料蛋白质含量(%), L_f 为饲料脂肪含量(%), CP_t 为实验结束时全鱼粗蛋白含量, CP_0 为实验开始时全鱼粗蛋白含量, CL_t 为实验结束时全鱼粗脂肪含量, CL_0 为实验开始时全鱼粗脂肪含量, W_L 为肝脏重量, W_C 为胴体质量, W_I 为肠道重量, L_b 为体长。

实验所得数据采用SPSS 22.0软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 采用Duncan氏多重比较来检验实验处理均值间的差异显著性, 当 $P < 0.05$ 时表示均值间差异显著。所有数据以平均值 \pm 标准差(mean \pm SD)表示。参考Safari等^[18]、颀江等^[19]的回归分析方法对匙吻鲟生长、饲料利用以及抗氧化性能等部分指标进行分析。

2 结果

2.1 饲料脂肪水平对匙吻鲟生长性能和生物学性状的影响

各组存活率均为100%, 7.14%、9.35%组的FBW、WGR及SGR均显著高于其他各组($P < 0.05$) (表3)。以匙吻鲟的SGR为因变量(Y), 饲料脂肪水平作为自变量(X)的二次回归方程为 $Y = -0.0295X^2 + 0.4652X + 0.3206$ ($R^2 = 0.9912$), 通过分析得出SGR最大时, 饲料脂肪水平为7.88%(图1)。

饲料系数(FCR)9.35%组显著低于3.01%组($P < 0.05$); PER随着饲料脂肪水平的升高呈先上升后下降趋势, 9.35%组显著高于3.01%组($P < 0.05$), 其他各组间无显著性差异; 11.64%组PPV显著高于3.01%组, 但与其他组无显著性差异($P > 0.05$); 除3.01%组, 其余组的LPV随饲料脂肪水平的升高呈下降趋势($P < 0.05$)。以匙吻鲟PER为因变量(Y), 以饲料脂肪水平作为自变量(X), 运用折线回归分析得出 $Y = -0.0618X + 2.7648$, $R^2 = 0.9378$ 与 $Y = -0.0830X + 4.1358$, $R^2 = 1$ 的交点为9.47%, 此时PER最大(图2)。

3.01%组HSI显著低于5.12%、7.14%、9.35%组($P < 0.05$), 与11.64%组无显著性差异; 11.64%组ISI显著低于其他各组($P < 0.05$); 饲料脂肪水平对VSI没有显著影响; 5.12%、7.14%、9.35%组CF显著高于其他组($P < 0.05$) (表3)。

2.2 饲料脂肪水平对匙吻鲟体组成的影响

实验匙吻鲟初始全鱼的粗蛋白含量为9.99%, 粗脂肪含量为5.12%, 粗灰分含量为1.72%, 水分含量为69.85%, 除水分外, 其余指标与实验结束后3.01%组全鱼体组成比较接近。全鱼和肌肉粗脂肪含量随着饲料脂肪水平的增加呈明显的升高趋势, 11.64%组显著高于3.01%、5.12%、7.14%组($P < 0.05$) (表4)。饲料脂肪水平的增加也显著影响了全鱼和肌肉的粗蛋白含量, 11.64%组全鱼粗蛋白含量显著高于其他组, 3.01%组肌肉粗蛋白含量显著低于其他组($P < 0.05$); 但对于肝脏粗蛋白含量没有显著性影响。全鱼粗灰分含量呈先下降后上升趋势($P < 0.05$), 其中3.01%组显著高于5.12%、7.14%、9.35%组($P < 0.05$), 与11.64%组无显著性差异; 9.35%组肌肉粗灰分含量显著低于3.01%组和11.64%组; 肝脏粗灰分随饲料脂肪水平的升高呈下降趋势。全鱼水分含量随着饲料脂肪水平的

表 3 饲料脂肪水平对匙吻鲟生长性能和生物学性状的影响

Tab. 3 Effects of dietary lipid level on growth performance and biological characteristics of *P. spathula*

项目 items	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
初始均重/g IBW	81.25±0.09	81.43±0.15	81.42±0.16	81.41±0.15	81.41±0.15
终末均重/g FBW	177.51±7.83 ^d	233.33±5.52 ^b	252.63±1.57 ^a	255.24±1.01 ^a	207.89±8.60 ^c
存活率/% SR	100	100	100	100	100
增重率/% WGR	118.48±9.71 ^d	186.56±7.17 ^b	210.27±2.35 ^a	213.53±1.58 ^a	155.34±10.19 ^c
特定生长率/(%/d) SGR	1.45±0.08 ^d	1.95±0.05 ^b	2.10±0.01 ^a	2.12±0.01 ^a	1.73±0.07 ^c
饲料系数/% FCR	0.81±0.06 ^a	0.80±0.03 ^{ab}	0.76±0.01 ^{ab}	0.72±0.00 ^b	0.77±0.05 ^{ab}
蛋白质效率/% PER	2.99±0.23 ^b	3.02±0.11 ^{ab}	3.21±0.04 ^{ab}	3.36±0.02 ^a	3.17±0.21 ^{ab}
蛋白质沉积率/% PPV	29.95±9.51 ^b	31.57±1.14 ^{ab}	33.04±3.40 ^{ab}	36.65±2.83 ^{ab}	42.90±4.22 ^a
脂肪沉积率/% LPV	154.41±14.23 ^b	184.90±5.86 ^a	134.33±1.34 ^c	128.90±0.52 ^c	108.07±5.76 ^d
肝体比/% HSI	1.62±0.12 ^b	1.89±0.10 ^a	1.95±0.10 ^a	1.90±0.11 ^a	1.79±0.10 ^{ab}
肠体比/% ISI	1.12±0.06 ^a	1.22±0.10 ^a	1.26±0.03 ^a	1.17±0.07 ^a	0.96±0.02 ^b
脏体比/% VSI	12.05±1.78	11.97±0.55	12.72±0.21	12.17±0.32	11.04±0.12
肥满度/(g/cm ³) CF	0.38±0.01 ^c	0.41±0.01 ^b	0.41±0.01 ^{ab}	0.43±0.01 ^a	0.40±0.01 ^{bc}

注: 同列标注不同字母表示差异显著($P<0.05$), 下同

Notes: the same column marked with different letters showed significant difference ($P<0.05$), the same below

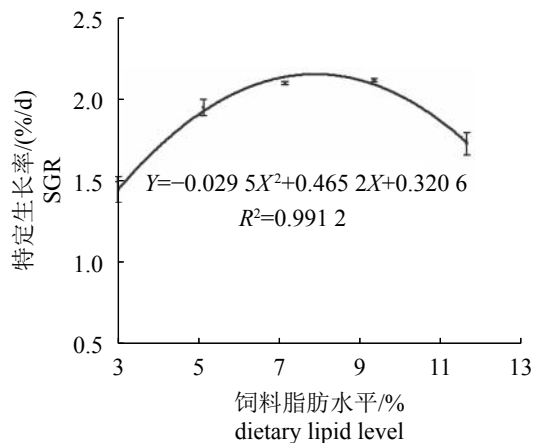


图 1 饲料脂肪水平与匙吻鲟特定生长率之间的二次回归分析

Fig. 1 Quadratic regression analysis between specific growth rate and dietary lipid levels for *P. spathula*

上升呈下降趋势($P<0.05$), 但肌肉和肝脏的水分含量各组间没有显著性差异($P>0.05$)。

2.3 饲料脂肪水平对匙吻鲟肌肉和肝脏脂肪酸组成的影响

匙吻鲟肌肉中部分脂肪酸组成与饲料中

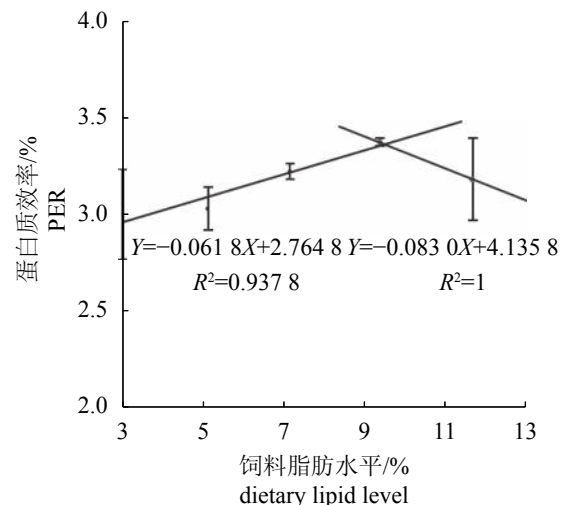


图 2 饲料脂肪水平与匙吻鲟蛋白质效率之间的回归分析

Fig. 2 Regression analysis between protein efficiency ratio and dietary lipid levels for *P. spathula*

脂肪酸组成相关, 随着饲料脂肪水平的提高, 饲料和肌肉中均呈现n-6 PUFA比例升高, 而n-3/n-6降低的趋势(表5)。饲料中n-3 HUFA、n-3 PUFA比例随饲料脂肪水平上升呈下降趋势, 肌肉脂肪酸组成中各组间没有显著性差异($P>0.05$)。

表 4 饲料脂肪水平对匙吻鲟体组成的影响(湿重基础)
 Tab. 4 Effects of dietary lipid level on body composition of *P. spathula* (wet weight) %

项目 items	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
全鱼 whole body composition					
粗脂肪 crude lipid	4.37±0.95 ^c	6.70±0.33 ^b	6.56±0.60 ^b	7.53±0.50 ^{ab}	7.87±1.24 ^a
粗蛋白 crude protein	9.96±1.40 ^b	10.29±0.52 ^b	10.18±0.70 ^b	10.62±0.83 ^b	12.17±0.97 ^a
粗灰分 crude ash	2.10±0.23 ^a	1.76±0.08 ^{bc}	1.61±0.18 ^c	1.45±0.09 ^c	1.95±0.30 ^{ab}
水分 moisture	82.76±3.43 ^a	73.85±3.46 ^b	71.20±0.91 ^{bc}	66.79±1.13 ^c	67.53±2.17 ^c
肌肉 muscle composition					
粗脂肪 crude lipid	6.35±1.10 ^b	7.40±0.82 ^b	7.06±0.96 ^b	9.77±1.17 ^a	9.27±0.76 ^a
粗蛋白 crude protein	18.67±0.98 ^c	22.45±1.14 ^b	23.08±0.99 ^{ab}	23.42±2.09 ^{ab}	24.51±0.99 ^a
粗灰分 crude ash	1.35±0.15 ^a	1.24±0.15 ^{ab}	1.18±0.16 ^{ab}	1.04±0.26 ^b	1.33±0.20 ^a
水分 moisture	63.89±6.00	64.06±4.44	62.96±3.46	58.30±5.78	59.20±3.21
肝脏 liver composition					
粗脂肪 crude lipid	16.09±1.57 ^c	19.88±1.61 ^{ab}	20.15±1.80 ^{ab}	19.09±2.67 ^b	22.06±1.12 ^a
粗蛋白 crude protein	9.03±0.62	8.84±0.51	8.98±0.32	8.37±1.06	8.68±0.64
粗灰分 crude ash	1.05±0.11 ^a	0.89±0.12 ^{ab}	0.88±0.08 ^{ab}	0.77±0.10 ^b	0.81±0.25 ^b
水分 moisture	59.36±1.45	52.99±3.37	53.27±3.32	55.19±5.63	51.86±1.75

肌肉中C18:2n-6随饲料脂肪水平的上升而上升, 11.64%组最大($P<0.05$); C18:3n-6变化不明显; 随饲料脂肪水平的上升, C18:3n-3先下降后上升($P<0.05$), PUFA比例呈上升趋势, 其中11.64%组最大($P<0.05$)。

匙吻鲟肝脏中SFA比例(C16:0、C18:0)随着饲料脂肪水平上升而下降($P<0.05$)(表6); C18:1n-9呈先上升后下降趋势, 5.12%、7.14%、9.35%组显著高于11.64%组。肝脏脂肪酸组成中n-3 HUFA、n-3 PUFA比例各组间没有显著性差异($P>0.05$)。但部分脂肪酸组成与饲料中脂肪酸组成具有相关性, n-6 PUFA、PUFA比例(C18:2n-6、C18:3n-6、C20:3n-6)随饲料脂肪水平的上升而上升($P<0.05$), n-3/n-6呈下降趋势($P<0.05$)。

2.4 饲料脂肪水平对匙吻鲟消化酶活性的影响

9.35%组肠蛋白酶活性显著低于7.14%组($P<0.05$)(表7); 5.12%组肝脏淀粉酶活性显著高于其他组($P<0.05$)。各组间肝脏蛋白酶和脂肪酶活性没有显著性差异。

2.5 饲料脂肪水平对匙吻鲟血清生化指标的影响

血清TP、ALB及GLOB浓度随脂肪水平升高呈上升趋势, 3.01%组显著低于11.64%组($P<0.05$)(表8), 但与其他组之间无显著差异; 7.14%、9.35%组A/G显著高于3.01%组($P<0.05$)。匙吻鲟血清TC浓度11.64%组显著高于3.01%组($P<0.05$), 5.12%、7.14%、9.35%组之间没有显著性差异; HDL-C浓度11.64%组显著高于3.01%组($P<0.05$), 其余组之间没有显著性差异; ALT和AST的活性并未受到饲料脂肪水平的影响。

2.6 饲料脂肪水平对匙吻鲟血清及肝脏抗氧化性能的影响

3.01%组SOD活性显著低于其余各组($P<0.05$)(表9); 饲料脂肪水平对血清CAT活性也有显著影响, 除7.14%组, 3.01%组显著高于其余各组($P<0.05$); 血清GSH含量11.64%组显著低于3.01%、5.12%组($P<0.05$), 与其他各组无显著性差异; 饲料脂肪水平对血清GSH-Px活性、MDA含量没有显著性影响。以匙吻鲟血清SOD活性为因变量(Y), 饲料脂肪水平作为自变量(X)的二次

表 5 饲料脂肪水平对匙吻鲟肌肉脂肪酸组成的影响
Tab. 5 Effects of dietary lipid levels on muscle fatty acid profiles of *P. spathula*

脂肪酸 fatty acid	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
C14:0	2.21±0.01	2.22±0.11	2.38±0.25	2.70±0.24	2.40±0.17
C16:0	25.30±1.28	24.65±1.32	24.46±2.62	27.31±1.98	22.06±1.39
C16:1	5.74±0.55	5.70±0.19	5.58±0.55	5.13±0.75	5.05±0.18
C18:0	3.68±0.48	3.68±0.26	3.30±0.43	4.41±0.64	3.51±0.04
C18:1n-9	35.59±1.03	34.39±3.02	35.17±3.16	29.44±2.10	33.70±3.88
C18:2n-6	15.39±0.48 ^d	16.43±0.8 ^{cd}	17.31±0.77 ^c	20.02±0.92 ^b	20.46±1.55 ^a
C18:3n-6	0.78±0.31 ^{ab}	0.77±0.05 ^{ab}	0.85±0.16 ^{ab}	0.67±0.13 ^b	0.83±0.24 ^a
C18:3n-3	3.25±0.11 ^a	2.90±0.07 ^b	2.12±0.03 ^c	2.40±0.12 ^d	2.49±0.13 ^c
C20:3n-6	0.58±0.23	0.57±0.10	0.41±0.08	0.84±0.13	0.52±0.04
C20:3n-3	1.47±0.62	1.81±0.07	1.44±0.46	1.15±0.10	1.84±0.11
C20:4n-6	0.43±0.05	0.43±0.02	0.43±0.04	0.45±0.01	0.45±0.03
C20:5n-3	0.47±0.09	0.38±0.00	0.53±0.14	0.41±0.02	0.42±0.00
C22:6n-3	6.68±0.85	7.09±0.20	7.10±0.52	7.42±0.28	7.26±0.54
SFA	31.28±0.90	30.79±1.71	30.36±2.45	32.98±4.66	28.00±1.56
MUFA	41.56±0.61	40.51±2.91	41.18±2.65	36.52±4.71	38.06±3.03
n-6 PUFA	17.13±0.60 ^d	18.23±0.87 ^{cd}	19.03±0.73 ^c	20.97±0.93 ^b	23.25±0.75 ^a
n-3 PUFA	11.83±0.29	12.21±0.31	11.21±0.75	11.18±0.27	12.23±0.61
PUFA	29.27±0.38 ^c	30.79±1.09 ^{bc}	30.58±1.47 ^{bc}	32.55±1.12 ^b	36.01±1.42 ^a
n-3/n-6	0.69±0.04 ^a	0.67±0.03 ^a	0.59±0.02 ^b	0.54±0.02 ^{bc}	0.53±0.01 ^c
n-3 HUFA	8.58±0.37	9.29±0.25	9.08±0.72	8.83±0.22	9.64±0.55
HUFA	9.60±0.26	10.29±0.35	9.92±0.67	9.97±0.29	10.66±0.52

回归方程为 $Y=-0.214 9X^2+4.163 7X+19.392 0$ ($R^2=0.988 2$), 通过分析得出SOD最大值时, 饲料脂肪水平为9.69%(图3)。

肝脏SOD活性11.64%组显著低于其他各组($P<0.05$) (表9); 肝脏CAT活性7.14%组显著低于5.12%组($P<0.05$), 但与其他组没有显著性差异; GSH含量未受到饲料脂肪水平的影响; GSH-Px活性9.35%组显著高于3.01%、5.12%、7.14%组($P<0.05$), 与11.64%组没有显著性差异; 饲料脂肪水平对肝脏MDA含量没有显著影响。

3 讨论

3.1 饲料脂肪水平对匙吻鲟生长和生物学性状的影响

饲料中粗脂肪水平或能量水平与粗蛋白水平的关系决定着鱼类的生长^[20], 饲料中脂肪含量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^[21]。本实验结果表明, 饲料脂肪水平对匙吻鲟生长及生物学性状的影响较大。7.14%、9.35%组的终末均重、WGR及SGR均显著高于其他各组, 5.12%、7.14%、9.35%组CF显著高于3.01%组和11.64%组。可见饲料中脂肪水平过低或过高均会减缓匙吻鲟生长, 这与俄罗斯鲟^[22] (*Acipenser gueldenstaedti*)(7.00%~10.69%)、史氏鲟 (*A. schrenckii*)(8.00%)^[23]等研究结果一致。向国荣^[24]在水库网箱中以蛋白质含量为40%, 脂肪含量分别为6.5%、8.5%、10.5%、12.5%的饲料投喂匙吻鲟、杂交鲟(*Huso dauricus*♀×*A. schrenckii*♂)及史氏鲟, 根据平均日增重量和饵料系数确定3种鲟最适宜的脂肪含量为8%~9%, 与本实验生长结果略有不同, 这可能与养殖环境和养殖方式不同有关。

随着饲料脂肪水平的提高, 匙吻鲟PER表现出先上升后下降的趋势, 在9.36%时达到最

表 6 饲料脂肪水平对匙吻鲟肝脏脂肪酸组成的影响
 Tab. 6 Effects of dietary lipid levels on liver fatty acid profiles of *P. spathula*

脂肪酸 fatty acid	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
C14:0	1.10±0.10 ^{ab}	0.99±0.12 ^b	1.02±0.05 ^{ab}	0.95±0.10 ^b	1.23±0.09 ^a
C16:0	27.87±0.39 ^a	27.26±0.60 ^{ab}	26.32±0.30 ^c	26.44±0.38 ^{bc}	26.17±0.20 ^c
C16:1	5.78±0.06	5.92±0.14	5.65±0.15	6.01±0.33	5.93±0.14
C18:0	6.14±0.20 ^a	5.66±0.18 ^{ab}	5.75±0.23 ^{ab}	5.40±0.28 ^b	5.57±0.16 ^b
C18:1n-9	54.42±1.46 ^{ab}	56.45±1.58 ^a	56.77±0.18 ^a	56.36±0.93 ^a	53.60±0.37 ^b
C18:2n-6	2.38±0.57 ^b	1.96±0.19 ^b	2.67±0.06 ^b	2.73±0.24 ^b	4.17±0.42 ^a
C18:3n-6	0.63±0.09 ^b	0.61±0.02 ^b	0.71±0.03 ^b	0.75±0.08 ^b	1.12±0.07 ^a
C18:3n-3	1.67±0.06	1.59±0.05	1.56±0.07	1.56±0.13	1.57±0.11
C20:3n-6	0.15±0.04 ^b	0.19±0.07 ^{ab}	0.24±0.09 ^{ab}	0.27±0.01 ^{ab}	0.31±0.07 ^a
C20:3n-3	0.69±0.10	0.70±0.12	0.64±0.06	0.78±0.02	0.89±0.16
C20:4n-6	0.05±0.01	0.04±0.02	0.05±0.02	0.05±0.00	0.03±0.01
C20:5n-3	0.19±0.06	0.19±0.02	0.21±0.06	0.24±0.03	0.27±0.01
C22:6n-3	1.95±0.38	1.75±0.37	1.71±0.16	1.70±0.08	1.96±0.08
SFA	35.48±0.57 ^a	34.24±0.88 ^b	33.40±0.20 ^b	33.09±0.53 ^b	33.29±0.24 ^b
MUFA	61.33±1.59 ^{ab}	63.63±1.53 ^a	63.62±0.12 ^a	63.64±0.76 ^a	60.66±0.50 ^b
n-6 PUFA	3.21±0.66 ^{bc}	2.80±0.14 ^c	3.67±0.04 ^{bc}	3.81±0.31 ^b	5.63±0.52 ^a
n-3 PUFA	4.50±0.55	4.22±0.54	4.13±0.28	4.28±0.07	4.70±0.07
PUFA	7.72±0.81 ^b	7.02±0.41 ^b	7.81±0.26 ^b	8.10±0.33 ^b	10.34±0.50 ^a
n-3/n-6	1.46±0.36 ^a	1.52±0.28 ^a	1.12±0.08 ^{ab}	1.13±0.09 ^{ab}	0.84±0.08 ^b
n-3 HUFA	2.83±0.54	2.63±0.50	2.57±0.21	2.72±0.09	3.13±0.16
HUFA	3.03±0.50	2.87±0.56	2.86±0.10	3.04±0.10	3.47±0.10

表 7 饲料脂肪水平对匙吻鲟消化酶活性的影响
 Tab. 7 Effects of dietary lipid level on digestive enzyme activities of *P. spathula*

项目 items		饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
		3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
肠蛋白酶/(U/mg prot)	enteric protease	1 892.06±687.65 ^{abc}	1 526.83±299.96 ^{bc}	2 015.50±821.14 ^{ab}	1 344.18±197.16 ^c	2 338.95±425.18 ^a
肝脏蛋白酶/(U/mg prot)	hepatic protease	706.06±186.32	697.98±236.95	676.37±91.31	570.15±78.37	564.00±227.30
肝脏淀粉酶/(U/mg prot)	α -amylase	0.09±0.02 ^b	0.14±0.07 ^a	0.10±0.02 ^b	0.10±0.01 ^b	0.10±0.02 ^b
肝脏脂肪酶/(U/g prot)	lipase	35.57±19.59	31.64±9.80	37.69±19.80	21.26±5.71	27.66±5.29

高, 但与 11.64% 组没有显著性差异, 表明在一定范围内, 饲料脂肪水平的适当增加可以提高饲料效率, 降低氮排泄率, 表现出“蛋白质节约作用”^[25]。有研究表明, 黄姑鱼 (*Nibea albiflora*)^[26]、俄罗斯鲟^[22]等摄入较高水平的脂肪时, 会引起生

长速率下降, 蛋白质节约效应不明显甚至浪费蛋白质。随着饲料脂肪水平的上升, 饲料 PPV 呈先上升后稳定趋势, LPV 呈下降趋势, 这与饲料脂肪水平对匙吻鲟肌肉和肝脏脂肪含量的影响相吻合, 超出一定范围的脂肪水平使过多脂

表 8 饲料脂肪水平对匙吻鲟血清生化指标的影响

Tab. 8 Effects of dietary lipid level on serum biochemical indexes of *P. spathula*

项目 items	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
总蛋白/(g/L) TP	17.40±0.96 ^b	17.57±1.32 ^{ab}	18.33±0.52 ^{ab}	18.13±0.31 ^{ab}	19.47±0.42 ^a
白蛋白/(g/L) ALB	5.80±0.51 ^b	6.10±0.45 ^{ab}	6.63±0.31 ^{ab}	6.60±0.24 ^{ab}	6.70±0.14 ^a
球蛋白/(g/L) GLOB	11.60±0.45 ^b	11.47±0.90 ^b	11.70±0.22 ^{ab}	11.53±0.19 ^b	12.77±0.29 ^a
白球比 A/G	0.50±0.03 ^c	0.53±0.02 ^{abc}	0.56±0.02 ^{ab}	0.57±0.03 ^a	0.52±0.00 ^{bc}
葡萄糖/(mmol/L) GLU	2.89±0.40	3.03±0.05	3.45±0.11	3.03±0.26	2.96±0.16
总胆固醇/(mmol/L) TC	2.56±0.37 ^b	2.91±0.07 ^{ab}	2.94±0.11 ^{ab}	2.84±0.24 ^{ab}	2.99±0.00 ^a
甘油三酯/(mmol/L) TG	7.24±1.22 ^{ab}	6.75±0.37 ^{ab}	7.34±0.92 ^{ab}	6.04±0.39 ^b	8.00±0.63 ^a
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L) HDL-C	0.20±0.05 ^b	0.27±0.02 ^{ab}	0.30±0.05 ^{ab}	0.37±0.06 ^a	0.33±0.05 ^a
低密度脂蛋白胆固醇/(mmol/L) LDL-C	1.02±0.23	1.22±0.11	1.18±0.12	1.37±0.19	1.32±0.23
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	82.83±31.53	106.16±16.23	133.1±29.47	95.87±13.12	104.27±26.87
谷草转氨酶/(U/L) AST	163.63±46.70	194.53±15.88	214.67±46.79	175.47±12.35	210.67±43.12

表 9 饲料脂肪水平对匙吻鲟血清、肝脏抗氧化性能的影响

Tab. 9 Effects of dietary lipid level on serum and liver antioxidant indexes of *P. spathula*

项目 items	饲料脂肪水平/% dietary lipid levels				
	3.01	5.12	7.14	9.35	11.64
血清 serum					
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	29.86±5.36 ^b	35.53±5.89 ^a	37.55±5.68 ^a	39.89±6.41 ^a	38.66±3.52 ^a
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	8.93±1.61 ^a	5.66±1.70 ^c	7.92±1.49 ^{ab}	5.81±1.31 ^c	6.71±1.61 ^{bc}
谷胱甘肽/(mg/L) GSH	22.66±6.05 ^{ab}	24.89±4.64 ^a	15.71±7.40 ^{bc}	16.24±3.60 ^{bc}	13.46±4.28 ^c
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/mL) GSH-Px	962.2±97.14	977.31±104.97	984.31±114.98	905.10±188.09	1 020.02±110.06
丙二醛/(nmol/mL) MDA	6.77±0.33	6.53±0.17	6.46±0.38	6.39±0.31	6.53±0.21
肝脏 liver					
超氧化物歧化酶/(U/mg prot) SOD	106.31±16.73 ^a	99.88±13.09 ^a	109.61±13.80 ^a	101.37±10.06 ^a	84.74±7.06 ^b
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	2.16±0.69 ^{ab}	3.10±1.18 ^a	1.35±0.78 ^b	2.04±0.66 ^{ab}	2.22±0.63 ^{ab}
谷胱甘肽/(mg/mg prot) GSH	21.40±12.43	23.09±9.30	23.14±14.77	23.18±8.03	24.53±4.62
谷胱甘肽过氧化物酶/(U/mg prot) GSH-Px	37.96±18.89 ^b	39.29±17.41 ^b	32.16±9.87 ^b	69.68±43.76 ^a	57.16±21.03 ^{ab}
丙二醛/(nmol/mg prot) MDA	1.82±0.18	1.72±0.37	1.77±0.14	1.85±0.24	1.63±0.12

肪沉积, 达不到节约蛋白质的作用^[27]。

脂类在鱼体消化吸收后, 以甘油三酯的形式储存在脂肪、肠道、肌肉、肝脏等组织内^[28]。本实验结果表明, HSI随饲料脂肪水平的增加有上升趋势, 而11.64%组较低, 可能与鱼体质量下

降有关^[29-30]。高脂饲料会导致肝脏脂肪数量的增多, 使脂肪细胞的体积变大, 从而容纳更多的脂肪, 使HSI变大。通常, 肝脏脂肪含量会随着饲料脂肪水平的升高相应增加。本研究中3.01%、5.12%、7.14%组ISI随着脂肪水平增加而显著增

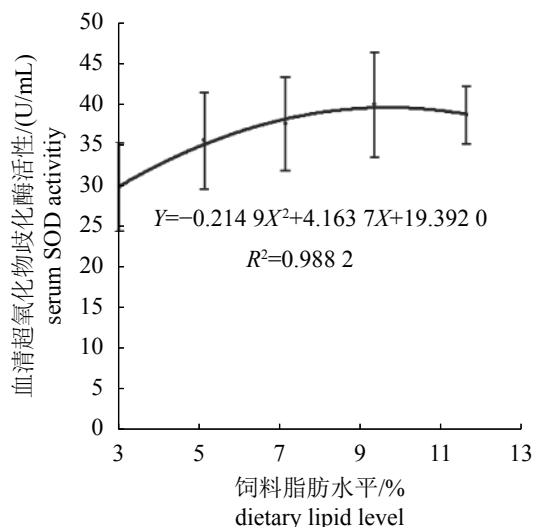


图3 饲料脂肪水平与匙吻鲟血清超氧化物歧化酶活性之间的二次回归分析

Fig. 3 Quadratic regression analysis between SOD activity in serum and dietary lipid levels for *P. spathula*

加, 7.14%组最高, 随后降低。肠道是动物消化吸收营养物质的主要场所^[31], 上述结果可能与鱼类肠道生长发育和消化吸收能力有关^[32-33]。

3.2 饲料脂肪水平对匙吻鲟体组成、脂肪酸组成的影响

肌肉的蛋白质和脂肪含量是评价鱼类肌肉营养价值和质量的常用指标^[34]。随着饲料脂肪水平的升高, 匙吻鲟全鱼和肌肉粗脂肪含量也随之增加, 即饲料中的脂肪在鱼体内沉积, 但饲料中脂肪达到一定水平后(9.35%以上), 匙吻鲟肌肉粗脂肪含量趋于稳定, 叶坤等^[26]对黄姑鱼、王爱民等^[35]对异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)的研究也说明了这点。

肌肉和全鱼粗蛋白含量随饲料脂肪水平的增加而增加, 当达到7.14%时肌肉的粗蛋白含量没有显著性差异。这是由于饲料脂肪水平增加, 导致蛋白质在肌肉等其他组织中的吸收和沉积作用, 脂肪水平过高则不利于饲料蛋白质的转化和鱼体中蛋白质的沉积^[36]。

粗灰分是饲料、动物组织和动物排泄物样品在550~600℃高温炉中将所有有机物质全部氧化后剩余的残渣, 主要为矿物质氧化物或盐类等无机物质, 有时还含有少量泥沙, 故称粗灰分。9.35%组的全鱼、肌肉及肝脏的粗灰分含量最低, 全鱼的水分含量也是最低, 与吉富罗非

鱼(GIFT *Oreochromis niloticus*)^[36]在饲料脂肪水平为3.71%~16.55%时肌肉粗灰分、水分含量最低, 鳙(*Aristichys nobilis*)^[37]在饲料脂肪水平为11.02%时全鱼粗灰分与水分含量降低相一致。

本研究中, 肝脏和肌肉中的脂肪酸组成与饲料脂肪酸组成相关^[38-39], 但随着饲料脂肪水平的上升, 肝脏和肌肉中n-3 HUFA和n-3 PUFA比例的变化与饲料中的并不一致。颀江等^[19]研究宽体沙鳅(*Botia reevesae*)幼鱼适宜脂肪水平时, 采用鱼油:豆油=1:1作为脂肪源, 发现饲料中 Σ n-3脂肪酸比例随着脂肪水平上升呈下降趋势, 但肌肉中呈现显著下降趋势。而以鱼油作为脂肪源饲喂阿拉斯加锤形石首鱼(*Atractoscion nobilis*)^[40]后, 其肌肉中n-3 PUFA随饲料脂肪水平增加而增加, 可能是以鱼油作为饲料脂肪源, 饲料中含有大量的n-3 PUFA, 因而鱼体肌肉和肝脏中的n-3 PUFA比例随饲料n-3 PUFA增加而升高。因此, 提高饲料脂肪水平后, 不同鱼类肌肉脂肪酸组成的变化差异与实验用的饲料脂肪源密切相关, 饲料中的脂肪酸变化对组织中脂肪酸组成影响较小, 可能是由于鱼类经过代谢消除了这些差异。

匙吻鲟肌肉和肝脏中n-6 PUFA比例受饲料影响显著, n-6 PUFA是淡水鱼类的必需脂肪酸之一, PUFA能影响机体的免疫机能, n-3 PUFA和n-6 PUFA的比例也会对免疫功能产生影响。有研究认为n-3 PUFA与n-6 PUFA比率高时能增强免疫反应和非特异性抗性^[41], 本研究中随脂肪水平的升高, n-3/n-6升高, 血清中TP、ALB、GLOB等浓度呈上升趋势也证实了这一点。

鱼类脂质合成主要路径由细胞质内脂肪酸合成酶催化, 脂肪酸合成酶主要产物为饱和脂肪酸C16:0和C18:0^[42]。肝脏中SFA随着饲料脂肪水平上升而上升, 可能是由于摄入的脂肪需要大量的脂肪酸合成酶进行催化转化, 当脂肪水平过高, 肝脏中的饱和脂肪酸含量过多, 容易引起肝脏病变, 不利于健康^[43]。

3.3 饲料脂肪水平对匙吻鲟消化酶活性的影响

Han等^[44]在拟目乌贼(*Sepia lycidas*)上的研究结果显示, 饲料脂肪水平在4.15%以上, 胃蛋白酶和胰蛋白酶活性随着脂肪水平的升高而降低, 脂肪酶呈现先升高后降低趋势, 对淀粉酶

活性并无显著影响; Luo等^[45]在对花鲈(*Lateolabrax maculatus*)的研究表明, 胃蛋白酶和肝脏蛋白酶活性随着脂肪水平的升高呈现先上升后下降的趋势, 并在10%时达到最大, 而脂肪酶表现为逐渐升高趋势, 淀粉酶活性在8%以上就趋于稳定。而在本实验中, 7.14%组肠道蛋白酶活性显著高于9.35%组, 胰蛋白酶随脂肪水平升高而下降, 但和脂肪酶一样均没有显著性差异, 淀粉酶在7.14%以上就趋于稳定, 而脂肪酶活性与以往研究结果不同, 可能是因为不同物种的摄食习惯与生理特性的差异^[46]。

3.4 饲料脂肪水平对匙吻鲟血清生化指标的影响

血液中TP含量是机体蛋白质吸收和代谢的重要指标之一。TP由ALB和GLOB组成, 作为饲料蛋白吸收情况的敏感指标, 能够反映鱼体的健康状况^[47], 具有维持血管内正常胶体渗透压和酸碱度、运输多种代谢物、调节被运输物质的生理作用等多种功能, 并与机体免疫功能有密切关系, 其水平可以反映肝脏的合成功能。星斑川鲮(*Platichthys stellatus*)^[47]、鳊(*Elopichthys bambusa*)^[48]幼鱼的研究结果都表明血清中TP的含量呈下降趋势, 而本研究中匙吻鲟血清TP、ALB、GLOB含量均表现为11.64%组显著高于3.01%组, 这也与蛋白质利用率相关结果吻合, 说明在一定范围内, 提高饲料的脂肪水平, 可以促进蛋白质吸收, 提高鱼体免疫能力, 但饲料的脂肪水平过高则无益于增强饲料蛋白质利用以及免疫力。

本研究结果显示, 匙吻鲟血清TC浓度随饲料脂肪水平的升高呈上升趋势, HDL-C呈先上升后平稳的趋势。血清TC和TG与鱼类营养状态密切相关, 二者含量升高表明内生脂肪转运活跃, 是脂肪运输系统对高脂饲料的应答^[47, 49]。HDL为血液中胆固醇清理者, 携带胆固醇后形成HDL-C, LDL则以与前者相反的方向运输胆固醇, 携带后形成LDL-C。HDL-C有利于TC的转运和清除, 从而导致血液中HDL-C含量升高而TC降低。当饲料脂肪水平过高, 肝功能受阻, 合成和分泌蛋白质的能力不能满足转运胆固醇的需求, 导致血液中TC含量增加, 而HDL-C含量不再上升甚至下降, 与俄罗斯鲟^[22]、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[49]、大西洋鲑(*Salmo salar*)^[50]等

的研究结果相似。

3.5 饲料脂肪水平对匙吻鲟血清及肝脏抗氧化性能的影响

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^[51]。SOD与超氧阴离子作用, 产生 H_2O_2 和 O_2 , 而CAT和GSH-Px可以快速地将 H_2O_2 分解成 H_2O 和 O_2 , 使自由基维持在较低水平, MDA作为脂质过氧化反应的主要代谢产物, 其含量的升高是脂质过氧化反应增强、脂质过氧化物增多的表现^[52]。肝脏是抗氧化酶分布比较集中的场所, 随着饲料脂肪水平升高, 血清中SOD活性呈现逐渐上升趋势。当饲料脂肪水平过高时, 肝脏抗氧化酶活性不足, 氧化压力会向全身扩散^[53], 肝沉积了大量的脂肪并氧化, 肝组织可能受到损伤, 肝细胞受破坏或细胞膜通透性增加, 肝细胞中的酶渗入血液, 导致血清中SOD活性增加, 因此肝脏和血清中SOD的活性不同^[54]。

有报道称当 H_2O_2 浓度较低时, GSH-Px主要负责消除 H_2O_2 ^[55]。反之, 则主要由CAT消除其毒性。王朝明等^[56]报道胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)饲料脂肪含量为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能力, 而抗氧化酶活性的增加是维持氧化和抗氧化的平衡^[57]。本研究中血清和肝脏7.14%、9.35%组SOD活性较高, 而对应的MDA含量均无显著性差异。随着饲料脂肪水平的上升, 11.64%组肝脏SOD活性降低, CAT活性上升, GSH-Px活性下降, 可以得出其抗氧化水平已经降低。

4 结论

通过对匙吻鲟SGR、血清SOD活性二次回归分析, PER的折线回归分析及其他指标情况综合分析得出, 饲料脂肪水平在一定范围内(7.88%~9.69%)升高, 显著促进了匙吻鲟幼鱼的生长、饲料利用率及机体健康状况。

参考文献:

- [1] Bartona B A, Rahna A B, Feistb G, et al. Physiological stress responses of the freshwater chondrosteian paddlefish (*Polyodon spathula*) to acute physical disturbances [J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A:

- Molecular & Integrative Physiology, 1998, 120(2): 355-363.
- [2] Bemis W E, Findeis E K, Grande L. An overview of Acipenseriformes[J]. Environmental Biology of Fishes, 1997, 48(1-4): 25-71.
- [3] 沈硕, 周继成, 赵思明, 等. 匙吻鲟的营养成分及肌肉营养评价[J]. 营养学报, 2009, 31(3): 295-297.
Shen S, Zhou J C, Zhao S M, *et al.* The nutritional composition and evaluation of muscle of *Polyodon spathula*[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2009, 31(3): 295-297(in Chinese).
- [4] 王凡. 匙吻鲟的生物学特性及养殖技术[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(6): 985-986.
Wang F. Biological character and cultivation techniques of the paddlefish[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2007, 46(6): 985-986(in Chinese).
- [5] 方程, 马明洋, 吉红, 等. 微生态制剂对匙吻鲟生长性能、体组成及血清生化指标的影响[J]. 水生生态学杂志, 2014, 35(6): 99-105.
Fang C, Ma M Y, Ji H, *et al.* Effect of probiotics on growth rate, body composition and the serum chemistry of paddlefish *Polyodon spathula*[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(6): 99-105(in Chinese).
- [6] Mims S D, Knaub R S. Condition factors and length-weight relationships of pond-cultured paddlefish *Polyodon spathula* with reference to other morphogenetic relationships[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1993, 24(3): 429-433.
- [7] Mischke C C, Li M H, Zimba P V. Pond fertilization does not affect nutritional value of zooplankton in channel catfish nursery ponds[J]. North American Journal of Aquaculture, 2003, 65(3): 248-254.
- [8] Onders R J, Mims S D, Wilhelm B A, *et al.* Growth, survival and fillet composition of paddlefish, *Polyodon spathula* (Walbaum) fed commercial trout or catfish feeds[J]. Aquaculture Research, 2005, 36(16): 1602-1610.
- [9] 张磊. 达氏鲟幼鱼对蛋白质和脂肪需要量的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
Zhang L. Study on dietary of protein and lipid requirement in juvenile Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese).
- [10] 涂玮. 罗非鱼幼鱼饲料脂肪及必需脂肪酸需要量研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
Tu W. Study on dietary lipid and essential fatty acid requirement in advanced juvenile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012 (in Chinese).
- [11] Chou B S, Shiau S Y. Optimal dietary lipid level for growth of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus*×*Oreochromis aureus*[J]. Aquaculture, 1996, 143(2): 185-195.
- [12] Rueda-López S, Lazo J P, Reyes G C, *et al.* Effect of dietary protein and energy levels on growth, survival and body composition of juvenile *Totoaba macdonaldi*[J]. Aquaculture, 2011, 319(3-4): 385-390.
- [13] He H Q, Lawrence A L, Liu R Y. Evaluation of dietary essentiality of fat-soluble vitamins, A, D, E and K for penaeid shrimp (*Penaeus vannamei*)[J]. Aquaculture, 1992, 103(2): 177-185.
- [14] 张海涛, 王安利, 李国立, 等. 营养素对鱼类脂肪肝病变的影响[J]. 海洋通报, 2004, 23(1): 82-89.
Zhang H T, Wang A L, Li G L, *et al.* Effect of nutrient on the fatty liver disease of fish[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(1): 82-89(in Chinese).
- [15] 刘阳洋. 匙吻鲟对蛋白质和脂肪营养需求量的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
Liu Y Y. Study on dietary protein and lipid requirement of *Polyodon spathula*[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [16] Folch J. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.
- [17] Christie W W. A simple procedure for rapid transmethylation of glycerolipids and cholesteryl esters[J]. Journal of Lipid Research, 1982, 23(7): 1072-1075.
- [18] Safari O, Atash M M S, Paolucci M. Effects of dietary L-carnitine level on growth performance, immune responses and stress resistance of juvenile narrow clawed crayfish, *Astacus leptodactylus leptodactylus* Eschscholtz, 1823[J]. Aquaculture, 2015, 439: 20-28.
- [19] 颀江, 李飞扬, 刘晓玲, 等. 饲料脂肪水平对宽体沙鳅幼鱼生长和肌肉脂肪酸组成及脂肪酶的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(11): 76-83.
Xie J, Li F Y, Liu X L, *et al.* On effects of dietary lipid level on growth, fatty acids profiles and lipase in *Botia reevesae*[J]. Journal of Southwest China Normal Uni-

- versity (Natural Science Edition), 2013, 38(11): 76-83(in Chinese).
- [20] Bowyer J N, Qin J G, Stone D A J. Protein, lipid and energy requirements of cultured marine fish in cold, temperate and warm water[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2013, 5(1): 10-32.
- [21] Gridale-Helland B, Shearer K D, Gatlin D M, *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.
- [22] 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.
- Zhu T T, Li Q, Zhu H Y, *et al.* Effects of dietary lipid level on growth performance, blood biochemical index and antioxidant status of juvenile *Acipenser gueldenstaedti*[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(1): 58-67(in Chinese).
- [23] 肖懿哲, 苏永全. 史氏鲟饲料脂肪的最适含量[J]. *水产学杂志*, 2001, 14(1): 21-24.
- Xiao Y Z, Su Y Q. The optimal lipid content of feed for *Acipenser schrenckii* Brandt[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2001, 14(1): 21-24(in Chinese).
- [24] 向国荣. 匙吻鲟、杂交鲟、史氏鲟网箱养殖生长对比实验[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- Xiang G R. The comparison test on growth of *Polyodon spathala*, *Sturgeon cartilage* [*Huso huso* (♀)×*Acipenser ruthenus* (♂)] and *Acipenser schrencki* in cage culture[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008 (in Chinese).
- [25] Torstensen B E, Lie Ø, Hamre K. A factorial experimental design for investigation of effects of dietary lipid content and pro-and antioxidants on lipid composition in Atlantic salmon (*Salmo salar*) tissues and lipoproteins[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2001, 7(4): 265-276.
- [26] 叶坤, 王秋荣, 谢仰杰, 等. 饲料脂肪水平对黄姑鱼幼鱼生长性能、肌肉组成和血浆生化指标的影响[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(4): 1418-1426.
- Ye K, Wang Q R, Xie Y J, *et al.* Effects of dietary lipid level on growth performance, muscle composition and plasma biochemical indices of juvenile *Nibea albiflora*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2017, 29(4): 1418-1426(in Chinese).
- [27] 李坚明, 甘晖, 冯广朋, 等. 饲料脂肪含量与奥尼罗非鱼幼鱼肝脏形态结构特征的相关性[J]. *南方水产*, 2008, 4(5): 37-43.
- Li J M, Gan H, Feng G P, *et al.* Correlation between lipid levels of feed and liver morphology characters of juvenile tilapia (*Oreochromis niloticus*×*O. aureus*)[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(5): 37-43(in Chinese).
- [28] Regost C, Arzel J, Cardinal M, *et al.* Dietary lipid level, hepatic lipogenesis and flesh quality in turbot (*Psetta maxima*)[J]. *Aquaculture*, 2001, 193(3-4): 291-309.
- [29] Wang L G, Lu Q, Luo S Y, *et al.* Effect of dietary lipid on growth performance, body composition, plasma biochemical parameters and liver fatty acids content of juvenile yellow drum *Nibea albiflora*[J]. *Aquaculture Reports*, 2016, 4(C): 10-16.
- [30] 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.
- [31] 伍曦, 罗辉, 冯琳, 等. 高水平维生素E对幼建鲤生长性能和消化吸收功能的影响[J]. *动物营养学报*, 2011, 23(11): 1938-1945.
- Wu X, Luo H, Feng L, *et al.* High levels of dietary vitamin E affect growth performance, digestive and absorptive function of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2011, 23(11): 1938-1945(in Chinese).
- [32] Dongmeza E, Siddhuraju P, Francis G, *et al.* Effects of dehydrated methanol extracts of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves and three of its fractions on growth performance and feed nutrient assimilation in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* (L.))[J]. *Aquaculture*, 2006, 261(1): 407-422.
- [33] Jiang W D, Feng L, Liu Y, *et al.* Growth, digestive capacity and intestinal microflora of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) fed graded levels of dietary inositol[J]. *Aquaculture Research*, 2009, 40(8): 955-962.
- [34] 黄钧, 杨淞, 覃志彪, 等. 云斑(鲷)、泥鳅和瓦氏黄颡鱼的含肉率及营养价值比较研究[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(5): 990-997.
- Huang J, Yang S, Qin Z B, *et al.* Comparative study about flesh contents and nutrient values in brown bull-

- head, loach and darkbarbel catfish[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(5): 990-997(in Chinese).
- [35] 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.
- Wang A M, Lü F, Yang W P, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth performance, body fat deposition, muscle composition and activities of digestive enzymes of gibel carp (*Carassius auratus gibelio*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(3): 625-633(in Chinese).
- [36] 韩光明, 王爱民, 徐跑, 等. 饲料中脂肪水平对吉富罗非鱼幼鱼成活率、肌肉成分及消化酶活性的影响[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(4): 469-474.
- Han G M, Wang A M, Xü P, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth, muscle composition and digestive enzyme activities of juvenile GIFT strain Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(4): 469-474(in Chinese).
- [37] 王燕. 不同饲料脂肪水平对鳙鱼生长及体组成的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016.
- Wang Y. Effects of different dietary lipid levels on growth performance and the body composition of big-head carp[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2016.
- [38] Ghanawi J, Roy L, Davis D A, *et al.* Effects of dietary lipid levels on growth performance of marbled spinefoot rabbitfish *Siganus rivulatus*[J]. *Aquaculture*, 2011, 310(3): 395-400.
- [39] Yan J, Li Y, Liang X, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on growth performance, fatty acid composition and antioxidant-related gene expressions in juvenile loach *Misgurnus anguillicaudatus*[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(10): 5385-5393.
- [40] Lopez L M, Torres A L, Durazo E, *et al.* Effects of lipid on growth and feed utilization of white seabass (*Atractoscion nobilis*) fingerlings[J]. *Aquaculture*, 2006, 253(1-4): 557-563.
- [41] 阮征, 吴谋成, 胡筱波, 等. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. *中国油脂*, 2003, 28(2): 55-59.
- Ruan Z, Wu M C, Hu X B, *et al.* Research advancement in polyunsaturated fatty acids[J]. *China Oils and Fats*, 2003, 28(2): 55-59(in Chinese).
- [42] Tocher D R, Bell J G, MacGlaughlin P, *et al.* Hepatocyte fatty acid desaturation and polyunsaturated fatty acid composition of liver in salmonids: effects of dietary vegetable oil[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2001, 130(2): 257-270.
- [43] 周景祥, 黄权, 吴莉芳, 等. 鱼类脂肪酸组成及需要[J]. *中国饲料*, 2000(3): 19-20.
- Zhou J X, Huang Q, Wu L F, *et al.* The component of fatty acid and requirement in fish[J]. *China Feed*, 2000(3): 19-20(in Chinese).
- [44] Han Q X, Wang Y, Lü T T, *et al.* Effects of dietary lipids on the growth performance, survival, and digestive enzymes of juvenile cuttlefish, *Sepia lycidas*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2017, 48(6): 963-971.
- [45] Luo G, Xu J H, Teng Y J, *et al.* Effects of dietary lipid levels on the growth, digestive enzyme, feed utilization and fatty acid composition of Japanese sea bass (*Lateolabrax japonicus* L.) reared in freshwater[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(2): 210-219.
- [46] 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).
- [47] Ding L Y, Zhang L M, Wang J Y, *et al.* Effect of dietary lipid level on the growth performance, feed utilization, body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*)[J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(10): 1470-1478.
- [48] 赵巧娥, 朱邦科, 沈凡, 等. 饲料脂肪水平对鳃幼鱼生长、体成分及血清生化指标的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2012, 31(3): 357-363.
- Zhao Q E, Zhu B K, Shen F, *et al.* Effect of dietary lipid levels on growth, body composition and blood biochemical indices of juvenile yellowcheek carp (*Elopichthys bambusa*)[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2012, 31(3): 357-363(in Chinese).
- [49] 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]. *Aquaculture Nutrition*, 2015, 11(2): 139-146.

- [50] Hamre K, Christianse R, Waagbø R, *et al.* Antioxidant vitamins, minerals and lipid levels in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*, L.): effects on growth performance and fillet quality[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2004, 10(2): 113-123.
- [51] Cheung C C C, Siu W H L, Richardson B J, *et al.* Antioxidant responses to benzo[a]pyrene and Aroclor 1254 exposure in the green-lipped mussel, *Perna viridis*[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 128(3): 393-403.
- [52] Martínez-Alvarez R M, Hidalgo M C, Domezain A, *et al.* Physiological changes of sturgeon *Acipenser naccarii* caused by increasing environmental salinity[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(Pt 23): 3699-3706.
- [53] 张晨捷, 彭士明, 陈超, 等. 饲料蛋白和脂肪水平对云纹石斑鱼幼鱼免疫和抗氧化性能的影响[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(6): 634-644.
- Zhang C J, Peng S M, Chen C, *et al.* Effects of dietary protein and lipid levels on immune and antioxidant function of juvenile *Epinephelus moara*[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(6): 634-644(in Chinese).
- [54] 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.
- Shi Z H, Yue Y F, Peng S M, *et al.* Effects of dietary lipid levels on serum biochemistry indices, immunity, and antioxidant activity in *Sebastes marmoratus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 101-107(in Chinese).
- [55] Ladenstein R, Epp O, Bartels K, *et al.* Structure analysis and molecular model of the selenoenzyme glutathione peroxidase at 2.8Å resolution[J]. *Journal of Molecular Biology*, 1979, 134(2): 199-218.
- [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.
- Wang C M, Luo L, Zhang G Z, *et al.* Effect of dietary lipid level on growth performance, body composition and antioxidant capacity of juvenile Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*)[J]. *Freshwater Fisheries*, 2010, 40(5): 47-53(in Chinese).
- [57] Paital B, Chainy G B N. Antioxidant defenses and oxidative stress parameters in tissues of mud crab (*Scylla serrata*) with reference to changing salinity[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2010, 151(1): 142-151.

Effects of dietary lipid levels on growth, body composition, digestive enzyme activities, serum biochemical indexes and antioxidant performance of *Polyodon spathula*

LIU Yangyang¹, YU Haibo¹, WU Wenyi¹, ZHONG Mingzhi¹, XING Junxia¹,
ZHOU Jishu¹, JI Hong^{1*}, XUE Min²

(1. College of Animal Science and Technology, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This study investigated the effects of dietary lipid levels on growth performance, body composition, digestive enzyme activities, serum biochemical indexes and antioxidant enzyme activities of paddlefish (*Polyodon spathula*). A total of 270 *P. spathula* with initial body weight of (81.38±0.14) g were randomly divided into five groups with 3 replicates per group and fed with five diets (dietary protein level 41.35%) containing different lipid levels (3.01%, 5.12%, 7.14%, 9.35% and 11.64%) for 8 weeks. With the increment of dietary lipid level, weight gain rate, specific growth rate, feed conversion ratio, protein efficiency ratio, hepatosomatic index and condition factor of *P. spathula* all showed a trend of first rising and then decreasing, and regression analysis determined that the specific growth rate and protein efficiency ratio reached the maximum when the dietary lipid level was 7.88% and 9.47%, respectively. The lipid content of muscle and liver increased with the increase of dietary lipid level, and the lipid content in 11.64% group was significantly higher than those in 3.01%, 5.12% and 7.14% groups. The total fish and muscle crude protein contents were related to dietary lipid level, and crude protein contents in total fish and muscle of 3.01% groups were the lowest, while 7.14% and 9.35% groups had no significant difference. Main fatty acid composition in the muscle and liver of the *P. spathula* were related to the fatty acid in the feed, with the increase of dietary lipid level, the ratio of n-6PUFA in the muscle and liver increased, the n-3/n-6 PUFA and SFA (C16:0, C18:0) in the liver decreased; MUFA C18:1n-9 first ascended, then decreased, and there was no significant difference in the proportion of n-3HUFA and n-3PUFA in the fatty acid composition of muscle and liver. The enteric protease activity of 7.14% group was significant higher than 9.35% group, α -amylase activity was more stable when lipid level reached 7.14%, and no significant difference between hepatic protease and lipase activity. The concentration of serum total protein, albumin and globulin increased with the increase of lipid level, the serum total cholesterol and high density cholesterol concentration in 11.64% group were significantly higher than 3.01% group, in addition, alanine aminotransferase and aspartate aminotransferase were not affected by dietary lipid level. The serum superoxide dismutase activity reached the maximum when dietary lipid level was 9.69%, and there was no significant difference in glutathione peroxidase activity and malondialdehyde content. The superoxide dismutase activity of liver in 11.64% group was significantly lower than other groups and glutathione peroxidase activity in 9.35% group was significantly higher than other groups except 11.64% group, whereas there was no significant difference in glutathione and malondialdehyde content. The comprehensive analysis of growth, feed utilization, fish quality, digestive enzyme activity and healthy condition showed that appropriate lipid level for *P. spathula* was 7.88%-9.69% under this trial condition.

Key words: *Polyodon spathula*; lipid level; growth; body composition; digestive enzyme activities; serum biochemical indexes; antioxidant performance

Corresponding author: JI Hong. E-mail: jihong@nwsuaf.edu.cn

Funding projects: Shaanxi Science and Technology Co-ordination and Innovation Project (2015KTTSNY01-05)