

鱼油基础饲料中添加不同抗氧化剂对虹鳟生长性能、脂蛋白水平和抗氧化功能的影响*

王恒志, 张 曦, 陶琳丽, 杨秀娟, 毕保良**, 邓君明**

(云南农业大学 动物科学技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要:【目的】研究鱼油基础饲料中添加乙氧基喹啉(EQ)和番茄红素(LCP)对虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)生长性能、脂蛋白水平和抗氧化功能的影响,以筛选虹鳟高脂饲料的适宜抗氧化剂。【方法】以鱼油为脂肪源,配制虹鳟基础饲料,并于基础饲料中分别添加0.02%EQ、LCP,配制出3种等氮等能饲料。选择均重为(29.4±0.1)g虹鳟270尾,随机分成3组(每组3个重复,每个重复30尾),进行8周饲养试验。【结果】(1)与对照组相比,EQ、LCP对虹鳟摄食率(FI)、日增重系数(DGC)均无显著影响($P>0.05$),但LCP组FI和DGC显著高于EQ组;同时,EQ、LCP均显著改善了饲料系数和蛋白质效率($P<0.05$),二组间该两项指标无显著差异。(2)添加EQ、LCP对胃蛋白酶、肠道和肝脏胰蛋白酶、肝脏淀粉酶活性均无显著影响($P>0.05$),两者均对肠道淀粉酶活性有负面影响;添加LCP显著提高了肝脏二糖酶活性($P<0.05$)。(3)与添加EQ相比,添加LCP显著降低了血清总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇/高密度脂蛋白胆固醇和肝脏总脂肪水平($P<0.05$)。(4)添加EQ、LCP均显著提高了虹鳟血浆过氧化物酶、谷胱甘肽过氧化物酶活性($P<0.05$);但LCP组血浆谷胱甘肽还原酶(GR)和肝脏GR、溶菌酶活性显著高于EQ组($P<0.05$)。【结论】鱼油基础饲料中添加EQ、LCP均能提高虹鳟抗氧化功能,但LCP作为抗氧化剂更有利于提高其生长性能和抗氧化功能。

关键词: 虹鳟; 乙氧基喹啉; 番茄红素; 生长性能; 抗氧化功能

中图分类号: S 963. 73

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X(2018)04-0655-08

Effects of Different Antioxidants Supplementation on the Growth Performance, Lipoprotein Levels and Antioxidant Function of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Fed Fish Oil-based Diets

WANG Hengzhi, ZHANG Xi, TAO Linli, YANG Xiujuan, BI Baoliang, DENG Junming

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

Abstract: [Purpose] To study the effects of ethoxyquin (EQ) and lycopene (LCP) supplementation on the growth performance, lipoprotein levels and antioxidant function of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed fish oil-based diets, in order to screen the suitable antioxidants for rainbow trout diets. [Method] Three isoproteic and isolipidic diets were formulated to contain 0, 0.02% eth-

收稿日期: 2017-09-05

修回日期: 2018-03-14

网络出版时间: 2018-07-26

*基金项目: 国家自然科学基金项目(31460693, 31760761); 云南省应用基础研究重点项目(2018FA018); 通威股份有限公司横向项目(TA2016A00)。

作者简介: 王恒志(1993—), 男, 山东聊城人, 在读硕士研究生, 主要从事水产动物营养与饲料研究。

E-mail: wanghengzhi2016@163.com

**通信作者 Corresponding authors: 毕保良(1977—), 男, 云南寻甸人, 硕士, 副教授, 主要从事鱼类生理学研究。E-mail: 1448151770@qq.com; 邓君明(1977—), 男, 江西宁都人, 博士, 教授, 主要从事水产动物营养与饲料研究。

E-mail: djunming@163.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201709013](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201709013)

oxyquin and 0.02% lycopene, respectively. Two hundred and seventy rainbow trout with average body weight of (29.4 ± 0.1) g were randomly divided into 3 groups (with 3 replicates of 30 fish each). [Result] (1) Supplementation with EQ and LCP had no significant influence on the feed intake and daily gain coefficient of rainbow trout ($P > 0.05$), FI and DGC in fish fed LCP diet were significantly higher than those in fish fed EQ diet. Supplementation with EQ and LCP significantly improved feed coefficient rate and protein efficiency ratio ($P < 0.05$). There was no significant difference the two indexes between the two groups. (2) Supplementation with EQ and LCP had no significant effect on pepsin, intestinal and hepatic trypsin, hepatic amylase activities ($P > 0.05$). Supplementation with EQ and LCP had negative effects on the intestinal amylase activity. Supplementation with LCP significantly increased the activity of intestinal disaccharidase ($P < 0.05$). (3) Supplementation with LCP significantly reduced the serum total cholesterol, low density lipoprotein cholesterol, LDL-C/HDL-C and hepatic total fat content ($P < 0.05$). (4) Supplementation with EQ and LCP significantly improved the plasma peroxidase and glutathione peroxidase activity ($P < 0.05$). Compared with the EQ supplementation, the activity of plasma, liver glutathione reductase (GR) and hepatic lysozyme were significantly improved by LCP supplementation ($P < 0.05$). [Conclusion] It is concluded that the antioxidant capacity of rainbow trout is improved by ethoxyquin and lycopene supplementation. But lycopene as antioxidant was more conducive to improve its growth performance and antioxidant capacity.

Keywords: rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*); ethoxyquin; lycopene; growth performance; antioxidant function

虹鳟饲料中脂肪含量较高, 可达 17%~23%, 目前大多以鱼油为主要脂肪源。然而, 鱼油因其脂肪酸的高度不饱和性极易氧化变质, 产生大量的自由基、过氧化物(丙二醛等), 影响动物的生长性能及健康^[1]。因此, 饲料中需要添加抗氧化剂来防止鱼油氧化。目前, 在饲料中常添加乙氧基喹啉(ethoxyquin, EQ)防止油脂氧化^[2], 而 EQ 会在动物体内产生残留, 经食物链进入人体内并在体内积累, 造成肾功能损伤及组织结构变形等问题^[3]。2017 年 2 月 6 日, 欧盟宣布暂停在所有动物饲料添加剂中使用 EQ, 因此需要寻求新的天然抗氧化剂。

番茄红素(lycopene, LCP)是一种新型的生物抗氧化剂, 是由 11 个共轭双键及 2 个非共轭碳—碳双键构成的高度不饱和直链型烃类化合物, 是目前已知的自然界中最强的抗氧化剂之一, 具有增强机体免疫力、提高抗氧化能力等作用^[4]。孟好等^[5]研究发现: 在鲫鱼饲料中添加 LCP 有利于其生长并显著提高了其抗氧化能力。目前, LCP 在水产饲料添加剂方面的应用鲜有报道。本试验在虹鳟鱼油基础饲料中分别添加 EQ、LCP, 研究对虹鳟生长性能、消化酶活性、

脂蛋白水平和抗氧化功能的影响, 为 LCP 在水产饲料添加剂中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料的制作

试验饲料以鱼粉、豆粕、大豆浓缩蛋白、菜籽粕、棉籽粕、橡胶籽仁饼为蛋白源, 鱼油为脂肪源, 配制虹鳟基础饲料(表 1), 并在基础饲料中分别添加 0.02% EQ、LCP, 共配制 3 种等氮等能饲料。

配制饲料前, 所有原料经粉碎机(SFSP 系列, 昆明华明粮油设备厂生产)粉碎, 过 60 目筛。将粉碎好的饲料原料按表 1 饲料配方混合均匀, 然后再加入鱼油和大豆卵磷脂(先溶于鱼油中), 手工将油脂微小颗粒搓散, 最后再加入适宜蒸馏水使粉状饲料形成硬团, 于颗粒饲料机(KS-180, 江苏晶谷米机有限公司生产)中将饲料挤压成直径 1.5 mm 的颗粒条状, 在 40 ℃ 烘箱中干燥 12 h, 置于 -20 ℃ 冰箱保存备用。

1.2 试验动物及饲养管理

试验用虹鳟幼鱼为当年人工培育的同一批苗种, 由云南省昆明市寻甸县虹鳟养殖场提供。试

验于云南农业大学动物科学技术学院水产养殖实验室中进行。试验前,试验幼鱼在试验网箱中暂养2周适应环境。养殖网箱(0.9 m×0.9 m×1.0 m)于水泥池中(5 m×5 m×2 m),养殖用水为曝气自来水,采用循环流水系统,循环系统采用机械和生物介质过滤。试验开始前禁食24 h,选择大小均匀(初始平均体重见表2)、体格健壮的虹鳟幼鱼270尾,随机分配于9个养殖网箱(3个试验处理组,每组3个重复),每网箱30尾鱼。每天早晚投饵2次(07:00, 17:00),达饱食水平,

表1 基础饲料配方和营养组成(干物质基础)
Tab. 1 Formulation and proximate composition of

basal diets (dry weight)		%
原料 ingredient	鱼油对照	
鱼粉 fish meal	20.00	
豆粕 soybean meal	20.00	
大豆浓缩蛋白 soy protein concentrate	15.00	
菜籽粕 rapeseed meal	6.00	
棉籽粕 cottonseed meal	10.00	
橡胶籽仁饼 rubber seed cake	5.00	
麦麸 wheat bran	4.67	
鱼油 fish oil	15.00	
大豆卵磷脂 phospholipid	0.50	
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0.80	
维生素 C vitamin C	0.03	
氯化胆碱 (50%) choline chloride (50%)	0.20	
乙氧基喹啉 ethoxyquin	—	
番茄红素 lycopene	—	
维生素预混料 vitamin mixture ¹⁾	1.00	
矿物质预混料 mineral mixture ²⁾	1.00	
营养组成 nutrient composition		
干物质 dry matter	88.76	
粗蛋白 crude protein	41.05	
粗脂肪 crude lipid	16.24	
粗灰分 ash	8.65	
总能/(MJ·kg ⁻¹) gross energy	21.20	

注: 1) 矿物质预混料 (g/kg): MgSO₄·7H₂O, 180; KI, 1; FeSO₄·H₂O, 260; ZnSO₄·H₂O, 180; CuSO₄·5H₂O, 25; Na₂Se₂O₃, 0.01; MnSO₄·H₂O, 180; CoCl₂·6H₂O, 0.75。2) 维生素预混料 (g/kg): 维生素 A, 2; 维生素 D₃, 0.03; 维生素 E, 30; 维生素 K, 3; 盐酸硫胺, 8; 核黄素, 11; 盐酸吡哆醇, 8; 维生素 B₁₂, 0.02; 抗坏血酸, 50; 叶酸, 1; 生物素, 0.1; 烟酸, 30; 泛酸钙, 32; 肌醇, 25。Note: 1) Mineral premix (g/kg): MgSO₄·7H₂O, 180; KI, 1; FeSO₄·H₂O, 260; ZnSO₄·H₂O, 180; CuSO₄·5H₂O, 25; Na₂Se₂O₃, 0.01; MnSO₄·H₂O, 180; CoCl₂·6H₂O, 0.75。2) Vitamin premix (g/kg): vitamin A, 2; vitamin D₃, 0.03; vitamin E, 30; menadione, 3; thiamine hydrochloride, 8; riboflavin, 11; pyridoxine hydrochloride, 8; vitamin B₁₂, 0.02; ascorbic acid, 50; folic acid, 1; biotin 0.1; niacin, 30; calcium D-pantothenate, 32; inositol, 25。

每天投喂结束后30 min,用虹吸管吸出残饵及粪便。试验共进行8周,期间24 h连续充氧,自然光照,水温保持在14~18℃。

1.3 样品收集

养殖试验结束后,在采集样品前禁食24 h,用电子天平分别称量每个网箱鱼体总重,记录鱼体个数,每网箱随机取6尾鱼作为全鱼样品,分析测定鱼体常规组成。每网箱随机另取6尾鱼用丁香酚(1:12 000)麻醉,麻醉后尾静脉取血,一部分收集于普通离心管中,一部分收集于抗凝离心管中,在4 000 r/min下进行离心10 min,所得血清、血浆样品在-80℃下保存备用;随后随机选取3尾鱼,解剖后将完整的肝脏、肠道取出,保存在密封袋中,放于-80℃下保存。

1.4 分析测试方法

鱼体和饲料常规成分分析均参照AOAC测定。水分测定用恒温烘箱在105℃下烘至恒重;粗蛋白质含量测定采用全自动凯氏定氮仪(JK9830,济南精密科学仪器仪表有限公司)测定;粗脂肪测定采用索氏提取法(以石油醚为溶剂)测定;粗灰分测定为箱式电阻炉(SX-410,北京市永光明医疗仪器有限公司)550℃灼烧法(16 h)。

血液、肝脏、肠道的生化指标均采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定。胃蛋白酶、淀粉酶、二糖酶、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、总抗氧化能力(TAC)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、钙、磷、总氨基酸、总蛋白采用比色法;胰蛋白酶、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽还原酶(GR)采用紫外比色法;高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)采用双试剂直接法;总胆固醇(TC)采用氧化酶法;甘油三酯(TG)采用甘油氧化酶法,游离胆固醇(FC)、总脂肪、溶菌酶(LZM)、碱性磷酸酶(ALP)、尿素氮(BUN)、一氧化氮(NO)、丙二醛(MDA)等按其说明书操作。

1.5 计算与统计分析

$$\text{平均代谢体重(MBW)} = \left[(\text{初重}[\text{kg}])^{0.75} + (\text{末重}[\text{kg}])^{0.75} \right] / 2;$$

$$\text{摄食率}(\text{g/kg/d}) = \text{总摄食率} / \text{平均代谢体重} / \text{饲喂时间};$$

$$\text{体增重} = \frac{\text{末重(g)} - \text{初重(g)}}{\text{初重(g)}};$$
$$\text{日增重系数}(\%/d) = \frac{\text{末重}^{1/3} - \text{初重}^{1/3}}{\text{饲喂天数}} \times 100;$$
$$\text{饲料系数} = \frac{\text{采食干饲料重(g)}}{\text{鱼体湿增重(g)}};$$
$$\text{蛋白质效率} = \frac{\text{鱼体湿增重(g)}}{\text{采食蛋白重(g)}}。$$

试验结果均表示为平均值±标准误 (means±SE)。采用单因素方差分析 (ANOVA)，当处理组

之间存在显著性差异 ($P<0.05$) 时，用 Duncan's 检验进行多重比较分析。所有统计分析均采用 SPSS 17.0 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 生长性能

由表 2 可知：鱼油基础饲料中添加 EQ、LCP 均对虹鳟生长性能无显著影响，但显著提高了蛋白质效率，降低了饲料系数；与添加 EQ 相比，添加 LCP 显著提高了虹鳟的末重、体增重和日增重系数，对饲料系数和蛋白质效率无显著影响。

表 2 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟生长性能的影响

Tab. 2 Effect of lycopene and ethoxyquin supplementation on the growth performance of rainbow trout

指标 index	对照组 group of CK	乙氧基喹啉组 group of ethoxyquin	番茄红素组 group of lycopene
初重/g IBW	29.33±0.04	29.40±0.03	29.48±0.07
末重/g FBW	124.30±0.63 ab	120.13±2.39 a	131.05±1.57 b
摄食率/(g·kg ⁻¹ ·d ⁻¹) FI	14.26±0.07 b	12.82±0.39 a	13.69±0.22 ab
日增重系数/(%·d ⁻¹) DGC	2.93±0.01 ab	2.84±0.05 a	3.06±0.03 b
饲料系数 FCR	1.23±0.01 b	1.16±0.01 a	1.14±0.01 a
蛋白质效率/% PER	1.94±0.01 a	2.05±0.02 b	2.09±0.02 b

注：同行数据肩注不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)；下同。
Note: Values in the same row with different small letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$); the same as follow.

2.2 消化酶活性

由表 3 可知：鱼油基础饲料中添加 EQ、LCP 显著降低了肠道淀粉酶活性，对胃蛋白酶、肠道和肝脏胰蛋白酶、肝脏淀粉酶活性无显著影响；添加 LCP 显著降低了肠道二糖酶活性；与添加 EQ 相比，添加 LCP 显著提高了肝脏二糖酶活性。

2.3 脂蛋白水平

由表 4 可知：添加 EQ、LCP 对血清 TG、

HDL-C、钙及肝脏和肌肉中 TG、TC 含量无显著影响；与添加 EQ 相比，添加 LCP 显著降低了血清 TC、LDL-C、LDL-C/HDL-C 和肝脏中总脂肪含量，提高了血清中磷含量。

2.4 血浆蛋白质代谢

由表 5 可知：添加 EQ、LCP 对血浆中总蛋白、氨氮、尿素氮、AST、ALT 无显著影响；与添加 EQ 相比，添加 LCP 显著降低了总氨基酸含量。

表 3 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟消化酶活性的影响

Tab. 3 Effect of lycopene and ethoxyquin supplementation on the digestive enzyme activities in rainbow trout

指标 index	对照组 group of CK	乙氧基喹啉组 group of ethoxyquin	番茄红素组 group of lycopene
胃 stomach			
胃蛋白酶/(U·mg ⁻¹) pepsin	4.43±0.41	4.25±0.39	4.87±0.51
肠道 intestine			
胰蛋白酶/(U·mg ⁻¹) trypsin	0.58±0.02	0.59±0.12	0.51±0.05
淀粉酶/(U·mg ⁻¹) amylase	1.06±0.11 b	0.48±0.04 a	0.38±0.01 a
二糖酶/(U·mg ⁻¹) disaccharidase	8.07±0.53 b	5.31±1.13 ab	3.42±0.83 a
肝脏 liver			
胰蛋白酶/(U·μg ⁻¹) trypsin	2.18±0.40	1.87±0.22	1.67±0.19
淀粉酶/(U·mg ⁻¹) amylase	0.23±0.03	0.19±0.02	0.21±0.04
二糖酶/(U·mg ⁻¹) disaccharidase	1.74±0.26 a	1.84±0.18 a	3.70±0.09 b

表4 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟脂蛋白水平的影响

Tab. 4 Effect of lycopene and ethoxyquin supplementation on the content of lipoprotein in rainbow trout

指标 index	对照组 group of CK	乙氧基喹啉组 group of ethoxyquin	番茄红素组 group of lycopene
血清 serum			
总胆固醇/(mmol·L ⁻¹) TC	7.93±0.86 b	7.85±0.81 b	4.92±0.27 a
甘油三酯/(mmol·L ⁻¹) TG	3.19±0.61	3.28±0.32	3.37±0.04
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol·L ⁻¹) HDL-C	2.28±0.20	2.39±0.02	2.32±0.11
低密度脂蛋白胆固醇/(mmol·L ⁻¹) LDL-C	5.01±0.77 b	4.80±0.75 b	1.93±0.17 a
LDL-C/HDL-C	2.20±0.06 b	2.01±0.07 b	0.83±0.06 a
钙/(mmol·L ⁻¹) Ca	2.82±0.08	3.10±0.21	3.16±0.20
磷/(mmol·L ⁻¹) P	4.85±0.17 a	4.90±0.09 a	5.69±0.29 b
肝脏 liver			
总脂肪/(mg·g ⁻¹) total fat	63.60±1.05 b	58.20±5.04 b	40.78±3.41 a
甘油三酯/(mg·g ⁻¹) TG	5.49±0.34	5.38±0.37	4.87±0.58
胆固醇/(mg·g ⁻¹) cholesterol	1.79±0.26	1.79±0.11	2.03±0.29
肌肉 muscle			
总脂肪/(mg·g ⁻¹) total fat	63.08±3.72	51.67±5.04	55.57±5.03
甘油三酯/(mg·g ⁻¹) TG	1.14±0.09	0.92±0.11	0.93±0.07
胆固醇/(mg·g ⁻¹) cholesterol	0.28±0.04	0.36±0.05	0.24±0.02

表5 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟血浆蛋白质代谢指标的影响

Tab. 5 Effect of lycopene and ethoxyquin supplementation on the protein metabolism in rainbow trout

指标 index	对照组 group of CK	乙氧基喹啉组 group of ethoxyquin	番茄红素组 group of lycopene
总蛋白/(g·L ⁻¹) protein	23.24±1.19	26.85±2.83	29.38±5.33
总氨基酸/(mmol·L ⁻¹) total amino acid	20.99±2.47 ab	23.46±2.23 b	12.14±1.48 a
氨氮/(μmol·L ⁻¹) ammonia nitrogen	3.28±0.07	3.01±0.17	3.03±0.03
尿素氮/(mmol·L ⁻¹) BUN	5.76±0.22	5.24±0.46	5.36±0.21
谷草转氨酶/(U·L ⁻¹) AST	4.50±0.64	3.91±0.99	3.23±0.37
谷丙转氨酶/(U·L ⁻¹) ALT	33.46±4.24	35.29±5.81	32.66±1.79

2.5 抗氧化功能

由表6可知:添加EQ、LCP显著提高了血浆POD、GSH-Px活性,对血浆LZM、AKP、LDH、CAT、NO、SOD、TAC及肝脏POD、CAT、TAC、GOT、GPT、LDH活性无显著影响;添加EQ显著提高了肝脏AKP、GSH-Px活

性;添加LCP显著提高了肝脏GR活性;与添加EQ相比,添加LCP显著提高了肝脏LZM、血浆GR活性,降低了血浆MDA含量。

2.6 肌肉组成

由表7可知:添加EQ、LCP对虹鳟肌肉水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分含量无显著影响。

表6 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟抗氧化指标的影响

Tab. 6 Effect of lycopene and ethoxyquin supplementation antioxidant on the indexes of rainbow trout

指标 index	对照组 group of CK	乙氧基喹啉组 group of ethoxyquin	番茄红素组 group of lycopene
血浆 Plasma			
溶菌酶/(mg·L ⁻¹) LZM	1.24±0.17	1.27±0.18	1.69±0.17
过氧化物酶/(U·mL ⁻¹) POD	9.56±0.67 a	13.33±1.18 b	12.89±1.15 b
碱性磷酸酶/(U·dL ⁻¹) AKP	20.05±0.93	19.07±0.85	18.43±2.30
乳酸脱氢酶/(U·mL ⁻¹) LDH	0.49±0.01	0.48±0.01	0.47±0.01
过氧化氢酶/(U·mL ⁻¹) CAT	12.17±2.33	15.39±2.38	13.88±1.40
一氧化氮合酶/(μmol·L ⁻¹) NO	57.78±5.42	68.57±3.30	57.14±5.71

表 6（续）

指标 index	对照组 group of CK	乙氧基喹啉组 group of ethoxyquin	番茄红素组 group of lycopene
超氧化物歧化酶/(U·mL ⁻¹) SOD	69.62±2.76	71.78±1.51	73.73±2.13
总抗氧化能力/(U·mL ⁻¹) TAC	4.40±0.63	4.44±0.84	4.81±0.23
丙二醛/(mmol·mL ⁻¹) MDA	72.26±9.02 b	80.00±9.85 b	39.94±7.05 a
谷胱甘肽过氧化物酶/(U·mL ⁻¹) GSH-Px	0.04±0.00 a	0.15±0.01 c	0.12±0.01 b
谷胱甘肽还原酶/(U·mL ⁻¹) GR	0.05±0.01 a	0.07±0.01 a	0.13±0.02 b
肝脏 liver			
过氧化物酶/(U·mg ⁻¹) POD	4.71±0.61	4.28±0.10	5.17±0.69
过氧化氢酶/(U·mg ⁻¹) CAT	7.79±0.45	9.06±0.61	9.86±0.92
总抗氧化能力/(U·mg ⁻¹) TAC	0.41±0.01	0.40±0.02	0.49±0.05
谷草转氨酶/(U·g ⁻¹) AST	11.71±0.54	11.80±0.30	12.89±1.29
谷草转氨酶/(U·g ⁻¹) ALT	7.03±0.30	8.02±1.08	9.20±1.41
碱性磷酸酶/(U·g ⁻¹) AKP	5.76±0.50 a	25.32±1.54 b	9.75±0.54 a
乳酸脱氢酶/(U·g ⁻¹) LDH	12.08±1.38	13.33±1.25	9.19±1.03
溶菌酶/(mg·g ⁻¹) LZM	0.16±0.02 a	0.19±0.03 a	0.74±0.12 b
谷胱甘肽过氧化物酶/(U·g ⁻¹) GSH-Px	12.55±2.13 a	22.58±2.23 b	13.57±1.33 a
谷胱甘肽还原酶/(U·g ⁻¹) GR	30.97±2.77 a	42.26±6.98 ab	63.04±7.34 b

表 7 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟肌肉组成的影响
Tab. 7 Effect of lycopene and ethoxyquin supplementation on the muscle composition of rainbow trout %

肌肉组成 muscle composition	对照组 group of CK	乙氧基喹啉组 group of ethoxyquin	番茄红素组 group of lycopene
水分 moisture	65.35±1.73	67.39±0.81	66.34±1.09
粗蛋白 crude protein	17.11±0.30	17.00±0.14	17.64±0.45
粗脂肪 crude lipid	13.95±1.52	12.83±1.07	13.47±0.51
灰分 ash	2.04±0.09	2.08±0.05	2.01±0.09

3 讨论

3.1 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟生长性能和消化酶活性的影响

本研究表明：与添加 EQ 相比，鱼油基础饲料中添加 LCP 可显著提高虹鳟的末重、体增重和日增重系数。LCP 作为一种生物抗氧化剂受到越来越多的关注。在虹鳟^[6]、鹌鹑^[7]、绵羊^[8]的研究中发现：饲料中添加 LCP 可显著提高其生长性能。孟好等^[5]在鲫鱼饲料中添加 LCP，提高了鲫鱼的增长率和增重率，与本研究结果相似。本研究中，添加 EQ 显著降低了虹鳟的摄食率。SAX-ENA 等^[9]发现：EQ 含量过高会降低大菱鲆的摄食率，因此 EQ 作为化学抗氧化剂，在使用过程中还需注意其适宜添加量及残留问题，综合考虑其生长性能，添加 LCP 对虹鳟生长效果优于添加 EQ。本研究中，添加 EQ、LCP 对胃蛋白酶、肠道和肝脏胰蛋白酶、肝脏淀粉酶活性无显著影响。两者均对肠道淀粉酶活性有负面影响，其中

LCP 影响更大，但同时 LCP 又显著提高了肝脏二糖酶活性，说明添加抗氧化剂会对虹鳟对碳水化合物化合物的消化有一定影响，但其作用机制尚不明确，需进一步研究。

3.2 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟脂蛋白含量和蛋白质代谢的影响

血液生化指标反映鱼体一段时间内的生理营养与代谢情况，与鱼类在此期间的营养状况紧密相关^[10]。血清 LDL-C 水平升高是造成动脉粥样硬化性心脑血管疾病的主要因素^[11]。LDL-C/HDL-C 可反应胆固醇的转运情况，是动脉粥样硬化的衡量指标。当血清中 TC 含量过高时，可能会造成高胆固醇血症。研究表明，番茄红素具有调节血脂的作用^[12]。本研究表明：添加 LCP 显著降低了血清 TC、LDL-C、LDL-C/HDL-C 水平和肝脏中总脂肪的含量，而添加 EQ 对血清脂蛋白含量无显著影响。颜觅^[12]研究发现：添加 LCP 可抑制血清、肝脏中 TC、LDL-C 的升高，这与本研究结果相似，可能是由于 LCP 抑制脂蛋白氧化，保

护 LDL-C 不被氧化^[13]。LCP 降低血清 TC 水平可能是 LCP 通过抑制羟甲基戊二酰辅酶 A 还原酶活性进而抑制胆固醇的合成^[14],从而降低了胆固醇水平。马建慧等^[15]研究发现:LCP 可减轻鹌鹑脂肪肝程度。脂质过氧化损伤是导致脂肪在肝脏中沉积的重要因素,LCP 由于其很强的抗氧化性阻止了脂质的过氧化损伤,从而降低了肝脏中总脂肪含量。在本研究中,添加 EQ、LCP 均未对血浆中总蛋白、氨氮、BUN、AST、ALT 含量造成显著影响;蔡丽梅等^[16]研究发现:添加 LCP 可降低受损伤小鼠肝脏中 ALT 和 AST 含量,在一定程度上减少肝脏的损伤。两者不一致的原因可能是本试验条件下,对肝脏损伤较小,添加 LCP 对肝脏的保护作用不明显。

3.3 鱼油中添加 EQ、LCP 对虹鳟抗氧化功能的影响

动物代谢过程中会产生一定量自由基,生物体内的自由基处于不断产生与清除的动态平衡,而自由基含量过高则会导致细胞结构和功能的破坏^[17]。抗氧化剂的抗氧化作用主要通过抑制自由基产生和清除自由基来实现^[18]。抗氧化功能的强弱主要通过其抗氧化体系的抗氧化酶反映。POD、SOD、GSH-Px 与 CAT 是抗氧化体系内主要的抗氧化酶。POD 可与 SOD、CAT 相互协调配合,清除体内过剩的自由基^[19]。GSH-Px 是机体内广泛存在的一种重要的过氧化物分解酶,主要是催化谷胱甘肽(GSH)参与过氧化反应,清除在细胞呼吸代谢过程中产生的过氧化物,在保护细胞免受自由基损伤过程中起着关键作用^[20]。MDA 是脂质过氧化的产物,其含量直接反映了脂质氧化的速率和强度,间接反映机体清除自由基的能力^[21]。GR 可清除生物体内活性氧,能催化氧化型谷胱甘肽与还原型谷胱甘肽两者间的相互转化,是产生 GSH 的关键酶^[22]。LZM 是鱼类的非特异性免疫的重要指标,其活性高低反映了溶菌作用的强弱^[23]。

本试验中,鱼油基础饲料中添加 EQ、LCP 均显著提高了血浆中 POD、GSH-Px 的含量,与 EQ 相比,LCP 显著降低了血浆中 MDA 含量,显著提高了血浆、肝脏 GR 活性和肝脏 LZM 含量。SAHIN 等^[6]在高密度饲养虹鳟试验中发现:添加 LCP 可显著提高 SOD、CAT、GSH-Px 等抗氧化酶活性。在虹鳟^[6]和鹌鹑^[7]日粮中添加

LCP 则显著降低了血浆中 MDA 含量。这与本研究结果相似。因此,本研究显示:与 EQ 相比,LCP 有更好的抗氧化作用,可增强虹鳟的溶菌能力。溶菌酶水解细胞壁时所释放的肽聚糖碎片是合成与分泌各种抗菌蛋白包括溶菌酶的诱导物,从而提高其非特异性免疫功能^[24]。

4 结论

虹鳟鱼油基础饲料中添加 EQ、LCP 均可抑制饲料油脂被氧化,提高虹鳟饲料利用率,提高虹鳟的抗氧化功能。与 EQ 相比,添加 LCP 能更好提高其生长性能、调节血脂、提高非特异性免疫能力。因此,LCP 是虹鳟饲料良好的抗氧化剂。

[参考文献]

- [1] 黄雨薇,叶元土,蔡春芳,等.氧化鱼油对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*pond)肝胰脏、肠道胆固醇、胆汁酸合成代谢的影响[J].基因组学与应用生物学,2015,34(8): 1636. DOI: 10.13417/j.gab.034.001636.
- [2] 李丹丹,王思珍,常杰.抗氧化剂对贮藏高脂水产饲料油脂稳定性的影响[J].现代畜牧科技,2016(12): 21. DOI: 10.19369/j.cnki.2095-9737.2016.12.015.
- [3] 王珺.乙氧基喹啉、氧化鱼油和烟酸铬对大黄鱼与鲈鱼生长性能的影响及其(或代谢物)在鱼体组织中残留的研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [4] 柳巧宁,朱丽雯,王义华,等.发酵法生产番茄红素的研究进展[J].食品与发酵工业,2009,35(6): 157. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2009.06.008.
- [5] 孟好,杨鸾劫,单志萍,等.番茄红素油对鲫鱼生长性能和抗氧化性的影响[J].江苏农业学报,2011,27(1): 124. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4440.2011.01.023.
- [6] SAHIN K, YAZLAK H, ORHAN C, et al. The effect of lycopene on antioxidant status in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared under high stocking density[J]. Aquaculture, 2014, 418/419: 132. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2013.10.009.
- [7] SAHIN N, SAHIN K, ONDERCI M, et al. Effects of dietary lycopene and vitamin E on egg production, antioxidant status and cholesterol levels in Japanese quail[J]. Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2006, 19(2): 224. DOI: 10.5713/ajas.2006.224.
- [8] 武安泉,王文奇,刘艳丰,等.番茄渣对绵羊生长性能和瘤胃发酵参数的影响[J].动物营养学报,2014,26(8): 2289. DOI: 10.3969/j.issn.1006-267x.2014.08.033.
- [9] SAXENA T B, ZACHARIASSEN K E, JORGENSEN L. Effects of ethoxyquin on the blood composition of turbot, *Scophthalmus maximus* L.[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology Toxicology and Endocrinology, 2000, 127(1): 1. DOI: 10.1016/S0742-8413(00)00131-6.
- [10] 韩京成,刘国勇,梅朋森,等.水温因子对鲫血液生化指

- 标和消化酶的影响[C]//第五届全国环境化学大会摘要集, 2009: 23.
- [11] 乙成成, 刘雯雯, 张颖秋, 等. 低密度脂蛋白胆固醇与高密度脂蛋白胆固醇的比值与动脉粥样硬化的关系[J]. 第二军医大学学报, 2011, 32(2): 224. DOI: [10.3724/SP.J.1008.2011.00224](https://doi.org/10.3724/SP.J.1008.2011.00224).
- [12] 颜觅. 番茄红素对高脂血症大鼠肝脂、脑脂代谢影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [13] 刘蕊, 朱希强. 番茄红素的生理保健功能及应用研究进展[J]. 食品与药品, 2013(5): 364. DOI: [10.3969/j.issn.1672-979X.2013.05.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-979X.2013.05.024).
- [14] FUHRMAN B, ELIS A, AVIRAM M. Hypocholesterolemic effect of lycopene and beta-carotene is related to suppression of cholesterol synthesis and augmentation of LDL receptor activity in macrophages[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1997, 233(3): 658. DOI: [10.1006/bbrc.1997.6520](https://doi.org/10.1006/bbrc.1997.6520).
- [15] 马建慧, 郑兴征, 刘洪海. 番茄红素对鹌鹑高脂血症性脂肪肝的影响[J]. 中国老年学杂志, 2007, 27(8): 730. DOI: [10.3969/j.issn.1005-9202.2007.08.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9202.2007.08.011).
- [16] 蔡丽梅, 李嘉慧, 肖青. 番茄红素对慢性酒精中毒肝损伤的保护作用研究[J]. 中国实用医药, 2015(11): 284. DOI: [10.14163/j.cnki.11-5547/r.2015.11.205](https://doi.org/10.14163/j.cnki.11-5547/r.2015.11.205).
- [17] 赵珂立. 氧化应激对动物自由基代谢、消化道损伤及抗氧化剂干预作用的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [18] 孟好, 杨鸾劫, 王建美, 等. 饲料中补充番茄红素对鲫鱼抗氧化能力的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(1): 59. DOI: [10.13610/j.cnki.1672-352x.2011.01.029](https://doi.org/10.13610/j.cnki.1672-352x.2011.01.029).
- [19] 赖建东, 魏日凤, 连玲丽, 等. 炭疽病病原菌感染对茶树叶片生理特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(2): 162. DOI: [10.13323/j.cnki.j.fafu\(nat.sci.\).2016.02.007](https://doi.org/10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.02.007).
- [20] 徐晓琴. 血清谷胱甘肽过氧化物酶比色测定法[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 1998(4): 330.
- [21] 郭绍举, 李健, 黄彬, 等. 内镜结合运经仪对梗阻性胆管炎患者血清 SOD 及 MDA 的影响[J]. 中国中医药科技, 2009, 16(1). DOI: [10.3969/j.issn.1005-7072.2009.01.065](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-7072.2009.01.065).
- [22] 施玉萍. 嗜酸性喜温硫杆菌谷胱甘肽还原酶基因的生物学功能研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [23] 姜志勇, 王智勇, 李志斐. 中草药制剂对草鱼生长和非特异性免疫效应的研究[J]. 黑龙江水产, 2016(3): 44. DOI: [10.3969/j.issn.1674-2419.2016.03.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2419.2016.03.019).
- [24] 张彦娇. 盐度和温度对大菱鲆非特异性免疫力的影响及淡水螯虾相关免疫因子的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.

责任编辑: 何馨成