

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20171106001

http://www.yykxjz.cn/

涂佑欢, 张曦, 陶琳丽, 杨秀娟, 邓君明. 橡胶籽油替代豆油对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)生长性能、消化酶活性及部分生化指标的影响. 渔业科学进展, 2018, 39(5): 81-90

Tu YH, Zhang X, Tao LL, Yang XJ, Deng JM. Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on growth performance, digestive enzyme activities, and partial biochemical indices of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(5): 81-90

橡胶籽油替代豆油对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*) 生长性能、消化酶活性及部分生化指标的影响*

涂佑欢 张 曦 陶琳丽 杨秀娟 邓君明^①

(云南农业大学动物科学技术学院 昆明 650201)

摘要 为研究橡胶籽油替代豆油对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)生长性能、消化酶活性、血脂水平、蛋白质代谢及抗氧化功能的影响,分别以橡胶籽油替代 0(对照组)、25%、50%、75%和 100%豆油配制 5 种等氮等能饲料,进行 10 周饲养实验。实验显示,0~50%替代组草鱼增重率、日增重系数显著高于 100%替代组($P<0.05$)。随着橡胶籽油替代豆油比例的升高,饲料系数呈先下降后上升的趋势,其中,25%替代组饲料系数最低,显著低于 50%~100%替代组($P<0.05$);25%替代组蛋白质效率最高,显著高于其他处理组($P<0.05$)。随着橡胶籽油替代比例的升高,肠道胰蛋白酶、脂肪酶活性呈先上升后下降的趋势,其中,25%替代组脂肪酶活性最高,显著高于其他处理组($P<0.05$),50%替代组胰蛋白酶活性最高,显著高于对照组、75%和 100%替代组($P<0.05$)。0~50%替代组肝胰脏胰蛋白酶活性显著高于 75%和 100%替代组($P<0.05$)。25%~100%替代组血清总胆固醇(TC)含量显著低于对照组($P<0.05$)。随着橡胶籽油替代比例的升高,肝胰脏天门冬氨酸氨基转移酶(AST)、丙氨酸氨基转移酶(ALT)活性呈先下降后上升的趋势,其中,25%替代组 AST、ALT 活性最低,显著低于对照组和 100%替代组($P<0.05$)。0~25%替代组血浆总抗氧化力(TAC)显著低于 75%和 100%替代组($P<0.05$)。对照组血浆、肝胰脏丙二醛(MDA)含量显著高于 100%替代组($P<0.05$)。由此可知,橡胶籽油替代 25%~50%豆油对草鱼生长性能、饲料利用率、血脂水平、抗氧化功能指标均无不良影响;但替代超过 50%时显著降低草鱼生长性能和消化酶活性。

关键词 草鱼; 橡胶籽油; 豆油; 生长性能; 消化酶活性; 抗氧化功能

中图分类号 S963.71 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)05-0081-10

豆油是世界上产量最大的植物油,是鱼类饲料中常用的优质脂肪源(胡水鑫等, 2012)。然而,随着饲料工业和水产养殖业的快速发展,豆油消耗量与日俱增,价格大幅度上涨,其在水产饲料中的使用量逐渐

受到限制,如何用其他更加优质、廉价的脂肪源部分或全部替代豆油已成为水产饲料行业的研究热点(Xing *et al*, 2004)。

橡胶树是一种重要的经济树种,全世界 40 多个

* 云南农业大学杰出人才专项(2015JY04)和云南省淡水渔业产业技术体系专项(2017KJT0019) [This work was supported by Special Talents of Yunnan Agricultural University (2015JY04), and Special Technical System of Freshwater Fishery Industry in Yunnan Province(2017KJT0019)]. 涂佑欢, E-mail: 1129298431@qq.com

^① 通讯作者: 邓君明, 教授, E-mail: djunming@163.com

收稿日期: 2017-11-06, 收修改稿日期: 2017-12-09

国家和地区均有大量种植,面积近 1000 万 hm^2 ,其中,90%种植区域集中在东南亚,以印度尼西亚、泰国、中国等为主(郭志勇等,2009)。中国橡胶种植区域主要集中在云南省、海南省和广东省,若按 25%~38%的种子出油率计算,仅 2013 年我国就可产橡胶籽油 55.97 万 t,产量相当可观(郑云武等,2016)。然而,我国每年约 95%橡胶籽被废弃于橡胶林中,未得到有效利用,造成资源严重浪费。橡胶籽油中不饱和脂肪酸含量为 74.52%,饱和脂肪酸含量为 25.24%。此外,橡胶籽油中富含 α -亚麻酸(20%~24%),是大豆油和菜籽油的 3~4 倍(赵瀛华等,2013)。研究表明,长期食用橡胶籽油具有明显降低血脂的功能(刘超然等,1983),对大鼠(*Rattus norvegicus*)胚胎发育无明显致畸和毒副作用(杨丽萍等,2003),对鸡(*Gallus domesticus*)平均日增重和饲料转化率无显著影响(Nwokolo *et al.*, 1989),可明显提高虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)生长性能和饲料利用率(王坤等,2017)。因此,橡胶籽油可作为优质脂肪替代源,但迄今为止鲜见橡胶籽油在草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)饲料中的应用。

草鱼是我国四大家鱼之一,因其生长速度快、饲料来源广、肉质细嫩、肌间刺少,在国内有大量养殖。近年来,有关草鱼的研究主要集中在营养需求和健康养殖等方面,对草鱼饲料中橡胶籽油替代豆油的研究尚未见报道。因此,本研究选用草鱼为研究对象,于饲料中添加不同比例的橡胶籽油,研究其对草鱼生长性能、消化酶活性、血脂水平、蛋白质代谢及抗氧化功能的影响,以期为进一步开发橡胶籽油在水产饲料中的应用提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验以豆粕为蛋白源,豆油、橡胶籽油为脂肪源,配制 5 种等氮(32%)等能(20 MJ/g)饲料。其中,0 替代组草鱼饲料未添加橡胶籽油,作为对照组;25%~100%替代组草鱼饲料橡胶籽油添加量分别为 1.4%~5.4%替代 25%~100%豆油,饲料配方和营养组成见表 1,脂肪酸组成见表 2。

配制饲料前,所有原料经粉碎机(SFSP 系列,昆明华明粮油饲料设备厂生产)粉碎,且全部过 60 目筛。将粉碎好的饲料原料按表 1 饲料配方混合均匀,加入豆油、橡胶籽油和大豆卵磷脂(先溶于豆油或橡胶籽油中),手工将油脂微小颗粒搓散,于塑料薄膜袋中手工混合均匀,最后加入适量蒸馏水使粉状饲料形成硬团,于颗粒饲料机(SKJ-200,济南牧农机械有限公

表 1 实验饲料配方和营养组成(%干物质基础)
Tab.1 Formula and nutrient composition of experimental diets (% dry-matter basis)

原料 Ingredients	组别 Diets				
	0	25%	50%	75%	100%
豆粕 Soybean meal ¹	50.00	50.00	50.00	50.00	50.00
次粉 Wheat shorts ¹	34.54	34.54	34.54	34.54	34.54
草粉 Grass meal	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
α -淀粉 α -Starch	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
大豆卵磷脂 Lecithin	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
豆油 Soy oil	5.40	4.00	2.70	1.40	0.00
橡胶籽油 Rubble seed oil	0.00	1.40	2.70	4.00	5.40
磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
维生素 C Vitamin C	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
氯化钠 NaCl	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
氯化胆碱(40%) Choline chloride	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
维生素预混料 Vitamin premix ²	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
矿物质预混料 Mineral premix ³	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
蛋氨酸 Met	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
赖氨酸 Lys	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
组氨酸 His	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
抗氧化剂 Antioxidant	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
营养组成 Nutrient composition					
干物质 Dry matter (%DM)	89.84	88.28	89.77	88.10	88.63
粗蛋白 Crude protein (%DM)	32.96	32.84	32.59	32.88	32.69
粗脂肪 Crude lipid(%DM)	7.09	7.31	7.17	7.48	7.38
粗灰分 Crude ash (%DM)	6.05	6.00	5.93	5.98	5.96
总能 Gross energy(MJ/g)	20.19	19.84	19.89	19.91	19.90

注:1. 由云南昆明田园有限公司提供。豆粕:水分 10.65%,粗蛋白 50.38%,粗脂肪 0.68%;次粉:水分 12.65%,粗蛋白 18.28%,粗脂肪 0.86%

2. 维生素预混料(g/kg): V_A , 2; V_{D_3} , 0.03; V_E , 30; V_K , 3; $V_{B_{12}}$, 0.02; 盐酸硫胺, 8; 核黄素, 11; 盐酸吡哆醇, 8; 抗坏血酸, 50; 生物素, 0.1; 烟酸, 30; 泛酸钙, 32; 肌醇, 25

1. Supplied by Kunming Tianyuan Feed Co., Ltd.: Soybean meal: moisture 10.65%, crude protein 50.38%, crude lipid 0.68%; Wheat shorts, moisture 12.65%, crude protein 18.28%, crude lipid 0.86%

2. Vitamin premix (g/kg): V_A , 2; V_{D_3} , 0.03; V_E , 30; V_K , 3; $V_{B_{12}}$, 0.02; Thiamine hydrochloride, 8; Riboflavin, 11; Pyridoxine HCl, 8; Ascorbic acid, 50; Biotin, 0.1; Niacin acid, 30; Pantothenic acid, 32; Inositol, 25

3. 矿物质预混料 Mineral premix(g/kg): $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 180; KI, 1; $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 260; $\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 180; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 25; $\text{Na}_2\text{Se}_2\text{O}_3$, 0.01; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 180; $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.75

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

项目 Items	组别 Diets				
	0	25%	50%	75%	100%
月桂酸 C12:0	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
豆蔻酸 C14:0	0.19	0.19	0.19	0.19	0.18
软脂酸 C16:0	11.77	11.02	10.34	9.67	8.96
硬脂酸 C18:0	4.13	5.44	6.63	7.79	9.02
花生酸 C20:0	0.19	0.22	0.24	0.26	0.28
油酸 C18:1n-9	23.02	22.34	21.72	21.11	20.48
亚油酸 C18:2n-6	53.97	50.84	48.00	45.21	42.28
亚麻酸 C18:3n-3	6.54	9.73	12.62	15.45	18.43
花生一烯酸 C20:1n-9	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18
n-3/n-6	0.12	0.19	0.26	0.34	0.44

司生产)中将饲料挤压成直径为 1.0 mm 的条状, 40℃ 恒温干燥 12 h, 置于-20℃ 冰箱保存备用。

1.2 实验动物及饲养管理

实验用草鱼由云南省玉溪市元江县鱼种技术推广站提供, 实验于云南农业大学动物科学技术学院水产养殖实验室进行。采用室内网箱养殖, 养殖用水为曝气除氯自来水。实验前, 先将草鱼幼鱼用商业饲料暂养 2 周以适应养殖环境。

实验开始时将草鱼禁食 24 h, 然后选择初始平均体重为(5.80±0.01) g、体长为(6.41±0.11) cm 草鱼幼鱼 600 尾, 随机分于 15 个养殖网箱(0.9 m×0.9 m×1.0 m), 5 个处理组, 每组 3 个重复, 每网箱 40 尾鱼进行实验。养殖周期为 10 周, 早晚饱食投饵 2 次(07:00, 17:00)。整个养殖实验期间连续充氧, 自然光照, 水温保持在 24~26℃。

1.3 样品收集

养殖实验开始时, 随机挑取草鱼幼鱼 30 尾置于-20℃ 冰箱保存备用。养殖实验结束后, 禁食 24 h, 对每个重复组草鱼进行计数并称重。从每网箱中随机抽取 8 尾草鱼, 用丁香酚(1:10000)麻醉, 从尾静脉用注射器采集血液, 血清置于普通离心管, 血浆置于抗凝剂肝素钠离心管中, 4℃、4000 r/min 离心 10 min, 取得血清、血浆上清液, 置于-80℃ 冰箱保存待测。草鱼采血后在冰盘上解剖, 取完整肝胰脏、肠道, 迅速置于密封袋中, -80℃ 下保存。另外, 每组再处死 4 条鱼进行全鱼鱼体成分分析。

1.4 分析测定

鱼体和饲料粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分测定参照

AOAC 测定方法。粗蛋白采用凯氏定氮法(N×6.25); 粗脂肪采用索氏抽提法; 粗灰分采用马福炉 550℃ 灼烧法(16 h); 总能采用氧弹式测量热仪(PARR6300, 美国)测定。饲料水分采用 103℃ 常压烘箱干燥法(16 h)测定; 鱼体水分采用冷冻干燥机(FD-1C-50, 北京博医康实验仪器有限公司)测定。饲料脂肪酸组成成分采用高效气相色谱仪(GC-2014, 日本岛津公司)测定。

血浆、肝胰脏谷氨酸脱氢酶(GDH)采用固相夹心酶联免疫吸附法(ELISA 试剂盒)测定, 购自 R&D 公司。其他血液、肝胰脏和肠道生理生化指标的测定, 均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行。测定指标包括胰蛋白酶、二糖酶、脂肪酶(LPS)、淀粉酶(AMS)、甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、尿素氮(BUN)、天门冬氨酸氨基转移酶(AST)、丙氨酸氨基转移酶(ALT)、谷氨酰转移酶(GGT)、碱性磷酸酶(ALP)、一氧化氮(NO)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、谷胱甘肽还原酶(GR)、总抗氧化能力(TAC)、丙二醛(MDA)以及总蛋白等。低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)采用 Friedewald 等(1972)公式计算得到。匀浆液的制备, 准确称取一定量的肝脏、肠道组织, 用 0.87% 的生理盐水按质量体积比 1:9 进行匀浆, 4℃ 下 4000 r/min 离心 12 min。详细操作见南京生物工程研究所提供的试剂盒说明书。

1.5 计算与统计分析

增重率(WGR)=(末重-初重)/初重

日增重系数(DGC, %/d)=

$$100 \times (\text{末重}^{1/3} - \text{初重}^{1/3}) / \text{饲养天数}$$

摄食量(FI, g/fish)=

$$\text{采食饲料} / (\text{初始尾数} + \text{终末尾数}) / 2$$

平均代谢体重(MBW)=

$$[\text{初重}(\text{g})/1000]^{0.75} + [\text{末重}(\text{g})/1000]^{0.75} / 2$$

摄食率(FR, g/kg MBW/d)=

$$\text{摄食量} / \text{平均代谢体重} / \text{饲喂天数}$$

饲料系数(FCR)=

$$\text{采食干重饲料重}(\text{g}) / \text{鱼体湿增重}(\text{g})$$

蛋白质效率(PER, %)=

$$100 \times \text{鱼体湿增重}(\text{g}) / \text{采食蛋白重}(\text{g})$$

成活率(SR, %)=100×终末尾数/初始尾数

表中所有数据均表示平均值±标准误(Mean±SE)。

统计分析前所有百分率均先经 Arcsine 转换。使用单因素方差分析(One-way ANOVA), 当组间差异显著时($P < 0.05$), 用 Duncan's 检验进行多重比较。所有统计分析均采用 SPSS 17.0 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 橡胶籽油替代豆油对草鱼生长性能的影响

养殖实验期间,各处理组草鱼成活率为95%~100%,不同处理组成活率无显著性差异(表3)。随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼末重、增重率和日增重系数呈下降趋势,其中,100%替代组末重、增重率和日增重系数显著低于0~50%替代组($P<0.05$)。随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼饲料系数呈先下降后上升的趋势,其中,25%替代组饲料系数最低,显著低于50%~100%替代组($P<0.05$);25%替代组蛋白质效率最高,显著高于其他处理组($P<0.05$)。

2.2 橡胶籽油替代豆油对草鱼消化酶活性的影响

随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼肠道淀粉酶和二糖酶活性呈下降趋势,其中,100%替代组肠道淀粉酶活性显著低于对照组和25%替代

组($P<0.05$),100%替代组肠道二糖酶活性显著低于对照组($P<0.05$)(表4)。随着饲料中橡胶籽油替代比例的提高,草鱼肠道胰蛋白酶和脂肪酶活性呈先上升后下降的趋势,其中,50%替代组肠道胰蛋白酶活性最高,显著高于对照组、75%和100%替代组($P<0.05$),25%替代组肠道脂肪酶活性最高,显著高于其他处理组($P<0.05$)。

0~50%替代组草鱼肝胰脏胰蛋白酶活性显著高于75%和100%替代组($P<0.05$)。0~50%替代组肝胰脏淀粉酶活性显著低于75%和100%替代组($P<0.05$)。对照组草鱼肝胰脏二糖酶活性显著高于其他替代组($P<0.05$)。

2.3 橡胶籽油替代豆油对草鱼血脂水平的影响

25%~100%替代组草鱼血清TC、HDL-C含量显著低于对照组($P<0.05$),50%和100%替代组血清LDL-C含量显著低于对照组($P<0.05$)(表5)。对照组血清TG、LDL-C/HDL-C与其他替代组相比无显

表3 橡胶籽油替代豆油对草鱼生长性能的影响

Tab.3 Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on growth performance of *C. idellus*

项目 Items	组别 Diets				
	0	25%	50%	75%	100%
末重 FW (g)	29.86±0.23 ^a	27.25±0.61 ^{ab}	27.20±0.14 ^{ab}	24.69±0.55 ^{bc}	23.56±0.66 ^c
增重率 WGR	4.15±0.04 ^a	3.70±0.10 ^{ab}	3.70±0.04 ^{ab}	3.28±0.07 ^{bc}	3.11±0.10 ^c
日增重系数 DGC (%/d)	1.87±0.02 ^a	1.73±0.03 ^{ab}	1.73±0.01 ^{ab}	1.60±0.03 ^{bc}	1.54±0.04 ^c
摄食量 FI (g/fish)	36.91±1.44 ^a	30.44±0.59 ^{ab}	34.77±0.47 ^{ab}	30.72±0.83 ^{ab}	28.27±0.87 ^b
摄食率 FR (g/kg MBW/d)	11.36±0.80	9.88±0.32	11.29±0.13	10.55±0.14	9.97±0.15
饲料系数 FCR	1.54±0.07 ^{ab}	1.42±0.04 ^b	1.62±0.01 ^a	1.62±0.01 ^a	1.59±0.01 ^a
蛋白质效率 PER (%)	1.99±0.09 ^b	2.15±0.06 ^a	1.90±0.01 ^c	1.87±0.01 ^c	1.93±0.01 ^c
成活率 SR (%)	97.5±1.40	96.3±2.20	95.0±1.40	98.8±0.70	100.0±0.00

注:同行上标不同字母代表显著差异($P<0.05$),下同

Notes: Means in the same row with different upper letter indicated significant difference ($P<0.05$). The same as below

表4 橡胶籽油替代豆油对草鱼肠道和肝胰脏消化酶活性的影响

Tab.4 Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on intestine and hepatopancreas digestive enzyme activities of *C. idellus*

项目 Items	组别 Diets				
	0	25%	50%	75%	100%
肠道 Intestine					
胰蛋白酶 Trypsin (U/μg protein)	3.05±0.03 ^b	3.77±0.02 ^{ab}	4.02±0.15 ^a	3.26±0.06 ^b	2.50±0.08 ^c
脂肪酶 Lipase (U/mg protein)	8.16±0.67 ^b	12.62±1.13 ^a	7.79±0.91 ^{bc}	4.61±0.20 ^{cd}	2.94±0.27 ^d
淀粉酶 Amylase (U/mg protein)	0.31±0.01 ^a	0.26±0.01 ^b	0.19±0.01 ^c	0.19±0.01 ^c	0.18±0.00 ^c
二糖酶 Disaccharidase (U/g protein)	8.25±0.74 ^a	4.98±0.08 ^b	5.08±0.22 ^b	4.53±0.26 ^b	3.53±0.14 ^b
肝胰脏 Hepatopancreas					
胰蛋白酶 Trypsin (U/μg protein)	1.38±0.01 ^a	1.31±0.15 ^a	1.27±0.06 ^a	0.62±0.06 ^b	0.58±0.06 ^b
淀粉酶 Amylase (U/mg protein)	0.37±0.02 ^b	0.38±0.01 ^b	0.35±0.03 ^b	0.49±0.01 ^a	0.47±0.01 ^a
二糖酶 Disaccharidase (U/g protein)	24.70±0.93 ^a	11.45±0.68 ^{bc}	8.21±0.49 ^c	12.37±0.17 ^b	12.16±1.51 ^{bc}

表 5 橡胶籽油替代豆油对草鱼血脂水平的影响

Tab.5 Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on serum lipid levels of *C. idellus*

项目 Items	0	25%	50%	75%	100%
甘油三酯 TG (mmol/L)	3.06±0.10 ^{ab}	2.80±0.05 ^b	2.95±0.07 ^{ab}	3.70±0.03 ^a	3.39±0.07 ^{ab}
总胆固醇 TC (mmol/L)	8.42±0.20 ^a	6.34±0.30 ^b	6.45±0.08 ^b	6.54±0.29 ^b	6.61±0.51 ^b
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C (mmol/L)	5.20±0.30 ^a	3.30±0.14 ^c	4.15±0.03 ^b	3.78±0.18 ^{bc}	4.23±0.15 ^b
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C (mmol/L)	2.62±0.07 ^a	2.48±0.30 ^{ab}	1.71±0.04 ^b	2.03±0.11 ^{ab}	1.71±0.28 ^b
LDL-C/HDL-C	0.51±0.04 ^{ab}	0.76±0.10 ^a	0.41±0.01 ^b	0.57±0.09 ^{ab}	0.40±0.05 ^b

著差异($P>0.05$)。

2.4 橡胶籽油替代豆油对草鱼蛋白质代谢的影响

随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼血浆总蛋白含量呈上升趋势,其中,75%替代组血浆总蛋白含量显著高于对照组和25%替代组($P<0.05$)。血浆BUN含量呈下降趋势,其中,100%替代组显著低于其他处理组($P<0.05$)(表6)。随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼血浆GGT活性呈先上升后下降的趋势,其中,50%替代组血浆GGT活性最高,显著高于对照组、75%和100%替代组($P<0.05$)。血浆GDH活性呈先下降后上升的趋势,其中,50%替代组血浆GDH活性最低,显著低于对照组、75%和100%替代组($P<0.05$)。各实验组血浆ALT活性无显著差异($P>0.05$)。50%替代组血浆AST活力显著高于对照组和75%替代组($P<0.05$)。

随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼肝胰脏GGT和GDH活性呈下降趋势,其中,100%替代组肝胰脏GGT活性显著低于对照组和25%替代组($P<0.05$),100%替代组肝胰脏GDH活性显著低于

对照组、25%和50%替代组。此外,随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼肝胰脏AST、ALT活性呈先下降后上升的趋势,其中,25%替代组肝胰脏AST、ALT活性最低,显著低于对照组和100%替代组($P<0.05$)。

2.5 橡胶籽油替代豆油对草鱼抗氧化功能的影响

随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例的提高,草鱼血浆TAC活性呈上升趋势,其中,100%替代组血浆TAC活性显著高于对照组和25%替代组($P<0.05$)。血浆MDA含量呈下降趋势,其中,100%替代组血浆MDA含量显著低于对照组和25%替代组($P<0.05$)(表7)。不同处理组草鱼血浆NO、GR活性无显著差异($P>0.05$)。对照组血浆GSH-Px活性最高,显著高于其他替代组($P<0.05$)。25%替代组血浆POD活性最低,显著低于其他替代组($P<0.05$)。对照组血浆CAT活性显著低于50%和100%替代组($P<0.05$)。

随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例提高,草鱼肝胰脏MDA含量呈下降趋势,其中,100%替代组肝胰脏MDA含量显著低于其他处理组($P<0.05$)。75%替

表 6 橡胶籽油替代豆油对草鱼蛋白质代谢指标的影响

Tab.6 Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on protein metabolism indices of *C. idellus*

项目 Items	组别 Diets				
	0	25%	50%	75%	100%
血浆 Plasma					
总蛋白 Total protein (g/L)	36.55±0.55 ^c	42.73±0.22 ^b	50.70±1.51 ^a	52.56±1.73 ^a	48.91±0.94 ^a
尿素氮 BUN (mmol/L)	2.66±0.11 ^a	2.88±0.06 ^a	2.77±0.18 ^a	3.09±0.12 ^a	2.02±0.12 ^b
天门冬氨酸氨基转移酶 AST (U/ml)	17.87±0.17 ^{bc}	22.05±0.36 ^{abc}	29.28±2.70 ^a	14.75±0.29 ^c	26.32±1.61 ^{ab}
丙氨酸氨基转移酶 ALT (U/ml)	13.03±0.11	15.60±1.45	14.52±0.67	14.38±0.18	13.30±0.33
谷氨酰转移酶 GGT (U/ml)	1.63±0.13 ^c	4.65±0.54 ^a	5.12±0.23 ^a	3.03±0.14 ^b	1.63±0.13 ^c
谷氨酸脱氢酶 GDH (U/ml)	7.28±0.90 ^b	3.46±0.31 ^c	1.77±0.33 ^c	6.74±0.64 ^b	10.27±0.14 ^a
碱性磷酸 ALP (U/dl)	11.51±0.65 ^a	7.46±0.13 ^b	7.54±0.36 ^b	6.39±0.14 ^b	6.70±0.22 ^b
肝胰脏 Hepatopancreas					
天门冬氨酸氨基转移酶 AST (U/μg protein)	34.86±2.75 ^a	19.54±2.12 ^b	30.85±3.52 ^{ab}	35.96±3.07 ^a	41.68±0.37 ^a
丙氨酸氨基转移酶 ALT (U/μg protein)	24.63±0.76 ^a	5.54±0.45 ^c	7.12±0.40 ^c	7.58±0.87 ^c	13.45±2.48 ^b
谷氨酰转移酶 GGT (U/mg protein)	0.89±0.10 ^a	0.52±0.08 ^b	0.43±0.04 ^{bc}	0.20±0.05 ^c	0.15±0.01 ^c
谷氨酸脱氢酶 GDH (U/mg protein)	88.68±0.68 ^a	71.58±5.59 ^a	39.90±7.61 ^b	27.35±1.70 ^{bc}	16.93±0.50 ^c
碱性磷酸酶 ALP (U/g protein)	74.71±7.11 ^a	64.97±8.11 ^{ab}	49.91±2.98 ^b	48.76±1.13 ^b	51.70±1.45 ^{ab}

表7 橡胶籽油替代豆油对草鱼抗氧化功能的影响

Tab.7 Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on antioxidant capacities of *C. idellus*

项目 Items	组别 Diets				
	0	25%	50%	75%	100%
血浆 Plasma					
一氧化氮 NO (mmol/L)	0.10±0.01	0.12±0.01	0.09±0.01	0.11±0.01	0.10±0.01
过氧化氢酶 CAT (U/ml)	3.79±0.92 ^b	5.56±0.70 ^b	11.52±1.33 ^a	6.91±1.02 ^b	11.52±1.17 ^a
过氧化物酶 POD (U/ml)	33.11±0.64 ^b	25.34±1.02 ^c	35.56±0.77 ^b	102.8±1.41 ^a	108.4±1.44 ^a
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px (U/ml)	0.31±0.01 ^a	0.22±0.00 ^b	0.26±0.01 ^b	0.25±0.01 ^b	0.25±0.01 ^b
谷胱甘肽还原酶 GR (U/ml)	28.94±1.86	26.22±2.85	26.72±1.15	25.72±2.56	28.93±3.71
总抗氧化能力 TAC (U/ml)	5.68±0.29 ^b	5.80±0.36 ^b	6.42±0.29 ^{ab}	7.28±0.07 ^a	7.29±0.12 ^a
丙二醛 MDA (μmol/L)	7.21±0.17 ^a	7.12±0.44 ^a	6.73±0.22 ^{ab}	6.54±0.22 ^{ab}	5.77±0.33 ^b
肝胰脏 Hepatopancreas					
过氧化氢酶 CAT (U/μg prot)	19.02±0.43 ^b	21.94±0.99 ^{ab}	18.97±1.41 ^b	23.83±1.12 ^a	26.07±0.28 ^a
过氧化物酶 POD (U/μg prot)	4.74±0.13 ^a	3.50±0.20 ^c	3.92±0.18 ^{bc}	4.63±0.19 ^{ab}	4.23±0.10 ^{abc}
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px (U/μg prot)	1.67±0.04 ^b	1.68±0.02 ^{ab}	2.02±0.16 ^a	1.87±0.05 ^{ab}	1.65±0.03 ^b
谷胱甘肽还原酶 GR (U/mg prot)	53.25±0.74 ^a	18.71±0.66 ^d	22.94±0.91 ^d	41.41±3.05 ^b	32.31±1.79 ^c
总抗氧化能力 TAC (U/μg prot)	1.39±0.08 ^a	0.79±0.10 ^b	0.82±0.10 ^b	1.44±0.03 ^a	1.04±0.14 ^{ab}
丙二醛 MDA (μmol/g prot)	1.75±0.08 ^a	1.75±0.02 ^a	1.64±0.09 ^a	1.60±0.09 ^a	1.09±0.02 ^b

代组 TAC 活性显著高于 25% 和 50% 替代组 ($P < 0.05$)。此外, 随着饲料中橡胶籽油替代豆油比例提高, 草鱼肝胰脏 GSH-Px 活性呈先上升后下降的趋势, 其中, 50% 替代组 GSH-Px 活性组最高, 显著高于对照组和 100% 替代组 ($P < 0.05$)。

25% 替代组肝胰脏 POD 活性最低, 显著低于对照组和 75% 替代组 ($P < 0.05$)。对照组肝胰脏 GR 活性显著高于其他替代组 ($P < 0.05$)。

2.6 橡胶籽油替代豆油对草鱼鱼体常规成分的影响

不同处理组草鱼鱼体水分、粗蛋白、粗脂肪含量无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 8)。仅 50% 替代组草鱼鱼体粗灰分含量显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 橡胶籽油替代豆油对草鱼生长性能的影响

本研究结果表明, 草鱼饲料中低比例橡胶籽油替代

豆油对草鱼生长性能无不良影响, 但当替代比例超过 50% 显著降低草鱼生长性能。这与文远红等 (2016) 棕榈油替代低比例大豆油对吉富罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 幼鱼生长性能无不良影响的研究结果相同。周继术 (2001) 研究发现, 罗非鱼主要需要 n-6 系列脂肪酸, n-3 系列脂肪酸对罗非鱼营养作用不如 n-6 系列脂肪酸明显。而 Takeuchi 等 (1991) 研究发现, 草鱼对脂肪酸的需要量与鲤鱼 (*Cyprinus carpio*) 类似, 饲料中 n-3 系列与 n-6 系列必需脂肪酸的最适宜比值为 0.5~1:1。本研究中, 0~50% 替代组之间草鱼增重率、日增重系数无显著差异, 但随着橡胶籽油替代豆油比例的增加, 草鱼增重率、日增重系数呈下降趋势。这与王坤等 (2017) 橡胶籽油替代豆油不仅未降低虹鳟幼鱼的增重率和日增重系数, 反而蛋白质效率得到提高的研究结果不同, 并且也与 Nwokolo 等 (1989) 饲喂 8% 的橡胶籽油或玉米油对鸡平均日增重无显著影响的研究结果不同。而本研究中, 随着橡胶籽油替代豆油比例的增加, 草鱼饲料 n-3 系列与 n-6 系列脂肪酸比

表8 橡胶籽油替代豆油对草鱼鱼体常规成分的影响(%)

Tab.8 Effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on common body composition of *C. idellus* (%)

项目 Items	组别 Diets				
	0	25%	50%	75%	100%
水分 Moisture	69.39±0.19	68.64±0.18	69.14±0.45	68.44±0.16	69.07±0.06
粗蛋白 Crude protein	14.40±0.18	14.79±0.23	14.10±0.15	14.79±0.12	14.91±0.09
粗脂肪 Crude lipid	12.77±0.09	12.78±0.14	13.25±0.16	13.66±0.40	12.84±0.14
粗灰分 Crude ash	2.53±0.03 ^a	2.52±0.04 ^a	2.36±0.03 ^b	2.62±0.02 ^a	2.57±0.01 ^a

值不断增大, 趋于1:2, 说明出现这种现象的原因不仅是由脂肪酸的构成和实验对象不同所引起的, 而且更可能同橡胶籽油中的某些抗营养因子有关(如橡胶烃), 需进一步研究。

3.2 橡胶籽油替代豆油对草鱼消化酶活性的影响

研究表明, 不同食性鱼类会有不同消化酶活性(Buchet *et al*, 2000), 消化酶种类及数量与鱼的食性密切相关(Prejs *et al*, 1997; Hofer *et al*, 1981)。Baragi 等(1986)在研究条纹狼鲈(*Morone saxatilis*)、Pedersen 等(1987)在研究大西洋鲱鱼(*Clupea harengus*)幼鱼消化酶活性中均发现, 鱼类脂肪酶活性大小与所摄取的食物性质相关联。本研究中, 随着橡胶籽油替代豆油比例的提升, 草鱼肠道脂肪酶活力呈先上升后下降的趋势。这与张宝龙等(2016)用不同比例豆油替代鱼粉对鲤鱼肠道脂肪酶的活性类似。此外, 对照组草鱼肠道淀粉酶和二糖酶活性均高于25%~100%替代组, 即橡胶籽油替代豆油抑制草鱼肠道淀粉酶和二糖酶的活性; 但肠道胰蛋白酶活力呈先上升后下降的趋势, 说明随着橡胶籽油替代豆油比例的增加, 橡胶籽油具有促进肠道胰蛋白酶的活性且呈先上升后下降的趋势。而相关研究表明淀粉酶、二糖酶在碳水化合物的水解过程中起重要作用。胰蛋白酶是消化蛋白质的主要酶之一, 可直接影响蛋白质在肠内的消化。但在实验配方中, 饲料油脂水平不发生变化, 仅油脂成分发生变化, 说明草鱼肠道消化酶活性变化是由饲料中脂肪酸组成成分发生变化造成的, 需进一步研究。实验结果还表明, 对照组草鱼肝胰脏胰蛋白酶活性显著高于75%和100%替代组, 而在正常情况下, 肉食性鱼类蛋白酶活性最高, 草食性鱼类蛋白酶活性最低, 其强弱顺序为肉食性>杂食性>滤食性>草食性(Hofer *et al*, 1981)。

3.3 橡胶籽油替代豆油对草鱼血脂水平的影响

研究表明, 血脂水平是反映体内脂肪代谢水平的重要生理指标, 高血脂会引起机体脂肪代谢紊乱、细胞损伤, 进而影响机体生长发育, 而在多种鱼类的研究中已证实, 血液胆固醇与动脉粥样硬化变化之间具有相关关系(García-Garrido *et al*, 1993; Gong *et al*, 2011; Farrelli *et al*, 1986)。本研究结果显示, 25%~100%替代组草鱼血清总胆固醇含量显著低于对照组, 说明橡胶籽油替代豆油具有降低草鱼血清总胆固醇、防止动脉粥样硬化作用。这与刘超然等(1983)橡胶籽油具有降低猕猴(*Macaca mulatta*)血脂

胆固醇的研究结果一致。胶籽油中亚油酸与亚麻酸分别占脂肪酸的40%和20%(Nwokolo, 1996), 与其他植物油相比, 亚麻酸含量特别高。而多不饱和脂肪酸的降脂原理, 与增加血脂排泄和减少血脂合成、调整血脂在血液及其他组织中的分配利用、改变脂蛋白的结构等有关(李运珊等, 1994)。25%~100%替代组草鱼血清 HDL-C 含量显著低于对照组, 说明橡胶籽油具有降低 HDL-C 的作用。这与文远红等(2016)棕榈油替代50%、100%豆油对吉富罗非鱼幼鱼血清 HDL-C 的研究结果相同。而文远红等(2016)研究表明, 血清 HDL-C 水平反应肝脏合成高密度脂蛋白的能力, 它可将总胆固醇、甘油三酯等物质从外周组织运输到肝脏分解, 防止总胆固醇在血管壁的沉积。因此, 实验中造成 HDL-C 含量下降的原因很可能与总胆固醇含量的下降有关。而 LDL-C/HDL-C 可反应胆固醇的转运情况, 也是动脉粥样硬化的衡量指标, 实验结果显示, 随着橡胶籽油替代豆油比例的提高, 25%~100%替代组草鱼血清 LDL-C/HDL-C 与对照组无显著差异, 说明橡胶籽油对胆固醇逆向转运无显著影响。

3.4 橡胶籽油替代豆油对草鱼蛋白质代谢的影响

研究表明, 血液总蛋白是反映动物营养状况的指标, 良好的营养可使血液总蛋白维持在较高水平, 当日粮蛋白营养不足时总蛋白含量下降(Mommsen *et al*, 1980)。而 GGT 是谷氨酸循环的关键酶, 为蛋白质生物合成提供原料, GGT 活性升高表明细胞对氨基酸需求量增多, 提高了蛋白质生物合成(姜春英等, 1998)。研究表明, 各处理组草鱼血浆总蛋白含量显著高于对照组, 即橡胶籽油替代豆油促进了草鱼对饲料蛋白质的利用; 并且随着胶籽油替代豆油比例的提高, 草鱼血浆 GGT 活性呈先上升后下降趋势, 其中, 对照组与100%替代组活性差异不显著, 说明橡胶籽油具有促进草鱼体内蛋白质合成的作用, 但100%替代时作用不明显。GDH 具有固氮功能, 是氨基酸代谢过程中非必需氨基酸合成的关键酶, 参与蛋白质生物合成(José *et al*, 2006), 研究表明, 对照组草鱼血浆 GDH 活性显著低于100%替代组, 说明橡胶籽油替代100%豆油时, 促进了非必需氨基酸的蛋白质生物合成。因此, 实验中造成 GGT、GDH 对蛋白质合成差异的原因可能是由它们所介导合成的蛋白质不同所引起的, 需进一步研究。转氨酶是动物体氨基酸代谢过程中的重要酶类, 正常情况下血液中转氨酶活性较低, 当动物体受到各种营养不良或胁迫作用尤其是肝脏受损时, 往往导致血液中转氨酶活性升高

(Barton *et al.*, 1991)。本研究结果显示, 橡胶籽油替代豆油显著影响草鱼血浆 AST、肝胰脏 AST 和 ALT 的活性。这与王坤等(2017)橡胶籽油替代豆油对虹鳟幼鱼蛋白质代谢的研究结果不同, 而造成这种现象的原因可能是由实验误差、实验动物不同所形成的。但总体来说, 橡胶籽油替代 25%豆油对草鱼蛋白质代谢有一定的促进作用, 而替代 50%~100%豆油对蛋白质代谢没有明显的负面效应。

3.5 橡胶籽油替代豆油对草鱼抗氧化功能的影响

研究表明, 抗氧化指标反映了机体健康状况, 它由两部分组成, 一是非酶系统, 主要包括谷胱甘肽、维生素 C、维生素 E、一氧化碳等; 二是酶系统, 主要包括过氧化氢酶、过氧化物酶等(王俊锋等, 2014)。研究结果显示, 橡胶籽油替代豆油使草鱼血浆 TAC 能力呈上升趋势, 但不同处理组草鱼 NO 含量无显著差异, 说明橡胶籽油替代豆油提升了草鱼总抗氧化能力, 但未影响机体过氧化反应程度, 造成这种现象的原因可能是饲料中的油脂不仅能提供脂肪酸, 还能提供抗氧化剂, 影响机体抗氧化能力(Menoyo *et al.*, 2005)。CAT 是脊椎动物主要保护系统, 催化 H_2O_2 分解成水, 保护机体免受自由基损伤; POD 是将组织中低浓度过氧化物进一步催化分解, 从而降低自由基的损害作用(Hayes *et al.*, 1995)。研究结果显示, 橡胶籽油替代豆油显著影响了草鱼血浆 CAT、POD 活力, 其中, 50%和 100%替代组 CAT 活力显著高于其他处理组, 75%和 100%替代组 POD 活力显著高于对照组, 说明橡胶籽油替代豆油具有促进 H_2O_2 分解的作用, 降低了自由基对机体的损伤。而 MDA 是脂质过氧化反应的主要代谢产物, 其含量的降低实际上是脂质过氧化物降低的表现(Martínez-Álvarez *et al.*, 2002)。实验中草鱼血浆和肝胰脏 MDA 含量随橡胶籽油替代比例的提升呈下降趋势, 在 100%替代时 MDA 含量最低, 显著低对照组。这也进一步说明, 橡胶籽油中不饱和脂肪酸有助于提升草鱼的抗氧化能力, 在 100%替代时效果最佳。

4 结论

综上所述, 草鱼饲料中橡胶籽油替代 25%~50%豆油对草鱼生长性能、饲料利用率、消化酶活性、血脂水平、抗氧化功能、蛋白质代谢指标均无不良影响; 但替代超过 50%时显著降低草鱼生长性能和消化酶活性。由此可知, 草鱼饲料中橡胶籽油可替代 25%~50%的豆油, 即橡胶籽油在草鱼饲料中的适宜添加量为 1.4%~2.7%。

参 考 文 献

- Baragi V, Lovell R. Digestive enzyme activities in striped bass from first feeding through larva development. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1986, 115(3): 478-484
- Barton BA, Iwama GK. Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response and effects of corticosteroids. *Annual Review of Fish Diseases*, 1991, 1(1): 3-26
- Buchet V, Infante JL Z, Cahu CL. Effect of lipid level in a compound diet on the development of red drum (*Sciaenops ocellatus*) larvae. *Aquaculture*, 2000, 184(3): 339-347
- Farrell AP, Saunders RL, Freeman HC, *et al.* Arteriosclerosis in atlantic salmon: Effects of dietary cholesterol and maturation. *Arteriosclerosis*, 1986, 6(4): 453-461
- Friedewald WT, Levy RI, Fredrickson DS. Estimation of the concentration of low-density lipoprotein cholesterol in plasma, without use of the preparative ultracentrifuge. *Clinical Chemistry*, 1972, 18(6): 499-502
- García-Garrido L, Muñoz-Chápuli R, De AV. Coronary arteriosclerosis in dogfish (*Scyliorhinus canicula*): An assessment of some potential risk factors. *Arterioscler Thromb*, 1993, 13(6): 876-885
- Gong BQ, Farrell AP. A method of culturing coronary artery explants for measuring vascular. *Canadian Journal of Zoology*, 2011, 73(4): 623-631
- Guo ZY, Liu XQ, Wang T, *et al.* Major components and change of cyanide in Hainan rubber seeds. *Food Science*, 2009, 30(20): 359-362 [郭志勇, 刘小琴, 王铜, 等. 海南橡胶籽主要成分及氰化物变迁分析. *食品科学*, 2009, 30(20): 359-362]
- Hayes JD, Strange RC. Potential contribution of the glutathione s-transferase supergene family to resistance to oxidative stress. *Free Radical Research*, 1995, 22(3): 193-207
- Hofer R, Schiemer F. Proteolytic activity in the digestive tract of several species of fish with different feeding habits. *Oecologia*, 1981, 48(3): 342-345
- Hu SX, Wang JT, Han T, *et al.* Analysis of the source and prospect of aquatic feed fat. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2012, 18(9): 183-185 [胡水鑫, 王驥腾, 韩涛, 等. 水产饲料脂肪来源及前景分析. *安徽农学通报*, 2012, 18(9): 183-185]
- Jiang CY, Ding K, Liu XX, *et al.* Study on the enzyme markers in colorectal cancer tissues. *Chinese Journal of Surgery of Integrated Traditional and Western Medicine*, 1998(6): 16-19 [姜春英, 丁克, 刘贤锡, 等. 大肠癌组织酶标志物研究. *中国中西医结合外科杂志*, 1998(6): 16-19]
- José FBM, Licia ML, Isidoro M, *et al.* Effects of dietary levels of protein on nitrogenous metabolism of *Rhamdia quelen*, (Teleostei: Pimelodidae). *Comparative Biochemistry and Physiology Part A Molecular and Integrative Physiology*, 2006, 145(2): 181-187
- Li YS, Liu CR, Wang MY. Crowd census and clinical observation of the role of rubber seed oil in reducing blood

- lipid. *Journal of Clinical Cardiology*, 1994(1): 24–26 [李运珊, 刘超然, 王明英. 橡胶种子油降血脂作用的人群普查与临床观察. *临床心血管病杂志*, 1994(1): 24–26]
- Liu CR, Li YZ, Chen GZ, *et al.* Mechanism of hypolipidemic effect of rubber seed oil-its effect on cholesterol tolerant test in rhesus monkey. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 1983, 4(2): 35–38 [刘超然, 李运洲, 陈国珍, 等. 橡胶种子油降血脂原理的研究—对猕猴胆固醇耐量试验的影响. *热带作物学报*, 1983, 4(2): 35–38]
- Martínez-Álvarez RM, Hidalgo MC, Domezain A, *et al.* Physiological changes of sturgeon *Acipenser naccarii* caused by increasing environmental salinity. *Journal of Experimental Biology*, 2002, 205(23): 3699–3706
- Menoyo D, López-Bote CJ, Obach A, *et al.* Effect of dietary fish oil substitution with linseed oil on the performance, tissue fatty acid profile, metabolism, and oxidative stability of Atlantic salmon. *Journal of Animal Science*, 2005, 83(12): 2853–2862
- Mommsen TP, French CJ, Hochachka PW. Sites and patterns of protein and amino acid utilization during the spawning migration of salmon. *Canadian Journal of Zoology*, 1980, 58(10): 1785–1799
- Nwokolo E. Rubber (*Hevea brasiliensis*, L) seed, oil and meal. *Food and Feed from Legumes and Oilseeds*, 1996, 333–344
- Nwokolo E, Yang XJ, Tang NS. Effects of rubber seed oil as the use of chicken feed. *World Tropical Agriculture Information*, 1989, 28(4): 4–7 [Nwokolo E, 杨湘江, 汤汝松. 橡胶籽油作为养鸡饲料的利用. *世界热带农业信息*, 1989, 28(4): 4–7]
- Pedersen BH, Nilssen EM, Hjelmeland K. Variations in the content of trypsin and trypsinogen in larval herring (*Clupea harengus*) digesting copepod nauplii. *Marine Biology*, 1987, 94(2): 171–181
- Prejs A, Blaszczyk M. Relationships between food and cellulase activity in freshwater fishes. *Journal of Fish Biology*, 1977, 11(5): 447–452
- Takeuchi T, Watanabe K, Yong WY, *et al.* Essential fatty acids of grass carp *ctenopharyngodon idella*. *Nippon Suisan Gakkaishi = Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 1991, 57(3): 467–473
- Wang JF, Zhang P. Effects of fat powder on antioxidation property, protein metabolism and thyroid hormone in black-boned chicken with black feather. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(4): 119–122 [王俊锋, 章平. 脂肪粉对黑凤鸡抗氧化性能、蛋白质代谢及甲状腺激素水平的影响. *河南农业科学*, 2014, 43(4): 119–122]
- Wang K, Zhang X, Zhan GR, *et al.* Effects of using soy oil with rubber seed oil on growth performance, the blood and liver biochemical indexes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2017, 32(4): 1–9 [王坤, 张曦, 邓君明, 等. 橡胶籽油替代豆油对虹鳟幼鱼生长性能、血液及肝脏生化指标的影响. *云南农业大学学报(自然科学版)*, 2017, 32(4): 1–9]
- Wen YH, Mi HF, Zhang L, *et al.* Effects of soybean oil replacement by palm oil on growth performance, muscle nutritional composition and serum biochemical indexes of juvenile genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(3): 953–960 [文远红, 米海峰, 张璐, 等. 棕榈油替代大豆油对吉富罗非鱼幼鱼生长性能、肌肉营养组成和血清生化指标的影响. *动物营养学报*, 2016, 28(3): 953–960]
- Xing JJ, Vane HE, Li DF, *et al.* Effects of emulsification, fat encapsulation, and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(9): 2601–2609
- Yang LP, Qiao WW, Yang YM, *et al.* Effects of rubber plant seed oil on rat embryo development. *Shanghai Laboratory Animal Science*, 2003, 23(1): 26–28 [杨丽萍, 乔伟伟, 杨幼明, 等. 橡胶籽油对大鼠胚胎发育的影响. *上海实验动物科学*, 2003, 23(1): 26–28]
- Zhang BL, Qu M, Cheng ZY, *et al.* The influence of replacing fish meal with soybean oil on carp growth, immunity and digestive enzyme activities. *Feed Industry*, 2016, 37(20): 17–21 [张宝龙, 曲木, 程镇燕, 等. 饲料中豆油替代鱼粉对鲤鱼生长、免疫力及消化酶活性的影响. *饲料工业*, 2016, 37(20): 17–21]
- Zhao YH, Fan WP, Fan WB. Development and utilization of whole ingredients of rubber seed. *Tropical Agricultural Engineering*, 2013, 37(2): 46–49 [赵瀛华, 范武平, 范武波. 橡胶籽的全成分开发与利用. *热带农业工程*, 2013, 37(2): 46–49]
- Zheng YW, Yang XQ, Huang YB, *et al.* Study on preparation technology of conjugated linolenic acid of rubber seed oil by alkali catalytic isomerization. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(16): 253–258 [郑云武, 杨晓琴, 黄元波, 等. 橡胶籽油碱催化异构化合成共轭亚油酸的制备工艺研究. *食品工业科技*, 2016, 37(16): 253–258]
- Zhou JS. The effect of EFA n-6/n-3 rate and lipid level on the growth of hybrid tilapia (*T. autea* ♂ × *T. nilotica* ♀). Master's Thesis of Southwest Agricultural University, 2001, 41–42 [周继术. 必需脂肪酸 n-6/n-3 比例与油脂水平对奥尼罗非鱼生长的影响. *西南农业大学硕士研究生学位论文*, 2001, 41–42]

Effects of Replacing Soybean Oil with Rubber Seed Oil on Growth Performance, Digestive Enzyme Activities, and Partial Biochemical Indices of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*)

TU Youhuan, ZHANG Xi, TAO Linli, YANG Xiujuan, DENG Junming^①

(College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract This experiment was conducted to evaluate the effects of replacing soybean oil with rubber seed oil on growth performance, digestive enzyme activities, serum lipoprotein levels, protein metabolism indices and antioxidant capacities of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). Five isoproteic and isolipidic experimental diets were formulated with rubber seed oil replacing 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% of soybean oil (R0, R25, R50, R75, and R100), respectively. The results showed that the weight gain, daily gain coefficient in fish fed R0 and R50 diets were significantly higher than those in fish fed the R100 diet ($P < 0.05$). With increasing rubber seed oil replacement level, the feed coefficient first decreased and then increased, and the lowest value was observed in fish fed the R25 diet, which was significantly lower than that in fish fed the R50, R75, and R100 diets ($P < 0.05$). Conversely, protein efficiency first increased and then decreased, and the highest value was observed in fish fed the R25 diet, which was significantly higher than that in fish fed other diets ($P < 0.05$). With increasing rubber seed oil replacement level, intestinal trypsin and lipase (LPS) activity first increased and then decreased, and the highest values of intestinal LPS activity were observed in fish fed the R25 diet, which were significantly higher than that in fish fed other diets ($P < 0.05$). The highest values of intestinal trypsin activity were observed in fish fed the R50 diet, which were significantly higher than that in fish fed R0, R75, and R100 diets ($P < 0.05$). Hepatopancreas trypsin activity in fish fed R0 and R50 diets was significantly higher than that in fish fed R75 and R100 diets ($P < 0.05$). The serum total cholesterol (TC) level in fish fed R25, R50, R75, and R100 diets were significantly lower than that in fish fed the R0 diet ($P < 0.05$). With increasing rubber seed oil replacement level, hepatopancreas hepatic aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotransferase (ALT) activities first increased and then decreased, and the lowest value was observed in fish fed the R25 diet, which was significantly lower than that in fish fed R0 and R100 diets ($P < 0.05$). Further, plasma total antioxidant (TAC) capacity in fish fed R0 and R25 diets was significantly lower than that in fish fed R75 and R100 diets ($P < 0.05$). Conversely, plasma and hepatopancreas malondialdehyde (MDA) levels in fish fed the R0 diet were significantly higher than in fish fed the R100 diet ($P < 0.05$). These results indicated that replacing 25% to 50% of soybean oil with rubber seed meal had no obvious negative effects on growth performance, feed utilization rates, serum lipoprotein levels, protein metabolism indices, or antioxidant capacities, whereas replacing 50% of soybean oil with rubber seed oil may have depressed the growth performance and digestive enzyme activities of grass carp.

Key words *Ctenopharyngodon idellus*; Rubber seed oil; Soybean oil; Growth performance; Digestive enzyme activities; Antioxidant capacities

① Corresponding author: DENG Junming, E-mail: djunming@163.com