

不同来源虾青素对虹鳟生长性能、肉色和抗氧化能力的影响

张春燕^{1,2,3} 文登鑫^{1,2,3} 姚文祥^{1,2,3} 李小勤^{1,2,3} 吴世林⁴ 冷向军^{1,2,3*}

(1.上海海洋大学水产与生命学院,水产科学国家级教学示范中心,上海 201306;2.上海海洋大学水产与生命学院,农业部鱼类营养与环境生态研究中心,上海 201306;3.上海海洋大学水产与生命学院,水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心,上海 201306;4.广州智特奇生物科技有限公司,广州 510663)

摘要: 本试验旨在研究不同来源虾青素对虹鳟生长性能、肉色和抗氧化能力的影响。选取体质健壮、大小均匀的虹鳟 375 尾[平均体重为(6.28±0.07) g],随机分为 5 组,每组 3 个重复,每个重复 25 尾。试验配制 5 种等氮等能的饲料,分别为基础饲料和在基础饲料(对照组)中分别添加 1.0 g/kg 合成虾青素(Ast)、6.5 g/kg 福寿花花瓣粉(AF)、3.4 g/kg 福寿花提取物(AE)和 4.4 g/kg 雨生红球藻提取物(HE)(折算成虾青素含量均为 100 mg/kg)的试验饲料,喂养虹鳟 6 周。结果表明:饲料中添加 Ast、AE 和 HE 对虹鳟增重率和饲料系数无显著影响($P>0.05$),但 AF 组的增重率较对照组显著降低($P<0.05$),饲料系数显著提高($P<0.05$)。Ast、AF、AE 和 HE 组的肌肉红度和黄度值、组织虾青素含量和血清类胡萝卜素含量(除 AF 组第 2 周)均显著高于对照组($P<0.05$),肌肉亮度值显著低于对照组($P<0.05$)。与对照组相比,饲料中添加 Ast、AE 和 HE 显著降低了肌肉冷冻损失和 4、6 h 的滴水损失,肌肉、肝脏和血清总超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量($P<0.05$),显著提高了抑制羟自由基能力($P<0.05$)。上述结果表明,饲料中添加 AE、HE 能有效改善虹鳟肌肉颜色,增强机体抗氧化能力,达到和添加 Ast 一致的效果,但 AF 不宜直接用作虹鳟的着色剂。

关键词: 合成虾青素;福寿花;雨生红球藻提取物;虹鳟;生长性能;肉色;抗氧化

中图分类号:S963

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2021)02-1008-12

近年来,虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)在我国的养殖发展迅猛,至 2019 年养殖产量已达到 3.937 万 t,是我国重要的冷水性经济鱼类。虹鳟的肌肉红度值是市场评价其品质的一个重要标准,生产中往往会通过外源添加虾青素的方式改善虹鳟肌肉色泽。目前,生产上使用的虾青素主要为合成虾青素(Ast),其成本占饲料总成本的 10%~20%^[1]。Ast 由于存在不同立体异构性以及可能的合成中间体的残留,故其安全性问题一直存在争论。天然来源的虾青素有雨生红球藻

(*Haematococcus pluvialis*)^[2]、红法夫酵母(*Phaffia rhodozyma*)^[3]、钝顶螺旋藻(*Spirulina platensis*)^[4]、小球藻(*Chlorella zofingiensis*)^[5]等,天然来源虾青素较为稳定,使用安全,但存在提取工艺复杂、价格高等问题。

夏侧金盏花(*Adonis aestivalis* L.),又名福寿花,属毛茛科(Ranunculaceae),侧金盏花属(*Adonis* L.),其花瓣中含有丰富的类胡萝卜素,其中虾青素含量占类胡萝卜素总量的 80%以上,约为花瓣干重的 1%,是一种优质的天然虾青素源^[6]。然

收稿日期:2020-07-16

基金项目:国家自然科学基金(31772858)

作者简介:张春燕(1996—),女,浙江平湖,硕士研究生,研究方向为水产动物营养。E-mail: 931780463@qq.com

* 通信作者:冷向军,教授,博士生导师,E-mail: xjleng@shou.edu.cn

而,目前有关夏侧金盏花的研究主要侧重于其中富含的强心甙方面^[7],有关其作为着色剂的研究很少。Kamata 等^[8]用添加 5.05% 福寿花花瓣 (AF) 和 0.01% 福寿花提取物 (AE) (折算成虾青素含量均为 100 mg/kg) 的饲料饲喂虹鳟 3 个月,结果 AF 组产生了高死亡率 (30%), AE 组虽增加了肌肉红度值,但肌肉中虾青素沉积量很低,仅为 1.17 mg/kg,达不到市场要求 (6 mg/kg)。

雨生红球藻,属绿藻门 (Chlorophyta),团藻目 (Volvocales),红球藻属 (*Haematococcus*),是目前所有已知天然虾青素积累量最高的生物,其虾青素积累量可达干重的 5%^[9]。雨生红球藻中的虾青素通常以酯的形式存在,构型为纯左旋结构 (3S,3'S),是抗氧化活性最强的一种构型^[10]。然而,雨生红球藻具有较厚的细胞壁,会阻碍鱼类对类胡萝卜素的吸收利用^[11],降低了藻粉直接作为饵料的利用率。因此,雨生红球藻作为虾青素源添加到饲料中,应选用适当的破壁方法,若破壁方法不当,破壁不完全,会影响虾青素的活性和利用率。雨生红球藻藻粉在水产养殖中应用的报道已见于虹鳟^[12]、大西洋鲑 (*Salmo salar*)^[13]、赤鲷 (*Pagrus pagrus*)^[14]、大黄鱼 (*Pseudosciaena crocea*)^[15]、欧鲶 (*Silurus glanis*)^[16]等,这些研究表明雨生红球藻具有良好的着色和抗氧化作用,并能改善生长性能,提高鱼体免疫力。目前在雨生红球藻上的研究多基于藻粉,而雨生红球藻提取物

(HE) 的研究相对较少^[2,17],尤其是在鲑鳟鱼类着色方面。

作为天然虾青素源,AF、AE、HE 在改善虹鳟肉色和机体抗氧化性能方面的作用效果如何?与 Ast 相比,其效果如何?尚未有明确报道。因此,本试验以虹鳟为研究对象,在饲料中分别添加 Ast、AF 及 AE 和 HE,考察其对虹鳟生长性能、色素沉积和抗氧化能力的影响,为天然虾青素源在水产饲料中的合理应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

Ast、AF、AE 和 HE (正丁烷浸提法) 均由广州某生物科技股份有限公司提供,虾青素含量分别为 10.30%、1.54%、2.90% 和 2.26%。

1.2 试验饲料

试验配制 5 种等氮等能的饲料,分别为基础饲料和在基础饲料中分别添加 1.0 g/kg Ast、6.5 g/kg AF、3.4 g/kg AE、4.4 g/kg HE 的试验饲料,折算成虾青素添加量均为 100 mg/kg。各种饲料原料粉碎后过 60 目筛,按饲料配方 (表 1) 逐级混匀,用单螺杆挤压机制粒成直径为 2.0 mm 的硬颗粒沉性饲料 [制粒温度为 (85±5) °C],用鼓风干燥箱 40 °C 烘干至水分含量低于 10%,密封保存备用。经检测,这 5 种饲料中虾青素含量分别为 11.00、95.23、101.32、104.25 和 93.52 mg/kg。

表 1 试验饲料组成及营养水平 (风干基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)

g/kg

项目 Items	对照组 Control group	合成虾 青素组 Ast group	福寿花 花瓣组 AF group	福寿花 提取物组 AE group	雨生红球藻 提取物组 HE group
原料 Ingredients					
鱼粉 Fish meal	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0
豆粕 Soybean meal	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
大豆浓缩蛋白 Soy protein concentrate	110.0	110.0	110.0	110.0	110.0
面粉 Flour	260.0	259.0	253.5	256.6	255.6
猪肉粉 Pork meat powder	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
啤酒酵母 Brewers dried yeast	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
鱼油 Fish oil	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
豆油 Soybean meal	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
维生素预混料 Vitamin premix ¹⁾	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
矿物质预混料 Mineral premix ²⁾	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0

续表 1

项目 Items	对照组 Control group	合成虾 青素组 Ast group	福寿花 花瓣组 AF group	福寿花 提取物组 AE group	雨生红球藻 提取物组 HE group
氯化胆碱 Choline chloride	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
合成虾青素 Synthesis astaxanthin		1.0			
福寿花花瓣 <i>Adonis aestivalis</i> flower			6.5		
福寿花提取物 <i>Adonis aestivalis</i> extract				3.4	
雨生红球藻提取物 <i>Haematococcus pluvialis</i> extract					4.4
合计 Total	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0
营养水平 Nutrient levels ³⁾					
水分 Moisture	39.3	39.0	38.0	41.5	41.7
粗蛋白质 CP	451.3	446.2	445.7	442.9	441.1
粗脂肪 EE	134.8	134.7	134.5	124.4	125.1
粗灰分 Ash	85.5	84.8	86.8	85.4	85.5

1) 维生素预混料为每千克饲料提供 Vitamin premix provided the following for per kg of diets: VA 10 000 IU, VD₃ 3 000 IU, VE 150 IU, VK₃ 12.17 mg, VB₁ 20 mg, VB₂ 20 mg, VB₃ 100 mg, VB₆ 22 mg, VB₁₂ 0.15 mg, VC 1 000 mg, 生物素 biotin 0.6 mg, 叶酸 folic acid 8 mg, 肌醇 inositol 500 mg。

2) 矿物质预混料为每千克饲料提供 Mineral premix provided the following for per kg of diets: I 1.5 mg, Co 0.6 mg, Cu 3 mg, Fe 63 mg, Zn 89 mg, Mn 11.45 mg, Se 0.24 mg, Mg 180 mg。

3) 营养水平为实测值。Nutrient levels were measured values.

1.3 试验鱼与饲养管理

试验用虹鳟购自四川省眉山市东坡区天贵水产养殖场。试验开始前,将虹鳟暂养 2 周以适应试验环境。正式试验前停止投喂 24 h,选取体质健壮、大小均匀的虹鳟 375 尾[平均体重为(6.28±0.07) g],随机分配到 15 个自动充气循环玻璃缸内(0.60 m×0.60 m×0.50 m),每缸 25 尾鱼,共 5 组,每组 3 个重复。养殖试验开始前,取 20 尾虹鳟于-20 ℃保存,用于初始全鱼常规成分分析。养殖期间,每天投喂 2 次(09:00、16:00),日投喂量为体重的 2%~3%,根据鱼的摄食情况和天气情况进行适当调整,各组投喂水平基本保持一致,以每次投喂无残饵为宜。养殖期间水温为 13~18 ℃,溶氧含量为 6~7 mg/L, pH 为 7.24~7.78,氨氮含量≤0.2 mg/L,亚硝酸盐含量≤0.1 mg/L。每天在上午摄食 1~2 h 后采用虹吸法吸走缸底粪便,每周换水 2 次,换水量为缸体水量的 1/3。养殖试验在上海海洋大学鱼类营养实验室进行,共持续 6 周。

1.4 样品采集

样品采集参照 Zhao 等^[18]方法,在养殖第 2、4 和 6 周末,鱼体饥饿 24 h 后,每缸随机取 3 尾鱼,

用 100 mg/L MS-222 麻醉。于尾静脉处采血,8 000 r/min 离心 10 min,取血清-80 ℃保存,用于测定血清类胡萝卜素含量。取血后,剥离两侧背部皮肤,取侧线与背鳍之间的肌肉,测定色差值后,与皮肤和尾鳍于-20 ℃保存,用于测定组织虾青素含量。6 周养殖试验结束后,鱼体饥饿 24 h,对所有缸中虹鳟进行称重,记录重量及尾数,从中取 3 尾鱼麻醉后于-20 ℃保存,用于测定全鱼常规成分和虾青素含量。另取 6 尾鱼,3 尾采用上述方法采集肌肉、肝脏和血清用于抗氧化能力的测定;另外 3 尾鱼,采集背部两侧肌肉各 1.5 g,分别用于滴水损失和冷冻损失的测定。

1.5 测定指标

1.5.1 生长性能

根据虹鳟初重、末重、尾数和投喂量,计算出成活率、增重率和饲料系数,计算公式如下:

$$\text{增重率}(\%) = 100 \times [\text{末重}(\text{g}) - \text{初重}(\text{g})] / \text{初重}(\text{g});$$

$$\text{成活率}(\%) = 100 \times \text{试验末鱼尾数}(\text{尾}) / \text{试验初鱼尾数}(\text{尾});$$

$$\text{饲料系数} = \text{总摄食量}(\text{g}) / [\text{末重}(\text{g}) - \text{初重}(\text{g})]。$$

1.5.2 饲料和全鱼组成

末全鱼、初始全鱼和饲料粉碎后,参照 AOAC (2000) 进行常规成分分析,方法如下:水分含量采用 105 ℃ 烘干法测定;粗蛋白质含量采用自动凯氏定氮仪(2300-Auto-Analyzer, Foss Tecator, 瑞典)测定;粗脂肪含量采用氯仿甲醇浸提法测定;粗灰分含量采用 550 ℃ 马弗炉(SXL-1008 马弗炉,上海精宏实验设备有限公司)灼烧法测定。

1.5.3 肌肉色差值

虹鳟抽血剥皮后,取侧线与背鳍之间的肌肉,用吸水纸将表面水分吸干,再将 WSC-S 色差计(WSC-S colorimeter, o/d 光源,带光泽,稳定性 $\Delta Y \leq 0.6$,上海精密科学仪器有限公司物理光学仪器厂)探头紧贴于肌肉朝向背脊的一面测量,记录亮度、红度和黄度值。

1.5.4 虾青素含量

肌肉和全鱼虾青素含量参考 Zhang 等^[19]方法,采用氯仿-乙醇(1:1)萃取法测定;皮肤和鳍条虾青素含量参考 Song 等^[20]方法,采用二氯甲烷-甲醇溶液(1:3)萃取法测定。测得吸光度(OD)值后根据虾青素标准曲线计算虾青素含量(虾青素标准品购于上海吉至生化科技有限公司,产品编号 A18781)。虾青素沉积率计算公式如下:

$$\text{虾青素沉积率}(\%) = 100 \times [\text{末全鱼虾青素含量}(\text{mg}/\text{kg}) \times \text{末重}(\text{kg}) - \text{初始全鱼虾青素含量}(\text{mg}/\text{kg}) \times \text{初重}(\text{kg})] / [\text{投饲量}(\text{kg}) \times \text{饲料虾青素含量}(\text{mg}/\text{kg})]。$$

1.5.5 血清总类胡萝卜素含量

取 0.2 mL 血清加入 0.4 mL 95% 乙醇斡旋混合后,加入 1 mL 正己烷斡旋混合,1 000 r/min 离心 5 min,取上清液在 470 nm 下测定 OD 值,根据全反式虾青素标准曲线计算总类胡萝卜素含量。全反式虾青素标准曲线的绘制参考 Tolasa 等^[13]。

$$\text{血清类胡萝卜素含量}(\mu\text{g}/\text{mL}) = \text{OD 值} \times 10\,000 / \text{消旋系数 E}。$$

1.5.6 肌肉持水力

取虹鳟一侧背部肌肉(1.5 g),称重(W_1)后用细铁丝悬挂于 4 ℃ 冰箱中,分别于 2、4、6 h 取出,用吸水纸轻轻拭去表面水分后称重,记录重量(W_2)。取另一侧背部肌肉(1.5 g),称重(W_3)后装袋密封,置于 -20 ℃ 冰箱,24 h 后取出,室温解冻 10 min,用吸水纸轻轻拭去表面水分后称重,记录重量(W_4)。滴水损失和冷冻损失计算公式如下:

$$\text{滴水损失}(\%) = 100 \times [(W_1 - W_2) / W_1] ;$$

$$\text{冷冻损失}(\%) = 100 \times [(W_3 - W_4) / W_3] 。$$

1.5.7 血清、肌肉和肝脏的抗氧化能力

肝脏和背部肌肉于 4 ℃ 解冻后,用 0.9% 生理盐水制成 20% 的组织匀浆液,2 500 r/min 离心 10 min,取上清备用。血清、肌肉和肝脏的抗氧化性能指标包括:肌肉和肝脏总蛋白(TP)含量,血清、肌肉和肝脏的丙二醛含量(MDA)含量、总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性以及抑制羟自由基能力。以上指标的测定均按照试剂盒(南京建成生物工程研究所)说明书操作,其中蛋白质总量采用考马斯亮蓝法测定,MDA 含量采用硫代巴比妥酸(TAB)法测定,抑制羟自由基能力根据 Fenton 反应测定。

血清和组织 T-SOD 活性单位定义(U/mL):每毫升反应液中和每毫克组织蛋白质在 1 mL 反应液中 SOD 抑制率达 50% 时所对应的 SOD 量为 1 个 SOD 活性单位(U)。

1.6 数据统计与分析

试验数据采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA),结合 Tukey's 法进行多重比较,差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 不同来源虾青素对虹鳟生长性能的影响

由表 2 可知,养殖 6 周后,Con、Ast、AE 和 HE 组在增重率、饲料系数和成活率上均无显著差异($P > 0.05$);AF 组在增重率上显著低于其他组($P < 0.05$),饲料系数显著高于其他组($P < 0.05$),与对照组相比,AF 组增重率降低 13.5%,饲料系数增加 0.10($P < 0.05$)。

2.2 不同来源虾青素对虹鳟全鱼常规成分的影响

由表 3 可知,各组间虹鳟全鱼常规成分组成,包括水分、粗蛋白质、粗灰分和粗脂肪含量,均无显著差异($P > 0.05$)。

2.3 不同来源虾青素对虹鳟肌肉色差的影响

由图 1 可知,随着养殖时间的延长,各组虹鳟肌肉亮度值减小,肌肉红度值增大;Ast、AF、AE 和 HE 组的肌肉亮度值在各时间点上均显著低于对照组($P < 0.05$),红度和黄度值显著高于对照组($P < 0.05$);在第 6 周时,各虾青素添加组间的肌肉亮度、红度值无显著差异($P > 0.05$),AE 和 HE 组的肌肉黄度值显著高于 Ast 和 AF 组($P < 0.05$)。

表 2 不同来源虾青素对虹鳟生长性能的影响

Table 2 Effects of different astaxanthin sources on growth performance of rainbow trout

项目 Items	对照组 Control group	合成虾青素组 Ast group	福寿花 花瓣组 AF group	福寿花 提取物组 AE group	雨生红球藻 提取物组 HE group
初重 IBW/g	6.24±0.04	6.34±0.07	6.25±0.05	6.25±0.03	6.24±0.04
末重 FBW/g	27.62±0.31 ^b	27.16±0.94 ^b	24.10±1.05 ^a	26.19±0.92 ^b	26.27±0.78 ^b
增重率 WGR/%	339.45±1.29 ^b	328.54±12.54 ^b	293.74±16.98 ^a	322.64±10.88 ^b	325.16±6.57 ^b
成活率 Survival ratio/%	100	100	100	100	100
饲料系数 FCR	0.99±0.04 ^a	1.01±0.02 ^a	1.09±0.02 ^b	1.03±0.04 ^a	1.03±0.03 ^a

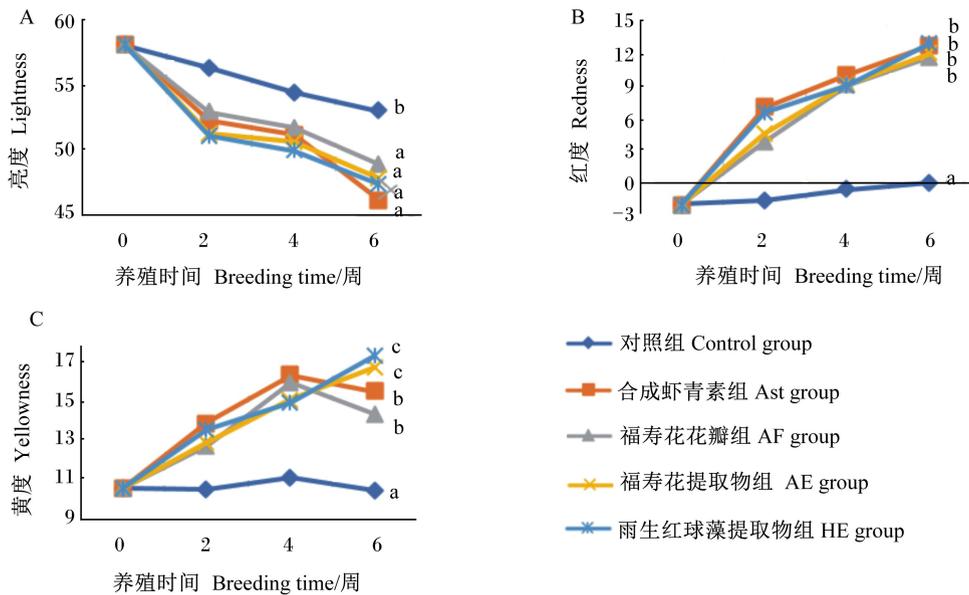
同行数据肩标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。表 3、表 6 同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same as Table 3 and Table 6.

表 3 不同来源虾青素对虹鳟全鱼常规成分的影响

Table 3 Effects of different astaxanthin sources on whole body routine composition of rainbow trout g/kg

项目 Items	对照组 Control group	合成虾青素组 Ast group	福寿花花瓣组 AF group	福寿花 提取物组 AE group	雨生红球藻 提取物组 HE group
水分 Moisture	715.18±2.45	708.04±9.05	716.56±6.04	710.08±5.82	713.54±7.60
粗蛋白质 CP	161.98±4.46	162.73±6.84	160.03±3.58	162.96±4.12	164.43±6.67
粗脂肪 EE	75.85±3.05	81.27±9.10	82.28±5.28	76.54±3.13	79.30±4.94
粗灰分 Ash	24.23±0.97	24.81±1.13	24.76±0.51	24.75±0.85	23.95±0.63



数据点标注不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Data points with different small letters mean significant difference ($P<0.05$).

图 1 不同来源虾青素对虹鳟肌肉色差的影响

Fig.1 Effects of different astaxanthin sources on flesh chromatism of rainbow trout

2.4 不同来源虾青素对虹鳟各组织虾青素含量和沉积率的影响

由表 4 可知,各虾青素添加组的不同组织中虾青素含量均随养殖时间的增加而升高。在第 2、4、6 周时,Ast、AF、AE 和 HE 组的肌肉、皮肤和尾鳍虾青素含量均显著高于对照组 ($P<0.05$);第 6

周时,HE 组的肌肉虾青素含量最高,AF 组的皮肤和尾鳍虾青素含量最高;在全鱼虾青素含量和虾青素沉积率方面,Ast、AF、AE 和 HE 组均无显著差异 ($P>0.05$),全鱼虾青素含量均显著高于对照组 ($P<0.05$),虾青素沉积率均显著低于对照组 ($P<0.05$)。

表 4 不同来源虾青素对虹鳟各组织虾青素含量和沉积率的影响

Table 4 Effects of different astaxanthin sources on astaxanthin content and retention in tissue of rainbow trout

项目 Items	养殖时间 Breeding time	对照组 Control group	合成虾青素组 Ast group	福寿花 花瓣组 AF group	福寿花 提取物组 AE group	雨生红球藻 提取物组 HE group
组织虾青素含量 Astaxanthin content in tissue/(mg/kg)						
	初始 Initial	0.79±0.07 ^A	0.79±0.07 ^A	0.79±0.07 ^A	0.79±0.07 ^A	0.79±0.07 ^A
肌肉 Flesh	第 2 周 Week 2	0.81±0.06 ^{a,A}	1.85±0.30 ^{b,B}	1.39±0.32 ^{b,B}	2.97±0.79 ^{c,B}	3.36±0.17 ^{c,B}
	第 4 周 Week 4	0.87±0.06 ^{a,A}	4.57±0.33 ^{b,C}	4.56±0.25 ^{b,C}	4.55±0.52 ^{b,C}	4.12±0.44 ^{b,B}
	第 6 周 Week 6	1.35±0.50 ^{a,B}	4.96±0.79 ^{b,C}	4.81±0.54 ^{b,C}	5.20±0.91 ^{b,C}	5.26±0.91 ^{b,C}
	初始 Initial	2.49±0.18 ^A	2.49±0.18 ^A	2.49±0.18 ^A	2.49±0.18 ^A	2.49±0.18 ^A
皮肤 Skin	第 2 周 Week 2	1.73±0.48 ^{a,A}	3.19±0.26 ^{b,B}	3.04±0.89 ^{b,A}	2.70±0.84 ^{b,A}	2.95±0.68 ^{b,AB}
	第 4 周 Week 4	2.26±0.37 ^{a,A}	3.90±0.15 ^{b,C}	3.78±0.48 ^{b,AB}	3.87±0.33 ^{b,AB}	3.23±0.57 ^{b,AB}
	第 6 周 Week 6	2.63±0.59 ^{a,A}	4.02±0.25 ^{b,C}	4.83±0.52 ^{c,B}	4.13±0.17 ^{bc,B}	3.74±0.36 ^{b,B}
	初始 Initial	2.63±0.46 ^A	2.63±0.46 ^A	2.63±0.46 ^A	2.63±0.46 ^A	2.63±0.46 ^A
尾鳍 Caudal fin	第 2 周 Week 2	1.77±0.07 ^{a,A}	10.08±1.13 ^{c,B}	12.08±1.15 ^{c,B}	7.11±0.95 ^{b,B}	9.85±1.94 ^{c,B}
	第 4 周 Week 4	1.93±0.37 ^{a,A}	11.74±0.41 ^{c,B}	15.35±1.80 ^{d,C}	10.24±0.96 ^{b,C}	12.85±0.71 ^{c,BC}
	第 6 周 Week 6	2.73±0.52 ^{a,A}	15.25±0.90 ^{b,C}	17.84±0.61 ^{c,C}	15.78±0.41 ^{b,D}	15.82±0.56 ^{b,C}
全鱼 Whole body		5.59±0.27 ^a	7.73±0.39 ^b	7.69±0.35 ^b	7.40±0.16 ^b	7.21±0.06 ^b
虾青素沉积率 Astaxanthin retention/%		63.16±3.49 ^b	10.37±0.57 ^a	8.89±0.36 ^a	9.71±1.67 ^a	9.28±0.08 ^a

同行数据肩标不同小写字母表示不同组间差异显著 ($P<0.05$); 同列数据肩标不同大写字母表示不同时间差异显著 ($P<0.05$)。表 5 同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference among different groups ($P<0.05$); in the same column, values with different capital letter superscripts mean significant difference among different time ($P>0.05$). The same as Table 5.

2.5 不同来源虾青素对虹鳟血清类胡萝卜素含量的影响

由表 5 可知,各组血清类胡萝卜素含量随养殖时间的增加而增加,Ast、AF(除第 2 周外)、AE 和 HE 组血清类胡萝卜素含量在第 2、4、6 周时均显著高于对照组 ($P<0.05$),且在第 4、6 周时相互之间无显著差异 ($P>0.05$)。

2.6 不同来源虾青素对虹鳟肌肉、肝脏和血清抗氧化能力的影响

由表 6 可知,各虾青素添加组肌肉和血清的 T-SOD 活性和 MDA 含量均显著低于对照组 ($P<0.05$),Ast、AF、AE 和 HE 组各组织的抑制羟自由基能力均显著高于对照组 ($P<0.05$);AF 组的肌肉

抗氧化指标与 AE 组无显著差异 ($P>0.05$),但肝脏抑制羟自由基能力显著低于 AE 组 ($P<0.05$),血清 T-SOD 活性显著高于 AE 组 ($P<0.05$);AE 和 HE 组的肌肉、肝脏和血清抗氧化指标与 Ast 组均无显著差异 ($P>0.05$)。

2.7 不同来源虾青素对虹鳟肌肉持水力的影响

由表 7 可知,各组的滴水损失随着时间的延长而增加,Ast、AE 和 HE 组的滴水损失(除 Ast 组 2 h 的滴水损失外)和冷冻损失均显著低于对照组 ($P<0.05$);此外,AF 组 4、6 h 的滴水损失也显著低于对照组 ($P<0.05$),冷冻损失与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。

表5 不同来源虾青素对虹鳟血清类胡萝卜素含量的影响

Table 5 Effects of different astaxanthin sources on serum carotenoid contents of rainbow trout $\mu\text{g/mL}$

养殖时间 Breeding time	对照组 Control group	合成虾青素组 Ast group	福寿花花瓣组 AF group	福寿花 提取物组 AE group	雨生红球藻 提取物组 HE group
初始 Initial	0.14±0.05 ^A				
第2周 Week 2	0.26±0.04 ^{a,AB}	0.50±0.07 ^{bc,B}	0.35±0.06 ^{ab,B}	0.42±0.07 ^{bc,A}	0.53±0.09 ^{c,B}
第4周 Week 4	0.26±0.16 ^{a,A}	1.09±0.18 ^{b,C}	0.95±0.08 ^{b,C}	0.90±0.08 ^{b,B}	1.01±0.14 ^{b,C}
第6周 Week 6	0.32±0.07 ^{a,A}	1.24±0.07 ^{b,C}	1.13±0.05 ^{b,D}	1.18±0.17 ^{b,B}	1.30±0.12 ^{b,D}

表6 不同来源虾青素对虹鳟肌肉、肝脏和血清抗氧化能力的影响

Table 6 Effects of different astaxanthin sources on antioxidant ability of flesh, liver and serum of rainbow trout

组织 Tissue	项目 Items	对照组 Control group	合成虾青素组 Ast group	福寿花花瓣组 AF group	福寿花 提取物组 AE group	雨生红球藻 提取物组 HE group
肌肉 Flesh	总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot)	8.66±0.41 ^b	6.45±0.66 ^a	6.69±0.74 ^a	6.24±0.53 ^a	6.14±0.51 ^a
	丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	11.39±1.45 ^b	7.04±0.91 ^a	7.79±0.73 ^a	6.44±0.65 ^a	6.44±0.76 ^a
	抑制羟自由基能力 Inhibition ability of ·OH/(U/mg prot)	7.25±0.96 ^a	12.84±1.06 ^b	11.26±1.26 ^b	12.23±0.78 ^b	12.99±1.24 ^b
肝脏 Liver	总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot)	5.32±0.16 ^b	4.44±0.17 ^a	4.87±0.19 ^{ab}	4.57±0.59 ^a	4.58±0.03 ^a
	丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	2.68±0.42 ^c	1.89±0.32 ^{ab}	2.41±0.50 ^{bc}	1.63±0.57 ^a	1.85±0.49 ^{ab}
	抑制羟自由基能力 Inhibition ability of ·OH/(U/mg prot)	12.75±2.34 ^a	19.02±0.98 ^{bc}	16.84±1.81 ^b	21.74±3.12 ^c	19.70±2.63 ^{bc}
血清 Serum	总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mL)	249.17±8.73 ^c	211.52±5.86 ^{ab}	216.79±2.43 ^b	204.16±7.00 ^a	208.72±8.27 ^{ab}
	丙二醛 MDA/(nmol/mL)	13.11±1.05 ^c	4.39±0.71 ^a	7.48±0.91 ^b	5.47±1.55 ^{ab}	5.77±0.97 ^{ab}
	抑制羟自由基能力 Inhibition ability of ·OH/(U/mL)	89.48±9.88 ^a	193.35±10.78 ^b	190.56±4.19 ^b	205.60±1.05 ^b	200.64±9.90 ^b

3 讨论

3.1 不同来源虾青素对虹鳟生长性能的影响

关于 Ast 和 HP 对鱼类生长的影响均存在不同报道。Christiansen 等^[21]和王磊等^[22]分别在大西洋鲑鱼种(1.75 g)和七彩神仙鱼饲料中添加 Ast 和 HP, 两者的生长性能均得到了显著提高。然而, Page 等^[23]、Yanar 等^[24]和 Amar 等^[25]分别在饲料中添加 50、70 和 100 mg/kg Ast, 对虹鳟的生

长性能均无显著影响。Pham 等^[2]在饲料中添加 2.0 g/kg HE(折算成虾青素含量为 100 mg/kg), 对牙鲈幼鱼增重率、特定生长率和存活率也无显著影响。本试验中, Ast 和 HE 的添加, 对虹鳟的生长性能也无显著影响, 尽管两者的饲料系数略高于对照组, 但无显著差异, 可能是由试验误差引起。虾青素对鱼类生长性能的作用效果, 可能与鱼的种类、性别、生长阶段、饲料组成、养殖条件等因素有关。

表 7 不同来源虾青素对虹鳟肌肉持水力的影响

Table 7 Effects of different astaxanthin sources on flesh water-holding capacity of rainbow trout

%

项目 Items	滴水损失 Drip loss			冷冻损失
	2 h	4 h	6 h	Thawing loss
对照组 Control group	9.74±1.06 ^b	18.69±1.78 ^c	23.91±1.71 ^c	6.19±0.47 ^b
合成虾青素组 Ast group	8.73±0.85 ^{ab}	13.71±1.04 ^b	17.62±2.02 ^b	4.66±0.69 ^a
福寿花花瓣组 AF group	8.23±0.63 ^{ab}	14.18±0.39 ^b	16.96±1.33 ^b	5.57±0.84 ^{ab}
福寿花提取物组 AE group	7.50±1.11 ^a	10.78±1.51 ^a	14.52±1.50 ^a	4.80±0.55 ^a
雨生红球藻提取物组 HE group	7.55±1.27 ^a	12.33±1.61 ^{ab}	17.47±1.46 ^b	4.86±0.41 ^a

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$).

本试验中,AF 的添加虽然对虹鳟存活率没有产生影响(为 100%),却降低了鱼体生长性能,这在一定程度上反映了花瓣中所含的生物碱、强心甙等有毒有害物质对摄食和饲料利用产生了负面影响,表明 AF 不宜直接添加到虹鳟饲料中。为减轻或消除 AF 中有毒有害物的影响,对其中的虾青素进行提取是一条有效的途径。强心甙是水溶性物质,而虾青素的提取是一个有机溶剂萃取的过程,故 AE 中已基本不含强心甙物质。有研究表明,饲料中添加 0.01% 的 AE(折算成虾青素添加量为 100 mg/kg)对虹鳟生长性能无显著影响^[8],本试验在饲料中添加 3.4 g/kg AE,对虹鳟的生长性能也没有产生不利影响。今后,福寿花资源的开发利用应走活性物质提取这条道路。

3.2 不同来源虾青素对虹鳟肉色和虾青素沉积的影响

虹鳟的肌肉红度值是其品质的一个重要评价标准,主要取决于体内虾青素的沉积。Rahman 等^[26]以添加 100 mg/kg Ast 的饲料饲喂体重 18.5 g 的虹鳟 10 周,显著增加了肌肉红度值,肌肉虾青素含量达到 6.1 mg/kg。Zhang 等^[19]用添加了 100 mg/kg 的 Ast 饲料饲喂 101 g 的虹鳟 60 d,肌肉红度值显著增加,虾青素含量达到 8.03 mg/kg;De La Mora 等^[27]在饲料中添加 80 mg/kg Ast,饲喂体重 161 g 的虹鳟 6 周后,肌肉虾青素含量可达 8.8 mg/kg。本试验虹鳟养殖 6 周后,HE 和 AE 组的肌肉红度值、虾青素含量均显著增加,达到和 Ast 一致的水平,但肌肉虾青素含量偏低,仅为 4.96~5.26 mg/kg,可能与养殖时间较短(6 周)以及试验鱼的规格较小有关(初重为 6.28 g)。在养殖生产中,通常是在上市前一段时间对虹鳟肌肉进行着色,本试验采用的虹鳟规格

较小,主要是考虑到小规格鱼种在实验室条件下易于开展养殖,可在更大范围内进行虾青素源的筛选,从而为虹鳟成鱼着色试验的开展奠定基础。

此外,本试验在饲料中分别添加 Ast、AF 和 AE 均显著提高了虹鳟的肌肉红度和黄度值;其中 Ast 和 AE 组在养殖 6 周末,肌肉红度值和虾青素含量均无显著差异,这与 Kamata 等^[28]在虹鳟上的研究结果一致。然而,Kamata 等^[8]发现在饲料中添加 5.05% AF(折算成虾青素添加量为 100 mg/kg)对虹鳟的肉色无显著影响,其原因可能是试验饲料在制作 5~6 d 后出现了轻微变味,对虹鳟的摄食量产生了较大影响,从而导致色素沉积效果较差。

AF 和 HP 中的虾青素多数以酯的形式存在^[29],而人工 Ast 为游离态^[9]。有研究表明,酯化虾青素更有利于动物体吸收,这可能与虾青素酯极性小,在消化道中的溶解性好有关^[30-31];而 Henmi 等^[32]认为,在同等虾青素添加量下,游离虾青素的着色效果优于酯化虾青素,这可能是因为游离虾青素与肌动球蛋白结合紧密,单酯化的虾青素与肌动球蛋白结合弱,而二酯则完全不结合^[32],由此导致酯化虾青素的沉积效果差。然而,在本试验中,AF、AE 和 HE 组的虾青素沉积与 Ast 组无显著差异,与 Bowen 等^[33]用添加单酯、双酯和 Ast 的饲料饲喂虹鳟的研究结果一致。Schiedt^[34]和周庆新等^[35]研究认为,虾青素酯进入动物体后需要进行水解才能被吸收利用。苏芳^[36]的研究也发现,雨生红球藻源虾青素在虹鳟体内传递的过程中发生了脱酯化。这些研究均表明,虾青素的酯化并不影响虹鳟对其的吸收利用。

3.3 不同来源虾青素对虹鳟抗氧化能力的影响

Rahman 等^[26]和 Zhang 等^[19]分别在饲料中添

加 50 和 100 mg/kg 虾青素投喂虹鳟,显著降低了血清 SOD 活性;虹鳟摄食添加红法夫酵母^[37]和 Ast^[18-19]的饲料后,肌肉 MDA 含量显著降低。此外,在马鲛脂鲤 (*Hypessobrycon eques* Steindachner)、艳鲛脂鲤 (*Hypessobrycon callistus*) 和斑节对虾 (*Penaeus monodon*) 饲料中添加 Ast 也显著提高了机体抗氧化能力^[38-40]。同时,饲料中添加虾青素还能增强虹鳟血清、肌肉和肝脏抑制羟自由基的能力^[18,26]。本试验在饲料中分别添加 AE 和 HE,虹鳟肌肉、肝脏和血清中的抑制羟自由基能力显著提高,T-SOD 活性和 MDA 含量显著降低,达到与 Ast 一致水平。虾青素的抗氧化性能与其两端的紫罗兰酮环上的不饱和酮基和羟基有关,这些结构均具有较活泼的电子效应,可以吸引自由基或者向自由基提供电子,最终达到清除自由基,提高抗氧化的目的^[41]。

系水力是指当肌肉受到加压、冷冻等外力作用时仍保持原有水分的能力,是反映肌肉品质的一个重要指标,当肌肉暴露于空气中,会受到一定程度的氧化,致使肌肉表面水分挥发,使得滴水损失增加;当肌肉中存在如虾青素、维生素 E 等抗氧化物质时,可以减轻细胞膜的氧化程度,增强肌肉系水力^[19,42]。在本试验中,Ast、AE 和 HE 组的滴水损失和冷冻损失较对照组均有显著降低(Ast 组 2 h 滴水损失除外)。可见,在饲料中添加 Ast、AE 和 HE 均能延长虹鳟肌肉的货架寿命。本试验还发现,AE 组在 6 h 的肌肉滴水损失低于 Ast 和 HE 组,这意味着 AE 改善肌肉货架寿命的能力可能强于 Ast 和 HE,这是否与 AE 中的其他抗氧化物质有关,有待于进一步研究。

4 结 论

饲料中添加 AE、HE 能有效改善虹鳟肌肉颜色,增强机体抗氧化能力,达到和添加 Ast 一致的效果,但 AF 不宜直接用作虹鳟的着色剂。

参考文献:

[1] BAKER R T M, PFEIFFER A M, SCHÖNER F J, et al. Pigmenting efficacy of astaxanthin and canthaxanthin in fresh-water reared Atlantic salmon, *Salmo salar* [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2002, 99 (1/2/3/4): 97-106.

[2] PHAM M A, BYUN H G, KIM K D, et al. Effects of

dietary carotenoid source and level on growth, skin pigmentation, antioxidant activity and chemical composition of juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. *Aquaculture*, 2014, 431: 65-72.

[3] STOREBAKKEN T, SØRENSEN M, BJERKENG B, et al. Utilization of astaxanthin from red yeast, *Xanthophyllomyces dendrorhous*, in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*: effects of enzymatic cell wall disruption and feed extrusion temperature [J]. *Aquaculture*, 2004, 236(1/2/3/4): 391-403.

[4] TEIMOURI M, AMIRKOLAIE A K, YEGANEH S. The effects of *Spirulina platensis* meal as a feed supplement on growth performance and pigmentation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2013, 396: 14-19.

[5] YUAN J P, CHEN F, LIU X, et al. Carotenoid composition in the green microalga *Chlorococcum* [J]. *Food Chemistry*, 2002, 76(3): 319-325.

[6] RENSTRØM B, BERGER H, LIAAEN-JENSEN S. Esterified, optically pure (3S, 3' S)-astaxanthin from flowers of *Adonis annua* [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 1981, 9(4): 249-250.

[7] HOSSEINI M, TAHERKHANI M, GHORBANI NO-HOOJI M. Introduction of *Adonis aestivalis* as a new source of effective cytotoxic cardiac glycoside [J]. *Natural Product Research*, 2019, 33(6): 915-920.

[8] KAMATA T, NEAMTU G, TANAKA Y, et al. Utilization of *Adonis aestivalis* as a dietary pigment source for rainbow trout *Salmo gairdneri* [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1990, 56(5): 783-788.

[9] LORENZ R T, CYSEWSKI G R. Commercial potential for *Haematococcus microalgae* as a natural source of astaxanthin [J]. *Trends in Biotechnology*, 2000, 18(4): 160-167.

[10] AL-BULISHI M S M, XUE C H, TANG Q J. Health aspects of astaxanthin: a review [J]. *Canadian Journal of Clinical Nutrition*, 2015, 3(2): 71-78.

[11] HAGEN C, SIEGMUND S, BRAUNE W. Ultrastructural and chemical changes in the cell wall of *Haematococcus pluvialis* (Volvocales, Chlorophyta) during aplanospore formation [J]. *European Journal of Phycology*, 2002, 37(2): 217-226.

[12] SHEIKHZADEH N, TAYEFI-NASRABADI H, OUSHANI A K, et al. Effects of *Haematococcus pluvialis* supplementation on antioxidant system and metabolism in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2012, 38(2): 413-419.

- [13] TOLASA S, CAKLI S, OSTERMEYER U. Determination of astaxanthin and canthaxanthin in salmonid [J]. *European Food Research and Technology*, 2005, 221 (6): 787-791.
- [14] TEJERA N, CEJAS J R, RODRIGUEZ C, et al. Pigmentation, carotenoids, lipid peroxides and lipid composition of skin of red porgy (*Pagrus pagrus*) fed diets supplemented with different astaxanthin sources [J]. *Aquaculture*, 2007, 270(1/2/3/4): 218-230.
- [15] LI M, WU W J, ZHOU P P, et al. Comparison effect of dietary astaxanthin and *Haematococcus pluvialis* on growth performance, antioxidant status and immune response of large yellow croaker *Pseudosciaena crocea* [J]. *Aquaculture*, 2014, 434: 227-232.
- [16] ZA ŤKOVÁ I, SERGEJEVOVÁ M, URBAN J, et al. Carotenoid-enriched microalgal biomass as feed supplement for freshwater ornamentals; albinic form of wels catfish (*Silurus glanis*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17(3): 278-286.
- [17] JU Z Y, DENG D F, DOMINY W G, et al. Pigmentation of Pacific White shrimp, *Litopenaeus vannamei*, by dietary astaxanthin extracted from *Haematococcus pluvialis* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2011, 42(5): 633-644.
- [18] ZHAO X X, HU J, ZHANG X Q, et al. Effects of E/Z isomers and coating materials of astaxanthin products on the pigmentation and antioxidation of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2016, 47(3): 341-351.
- [19] ZHANG J J, LI X Q, LENG X J, et al. Effects of dietary astaxanthins on pigmentation of flesh and tissue antioxidation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture International*, 2013, 21(3): 579-589.
- [20] SONG X L, WANG L, LI X Q, et al. Dietary astaxanthin improved the body pigmentation and antioxidant function, but not the growth of discus fish (*Symphysodon* spp.) [J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(4): 1359-1367.
- [21] CHRISTIANSEN R, TORRISSEN O J. Growth and survival of Atlantic salmon, *Salmo salar* L. fed different dietary levels of astaxanthin. Juveniles [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1996, 2(1): 55-62.
- [22] 王磊, 陈再忠, 冷向军, 等. 饲料中添加雨生红球藻对七彩神仙鱼生长、体色及抗氧化力的影响 [J]. *淡水渔业*, 2016, 46(6): 92-97.
- WANG L, CHEN Z Z, LENG X J, et al. Effect of *Haematococcus pluvialis* on growth, body color and antioxidation capacity of discus fish *Symphysodon haraldi* [J]. *Freshwater Fisheries*, 2016, 46(6): 92-97. (in Chinese)
- [23] PAGE G I, DAVIES S J. Tissue astaxanthin and canthaxanthin distribution in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2006, 143(1): 125-132.
- [24] YANAR Y, BÜYÜKÇAPAR H, YANAR M, et al. Effect of carotenoids from red pepper and marigold flower on pigmentation, sensory properties and fatty acid composition of rainbow trout [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(1): 326-330.
- [25] AMAR E C, KIRON V, SATOH S, et al. Influence of various dietary synthetic carotenoids on bio-defence mechanisms in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) [J]. *Aquaculture Research*, 2001, 32 (Suppl.1): 162-173.
- [26] RAHMAN M M, KHOSRAVI S, CHANG K H, et al. Effects of dietary inclusion of astaxanthin on growth, muscle pigmentation and antioxidant capacity of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Preventive Nutrition and Food Science*, 2016, 21(3): 281-288.
- [27] DE LA MORA G I, ARREDONDO-FIGUEROA J L, PONCE-PALAFIX J T, et al. Comparison of red chilli (*Capsicum annum*) oleoresin and astaxanthin on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillet pigmentation [J]. *Aquaculture*, 2006, 258(1/2/3/4): 487-495.
- [28] KAMATA T, TANAKA Y, YAMADA S, et al. Study of carotenoid composition and fatty acids of astaxanthin diester in rainbow trout *Salmo gairdneri* fed the *Adonis* extract [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1990, 56(5): 789-794.
- [29] MAOKA T, ETOH T, KISHIMOTO S, et al. Carotenoids and their fatty acid esters in the petals of *Adonis aestivalis* [J]. *Journal of Oleo Science*, 2011, 60(2): 47-52.
- [30] SOMMER T R, POTTS W T, MORRISSEY N M. Utilization of microalgal astaxanthin by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 1991, 94(1): 79-88.
- [31] HORN D, RIEGER J. Organic nanoparticles in the aqueous phase-theory, experiment, and use [J]. *Angewandte Chemie (International Edition)*, 2001, 40

- (23):4330-4361.
- [32] HENMI H, IWATA T, HATA M. Studies on the carotenoids in the muscle of salmon I. Intracellular distribution of carotenoids in the muscle studies on the carotenoids in the muscle of salmon [J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1987, 37(3/4): 101-111.
- [33] BOWEN J, SOUTAR C, SERWATA R D, et al. Utilization of (3S,3'S)-astaxanthin acyl esters in pigmentation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2002, 8(1): 59-68.
- [34] SCHIEDT K. Absorption and metabolism of carotenoids in birds, fish and crustaceans [M]//BRITTON G, LIAAEN-JENSEN S, PFANDER H. Carotenoids volume 3: biosynthesis and metabolism. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 1998: 285-358.
- [35] 周庆新, 杨鲁, 徐杰. 水生红球藻源虾青素酯的消化吸收特性研究 [J]. 中国食品学报, 2019, 19(4): 125-132.
ZHOU Q X, YANG L, XU J, et al. Studies on the digestion and absorption characteristics of esterified astaxanthins from *Haematococcus pluvialis* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(4): 125-132. (in Chinese)
- [36] 苏芳. 类胡萝卜素在藻虾蟹鱼中的结构分布特征及虾青素异构化研究 [D]. 博士学位论文. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2018: 93-99.
SU F. A study on the structure distribution of carotenoids in algae, shrimps, crabs and fishes and the isomerization of astaxanthin [D]. Ph.D. Thesis. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018: 93-99. (in Chinese)
- [37] NAKANO T, KANMURI T, SATO M, et al. Effect of astaxanthin rich red yeast (*Phaffia rhodozyma*) on oxidative stress in rainbow trout [J]. Biochimica et Biophysica Acta: General Subjects, 1999, 1426(1): 119-125.
- [38] PAN C H, CHIEN Y H, WANG Y J, et al. Antioxidant defence to ammonia stress of characins (*Hyphessobrycon eques* Steindachner) fed diets supplemented with carotenoids [J]. Aquaculture Nutrition, 2011, 17(3): 258-266.
- [39] WANG Y J, CHIEN Y W, PAN C H, et al. Effects of dietary supplementation of carotenoids on survival, growth, pigmentation, and antioxidant capacity of characins, *Hyphessobrycon callistus* [J]. Aquaculture, 2006, 261(2): 641-648.
- [40] PAN C H, CHIEN Y H, HUNTER B. The resistance to ammonia stress of *Penaeus monodon* Fabricius juvenile fed diets supplemented with astaxanthin [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 297(1): 107-118.
- [41] NAGUIB Y M A. Antioxidant activities of astaxanthin and related carotenoids [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(4): 1150-1154.
- [42] 李小勤, 胡斌, 冷向军, 等. VE 对草鱼成鱼肌肉品质和抗氧化性能的影响 [J]. 水生生物学报, 2009, 33(6): 1132-1139.
LI X Q, HU B, LENG X J, et al. Effect of supplemental VE on meat quality and antioxidant capacity of adult grass carp [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, 33(6): 1132-1139. (in Chinese)

Effects of Different Astaxanthin Sources on Growth Performance, Flesh Color and Antioxidant Ability of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*)

ZHANG Chunyan^{1,2,3} WEN Dengxin^{1,2,3} YAO Wenxiang^{1,2,3} LI Xiaoqin^{1,2,3}
WU Shilin⁴ LENG Xiangjun^{1,2,3*}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Guangzhou Wisdom Bio-Technology Co., Ltd., Science Avenue, Guangzhou 510663, China)

Abstract: This study was investigated that the effects of different astaxanthin sources on the growth performance, flesh color and antioxidant ability of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Three hundred and seventy-five rainbow trout with an average body weight of (6.27±0.04) g were randomly assigned to 5 groups with 3 replicates per group and 25 fish per replicate. Five iso-nitrogenous and iso-energetic diets were designed as the control diet and the astaxanthin sources supplemented diets, including 1.0 g/kg synthetic astaxanthin product (Ast), 6.5 g/kg *Adonis aestivalis* flower (AF), 3.4 g/kg *Adonis aestivalis* extract (AE) and 4.4 g/kg *Haematococcus pluvialis* extract (HE) with the same astaxanthin inclusion of 100 mg/kg. Then the five diets were fed to rainbow trout for 6 weeks. The results showed as follows: adding Ast, AE and HE had no significant effects on weight gain rate (WGR) and feed conversion ratio (FCR) ($P>0.05$). However, weight gain rate (WGR) in AF group significantly decreased ($P<0.05$) and feed conversion rate (FCR) significantly increased ($P<0.05$). The flesh redness (a^*), yellowness (b^*) values, tissue astaxanthin content and the serum carotenoid content (except the AF group at the 2nd week) in Ast, AF, AE and HE groups were significantly higher than those in control group ($P<0.05$), and the flesh lightness (L^*) value was significantly lower than that in the control group ($P<0.05$). Compared with the control group, the supplementation of Ast, AE and HE significantly decreased the flesh thawing loss, drip loss at the 4 and 6 h ($P<0.05$), significantly reduced the total superoxide dismutase activity and malondialdehyde content in flesh, liver and serum ($P<0.05$), and significantly increased inhibition ability of hydroxyl radical ($P<0.05$). In conclusion, the supplementation of AE and HE in diet effectively improve the flesh pigmentation and antioxidant capacity of rainbow trout, and reach the similar effects to synthetic astaxanthin, while AF is not suggested to be used in the diet of rainbow trout. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(2):1008-1019]

Key words: synthetic astaxanthin; *A. aestivalis*; *Haematococcus pluvialis* extract; rainbow trout; growth performance; flesh color; antioxidation