

饲料中添加螺旋藻和叶黄素对杂交黄颡鱼生长、抗氧化能力和体色异常调控的比较研究

刘翠 刘昊昆 朱晓鸣 韩冬 金俊琰 杨云霞 解绶启

THE EFFECTS OF *ARTHROSPIRA PLATENSIS* AND LUTEIN ON THE GROWTH, ANTIOXIDANT CAPACITY AND PIGMENTATION IN HYBRID YELLOW CATFISH (*PELTEOBAGRUS FULVIDRACO*♀ × *PELTEOBAGGRUS VACHELLI*♂)

LIU Cui, LIU Hao-Kun, ZHU Xiao-Ming, HAN Dong, JIN Jun-Yan, YANG Yun-Xia, XIE Shou-Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2020.139>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杂交黄颡鱼与普通黄颡鱼幼鱼生长性能及耐低氧能力的比较

THE GROWTH CHARACTERISTICS AND HYPOXIA TOLERANT ABILITY OF YELLOW CATFISH AND HYBRID CATFISH
水生生物学报. 2019, 43(6): 1271–1279 <https://doi.org/10.7541/2019.151>

氧化油脂对斑点叉尾生长、体色和抗氧化能力的影响

EFFECT OF OXIDIZED OILS ON GROWTH, BODY COLOR AND ANTIOXIDANT CAPACITY OF CHANNEL CATFISH, *ICTALURUS PUNCTATUS*
水生生物学报. 2019, 43(1): 60–68 <https://doi.org/10.7541/2019.008>

黄颡鱼和杂交黄颡鱼“黄优1号”形态及性腺发育的比较

THE MORPHOLOGY AND GONAD DEVELOPMENT OF *PELTEOBAGRUS FULVIDRACO* AND ITS INTERSPECIFIC HYBRID “HUANGYOU NO. 1” WITH *PELTEOBAGGRUS VACHELLI*
水生生物学报. 2019, 43(6): 1231–1238 <https://doi.org/10.7541/2019.146>

应用DNA分子标记鉴定黄颡鱼、瓦氏黄颡鱼及其杂交种的研究

IDENTIFICATION OF *PELTEOBAGRUS FULVIDRACO*, *PELTEOBAGGRUS VACHELLI* AND THEIR INTERSPECIFIC HYBRID BY DNA MARKERS
水生生物学报. 2017, 41(2): 321–325 <https://doi.org/10.7541/2017.39>

壳寡糖对杂交黄颡鱼“黄优1号”(黄颡鱼♀ × 瓦氏黄颡鱼♂)生长性能与免疫机能的影响

EFFECTS OF DIETARY CHITOSAN OLIGOSACCHARIDE ON GROWTH PERFORMANCE AND IMMUNITY OF HYBRID YELLOW CATFISH “HUANGYOU NO. 1” *TACHYSURUS FULVIDRACO*♀ × *TACHYSURUS VACHELLI*♂
水生生物学报. 2020, 44(4): 707–716 <https://doi.org/10.7541/2020.085>

饲料中添加谷胱甘肽对黄颡鱼幼鱼组织谷胱甘肽含量、免疫及抗氧化性能的影响

EFFECTS OF DIETARY SUPPLEMENTATION WITH GLUTATHIONE ON TISSUE GSH LEVEL, IMMUNITY, AND ANTIOXIDANT CAPACITY OF JUVENILE YELLOW CATFISH (*PELTEOBAGURS FULVIDRACO*)
水生生物学报. 2018, 42(4): 728–735 <https://doi.org/10.7541/2018.089>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2020.139

饲料中添加螺旋藻和叶黄素对杂交黄颡鱼生长、 抗氧化能力和体色异常调控的比较研究

刘翠^{1,2} 刘昊昆¹ 朱晓鸣^{1,3} 韩冬^{1,3} 金俊琰¹ 杨云霞¹ 解绥启^{1,3}

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 湖北省水产动物营养与饲料工程技术研究中心, 武汉 430072)

摘要: 研究以杂交黄颡鱼(黄颡鱼*Pelteobagrus fulvidraco*♀×瓦氏黄颡鱼*Pelteobagrus vachelli*♂)“黄优一号”[体重(4.79±0.01) g]为研究对象, 探究饲料中螺旋藻(*Arthrospira platensis*)和叶黄素对黄颡鱼生长、抗氧化能力和抗病能力及体色异常调控的影响。实验设计4组饲料, 不添加任何色素源的对照组(Con), 添加2%的螺旋藻组(Spirulina, SP), 添加0.2%的叶黄素组(Lutein, Lut)及添加2%螺旋藻和0.1%溶血磷脂组(Spirulina+Lyso-phospholipids SPL)。720尾鱼随机放入12个缸, 每缸60尾鱼, 先使用对照组饲料投喂20d至体表颜色异常, 再用4种饲料饲养35d, 共4个处理, 每个处理3个重复。在养殖实验结束后进行嗜水气单胞菌攻毒实验。研究结果表明, 各个处理组间特定生长率(SGR)和摄食率(FR)均没有显著差异($P>0.05$); 但SP和SPL组饲料效率(FE)显著高于对照组($P<0.05$)。各组间全鱼水分、蛋白和脂肪含量没有显著差异($P>0.05$)。各组间实验鱼皮肤亮度没有显著性差异($P>0.05$); 但SP和SPL组皮肤黄度和饱和度显著高于另外两组($P<0.05$); 同时, SP和SPL组背部皮肤红度显著高于对照组($P<0.05$); SPL组腹部皮肤红度显著高于对照组($P<0.05$)。SP和SPL组腹部皮肤叶黄素含量显著高于对照组($P<0.05$)。对照组超氧化物歧化酶(SOD)活性显著低于另外3个处理组($P<0.05$); 各组过氧化氢酶(CAT)活性没有显著性差异($P>0.05$); SPL组谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性和还原型谷胱甘肽(GSH)含量显著高于叶黄素和对照组($P<0.05$); SP和SPL组丙二醛(MDA)含量显著低于另外2个处理组($P<0.05$)。SP和SPL组的实验鱼感染嗜水气单胞菌后的累计存活率显著高于叶黄素和对照组($P<0.05$)。综上所述, 黄颡鱼“黄优一号”在前期投喂缺乏色素的饲料造成体色异常后, 在饲料中添加螺旋藻或配合添加溶血卵磷脂比叶黄素更有效的改善鱼体的体色, 同时更能提高黄颡鱼的抗氧化能力和抗病力。

关键词: 螺旋藻; 叶黄素; 杂交黄颡鱼; 体色; 抗氧化能力

中图分类号: S965.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)05-1024-10



藻类因其蛋白质含量高, 氨基酸配比合理, 所含脂肪多以不饱和脂肪酸为主, 且富含维生素(如维生素A、B₁、B₂、B₆、B₁₂、V_C、V_E、烟酸盐、生物素、叶酸和泛酸等), 矿物质和类胡萝卜素等能够提高传统食品的营养价值, 最终影响人类和动物的生长和健康^[1]。螺旋藻(*Arthrospira platensis*)隶属于蓝藻门, 是目前开发利用最多的微藻之一, 在水产养殖中可用作蛋白质替代源或功能性添加

剂。在之前的研究中发现螺旋藻能够替代5%的鱼粉, 同时能显著提高鸚鵡鱼(*Oplegnathus fasciatus*)的特定生长率和蛋白质效率^[2]。在饲料中添加1%的螺旋藻能够显著增强尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的抵抗嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)的能力, 提高感染后的存活率^[3]。同时, 螺旋藻富含类胡萝卜素能够提高水产动物的体色和色素含量^[4,5]。叶黄素广泛存在于植物中, 尤其是万寿

收稿日期: 2020-06-12; 修订日期: 2020-11-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0900400); 国家现代农业产业技术体系(CARS-46); 淡水生态与生物技术国家重点实验室开放课题(2019FBZ02和2019FBZ05)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2018YFD0900400); China Agriculture Research System (CARS-46); the State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology (2019FBZ02 and 2019FBZ05)]

作者简介: 刘翠(1993—), 女, 博士研究生; 主要从事鱼类生理生态学研究。E-mail: liucui@ihb.ac.cn

通信作者: 杨云霞(1961—), 女, 高级实验师; 主要从事鱼类生理生态学研究。E-mail: yxyang@ihb.ac.cn

菊, 主要呈橙黄色或红色, 常用作家禽和水产动物着色剂^[6]。溶血卵磷脂是由卵磷脂失去一个脂肪酸基团所形成的磷脂的统称, 研究表明溶血卵磷脂能够促进动物的生长和对脂类等营养物质的吸收^[7,8]。

鱼类的体色是由真皮层下的色素细胞和色素颗粒相互作用形成的。鱼体内的色素主要包括黑色素和类胡萝卜素。和其他动物一样, 鱼类不能自身合成类胡萝卜素, 必须从食物中获取^[9]。因此, 类胡萝卜素缺乏会严重影响鱼体体色, 在饲料中添加含天然或者人工合成的类胡萝卜素改善鱼体体色是水产动物营养学研究的热点。同时, 随着经济的快速发展和生活水平的不断提高, 人们对水产品的品质和营养要求越来越高。水产养殖业因此备受关注, 但在高度密度集约化养殖条件下, 鱼类体色异常和健康问题频频出现。养殖中发生体色异常的多为无鳞鱼, 但近年来有鳞鱼类也经常发生体色异常。养殖鱼类体色异常不仅降低了其商品价值, 同时给养殖者带来巨大的经济损失。

黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)隶属于鲿形目、鲿科, 黄颡鱼属, 分布于河川、湖泊、沟渠等水域中, 其肉质细嫩、少刺无鳞、营养丰富, 是一种优质名贵经济鱼类。杂交黄颡鱼“黄优一号”是以连续3代选育的黄颡鱼为母本, 以连续2代选育的瓦氏黄颡鱼(*Pelteobagrus vachelli*)为父本, 人工杂交得到的子一代。黄颡鱼“黄优一号”较好地展现了杂交优势, 与黄颡鱼相比, 生长速度显著提高, 同时品质比瓦氏黄颡鱼接受度更高。但在人工养殖条件下黄颡鱼体色异常仍是比较受关注的问题。本文主要比较研究了饲料中添加螺旋藻及叶黄素对杂交黄颡鱼“黄优一号”生长、抗氧化和体色异常调控的影响, 以及在饲料中添加溶血磷脂对黄颡鱼的影响。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验设计4组饲料, 不添加任何色素源的对照组(Con), 添加2%的螺旋藻组(SP), 添加0.2%的叶黄素组(Lut)及添加2%螺旋藻和0.1%溶血磷脂组(SPL)。饲料配方、化学组成和色素含量如表1所示。其中螺旋藻购于内蒙古鄂尔多斯绿蚨源螺旋藻业有限公司, 叶黄素由湖北省武汉市大北农水产科技有限公司提供, 溶血卵磷脂由珠海建明工业有限公司提供。饲料由实验饲料机(SLR-45, 中国水产科学院渔业机械研究所)制成颗粒于60℃烘干, 冷藏于4℃备用。

1.2 饲养管理

在养殖实验开始之前, 对实验鱼暂养2周进行

驯化。暂养期间用商品饲料饱食投喂实验鱼, 使其适应实验条件, 每天投喂2次, 时间为8:30和18:30;

表1 饲料配方及生化组成

Tab. 1 Formulation and chemical composition of experimental diets

原料Ingredients (%干物质 Dry matter)	Con	SP	Lut	SPL
鱼粉Fishmeal ¹	30.00	28.24	30.00	28.24
螺旋藻 <i>A. platensis</i> ²	0.00	2.00	0.00	2.00
叶黄素Lutein ³	0.00	0.00	0.20	0.00
溶血磷脂 Lysophospholipids	0.00	0.00	0.00	0.10
豆粕Soybean meal	18.25	18.25	18.25	18.25
菜粕Rapeseed meal	18.30	18.30	18.30	18.30
面粉Wheat flour	15.00	15.00	15.00	15.00
鱼油Fish oil	2.54	2.54	2.54	2.54
豆油Soybean oil	2.54	2.54	2.54	2.54
纤维素Cellulose	4.87	4.63	4.67	4.53
维生素预混Vitamin premix ⁴	0.39	0.39	0.39	0.39
矿物质预混Mineral premix ⁵	5.00	5.00	5.00	5.00
CMC	3.00	3.00	3.00	3.00
胆碱Choline chloride	0.11	0.11	0.11	0.11
化学组成Chemical composition (%)				
水分Moisture	7.88	6.42	6.99	7.31
干物质Dry matter				
粗蛋白Crude protein	39.80	39.60	39.55	39.05
粗脂肪Crude lipid	8.61	8.37	8.75	8.05
叶黄素Lutein (μg/g)	4.23	7.52	8.66	7.50

注: ¹鱼粉: 白鱼粉, 美国海鲜公司; ²螺旋藻: 内蒙古鄂尔多斯绿蚨源螺旋藻业有限公司; ³叶黄素: 总叶黄素≥20.00 g/kg, 水分≤8.0%, 广州立达尔生物科技股份有限公司; ⁴维生素预混物 (mg/kg 饲料): 维生素A, 1.65; 维生素D, 0.025; 维生素E, 50; 维生素K, 10; 维生素C, 100; 硫胺素, 20; 核黄素, 20; 维生素B₆, 20; 维生素B₁₂, 0.02; 叶酸, 5; 泛酸钙, 50; 肌醇, 100; 烟酸, 100; 生物素, 0.1; 纤维素, 645.2; ⁵矿物质预混物(mg/kg 饲料): 氯化钠, 500; 七水合硫酸镁, 8155.6; 二水合磷酸二氢钠, 12500.0; 磷酸二氢钾, 16000.0; 二水合磷酸钙, 7650.6; 七水合硫酸亚铁, 2286.2; 五水合乳酸钙, 1750.0; 七水合硫酸锌, 178.0; 一水合硫酸锰, 61.4; 五水合硫酸铜, 15.5; 七水合硫酸钴, 0.5; 碘化钾, 1.5; 玉米淀粉, 753.7

Note: ¹ Fishmeal: White fishmeal, American Seafood Compay, Seattle, Washington, USA; ² *A. platensis*: Lvfyuan company, Ordos, China; ³ Lutein: Total lutein≥20.00 g/kg, moisture≤8.0%, Guangzhou leader bio-technology CO., LTD; ⁴ Vitamin premix (mg/kg diet): Vitamin A, 1.65; Vitamin D, 0.025; Vitamin E, 50; Vitamin K, 10; Vitamin C, 100; Thiamin, 20; Riboflavin, 20; Pyridoxine, 20; Cyanocobalamine, 0.02; Folic acid, 5; Calcium pantothenate, 50; Inositol, 100; Niacin, 100; Biotin, 0.1; Cellulose, 645.2; ⁵ Mineral premix (mg/kg diet): NaCl, 500; MgSO₄·7H₂O, 8155.6; NaH₂PO₄·2H₂O, 12500.0; KH₂PO₄, 16000.0; CaHPO₄·H₂O, 7650.6; FeSO₄·7H₂O, 2286.2; C₆H₁₀CaO₆·5H₂O, 1750.0; ZnSO₄·7H₂O, 178.0; MnSO₄·H₂O, 61.4; CuSO₄·5H₂O, 15.5; CoSO₄·7H₂O, 0.5; KI, 1.5; Corn starch, 753.7

实验前1天,实验鱼饥饿24h,选取体格健壮、规格均匀的个体[体重 (4.79 ± 0.01) g],称重后随机放入12个养殖缸中,每缸60尾。实验鱼先用对照组饲料饲养20d至体表颜色异常,再用4种饲料饲养35d,共4个处理,每处理3平行。实验期间,每天8:30和18:30投喂,每次投喂1h至表观饱食。

实验在室内循环水养殖系统的圆缸(水体积250 L)中进行。使用充气头在非投喂期间连续充气增氧。实验期间水温变化范围为 $(28.5 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 。光照周期为12L:12D,光照周期从8:00至20:00,使用节能灯作为光源。每周监测水体溶氧、氨氮和pH,溶氧 >7.5 mg/L,氨氮 <0.1 mg/L, pH为6.5—7.0。

1.3 攻毒实验

实验用菌为嗜水气单胞菌,由中国科学院水生生物研究所健康养殖实验室李爱华老师提供。该菌由鲫鱼体内分离出,经BHI固体培养基复苏生长后,单克隆转移到BHI液体培养基,在 30°C 条件下培养6h,然后在 $3500 \times g$ 离心10min,收获沉淀物并用PBS冲洗3次,获得攻毒实验菌种。在正式试验之前,先进行一个预实验,通过腹腔注射 0.5 mL四种浓度(2×10^7 、 2×10^8 、 2×10^9 和 2×10^{10} CFU/mL)的嗜水气单胞菌,确定本实验杂交黄颡鱼在 27.5°C 时的3d半致死浓度为 2×10^9 CFU/mL。

在养殖实验结束后,每缸选15尾鱼腹腔注射 0.5 mL 2×10^9 CFU/mL嗜水气单胞菌进行攻毒实验。实验水温 27.5°C 。统计攻毒后96h内各处理组杂交黄颡鱼的累计存活率。存活率计算公式如下:

$$\text{存活率}(\%) = (\text{存活鱼总数} / \text{起始鱼总数}) \times 100$$

1.4 实验取样

在实验开始时,随机取3组(每组12尾)鱼抹干称重,存于 -20°C 冰箱中,用于初始体成分分析。在20d实验结束时,将实验鱼饥饿24h后,称重取样,随机选3个缸,每缸取2尾鱼抹干称重,存于 -20°C 冰箱中,用于中间体重成分分析每缸取4尾拍照记录实验鱼体表颜色。在35d养殖结束后将实验鱼饥饿24h后,称重取样,每缸取2尾鱼抹干称重,存于 -20°C 冰箱中,用于终末体成分分析。然后每缸取6尾鱼,用肝素钠(浓度:0.2%)抗凝的注射器尾静脉取血,放入抗凝离心管中,在 4°C 下 3000 r/min离心7min,取上清血浆于 -80°C 冰箱保存,用于血液学指标测定。上述6尾鱼抽完血后冰盘解剖,取背皮和腹皮用灭菌后的锡箔纸包起来于 -80°C 冰箱保存,用于色素含量的测定。另外每缸取3尾鱼麻醉后用柯尼卡-美能达CR400色差计(Japan)进行皮肤颜色的测定,在每尾鱼左侧背部和腹部的同一位置(分别为背鳍下部和腹部)测量2次,在每次测量中,色差计

的探头需旋转 180° ,将2次测量的结果取平均值。 L 表示亮度, $+a^*$ 表示红色, $-a^*$ 表示绿色, $+b^*$ 表示黄色, $-b^*$ 表示蓝色^[10]。 C 表示色饱和度,计算公式为 $C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ^[11]。最后拍取各个处理组实验鱼照片。

1.5 样品分析

全鱼和饲料的生化组成测定参考AOAC^[12]的方法,水分是在 105°C 烘干至恒重测得;粗蛋白采用凯氏定氮仪(2300 Kjeltac Analyzer Unit, FOSS TECATOR, Sweden)测定;粗脂肪用索氏抽提法(Soxtoc system HT6, Tecator, Haganas, Sweden)以乙醚为溶剂测定;灰分在马福炉(中国湖北英山县建立电炉制造厂)中 550°C 下充分灼烧测得。

皮肤和饲料叶黄素的测定分别根据Karadas等^[13]和Ferreira等^[14]描述的方法略做修改。皮肤前处理如下:准确称取皮肤样品 200 — 300 mg(精确到 0.0001 g)放入 10 mL离心管中,加入 0.7 mL 5% NaCl溶液和 1 mL乙醇,后用组织匀浆机匀浆3min,匀浆时加入 2 mL正己烷,匀浆后加入 2 mL正己烷反复冲洗匀浆机上残留的组织样品,之后合并提取剂,在 4°C 4600 r/min条件下离心10min,取上清液并放入氮吹仪吹干,残留物复溶于色谱级甲醇:甲基叔丁基醚=86:14(v/v),溶解液经 0.22 μm 有机滤膜过滤,后上机(Waters e2695, USA)分析。饲料样品的前处理:准确称取饲料样品 1 g(精确到 0.001),加入蒸馏水 1 mL,漩涡振荡1min后加 3 mL提取剂(正己烷:丙酮:乙醇:甲苯=50:35:30:35, v/v/v/v),漩涡振 1 min,于黑暗处放置16h。之后加入40%氢氧化钾-甲醇溶液皂化饲料中的叶黄素酯,然后加入 3 mL正己烷,于黑暗处放置1h,加入 3 mL 10%硫酸钠溶液,放置1h,收集正己烷层并准确记录体积。用移液器吸取 200 μL 正己烷层,氮吹仪吹干,残留物复溶于色谱级甲醇:甲基叔丁基醚=86:14(v/v),溶解液经 0.22 μm 有机滤膜过滤,待上机(Waters e2695, USA)进样分析。高效液相色谱用的色谱柱是Waters YMC Carotenoid C30 column (5 μm , 4.6 mm $\times$ 250 mm),流动相A是甲醇:甲基叔丁基醚:水=810:150:40,流动相B是甲醇:甲基叔丁基醚=60:900。

血浆超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化氢酶(GPX)、还原型谷胱甘肽(GSH)和丙二醛(MDA)的测定均使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒。

1.6 数据处理

使用统计软件SPSS 19.0进行统计分析。实验结果首先进行方差齐性检验;方差齐性后,进行单因素方差分析(One-way ANOVA);若各实验组间差异显著,则进行Duncan's多重比较; $P < 0.05$ 表示差

异显著。

2 结果

2.1 生长和饲料利用

如表 2 所示, 对照饲料养殖 20d 后各个处理组的实验鱼的末重没有任何差异。后期不同饲料投喂 35d 后, 各个处理组间特定生长率(*SGR*)和摄食率(*FR*)均没有显著差异($P>0.05$); 但螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组饲料效率(*FE*)显著高于对照组($P<0.05$), 其中螺旋藻加溶血卵磷脂组饲料效率最高($P<0.05$)。对照组的蛋白沉积率(*PRE*)显著低于另外 3 个处理组($P<0.05$), 同样的, 螺旋藻加溶血卵磷脂组蛋白沉积率最高($P<0.05$)。

2.2 全鱼基本组分

在养殖实验结束后, 各组间全鱼水分、蛋白和脂肪含量没有显著差异($P>0.05$); 叶黄素和螺旋藻加溶血卵磷脂组灰分含量显著低于对照组($P>0.05$) (表 3)。

2.3 鱼体体色和皮肤色素含量

在养殖试验结束后(表 4), 各组间实验鱼皮肤亮度没有显著性差异($P>0.05$); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组皮肤黄度显著高于另外两组($P<0.05$); 同时, 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组背部皮肤红

度显著高于对照组($P<0.05$); 螺旋藻加溶血卵磷脂组腹部皮肤红度显著高于对照组($P<0.05$); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组实验鱼皮肤颜色饱和度显著高于另外两组($P<0.05$)。在养殖初期, 对照组饲料养殖 20d 和后期不同饲料养殖 35d 后实验鱼照片如图 1 所示。

对照饲料养殖 20d 和各处理组实验鱼背部皮肤叶黄素含量没有显著性差异($P>0.05$; 表 5); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组腹部皮肤叶黄素含量显著高于对照组($P<0.05$)。

2.4 血液抗氧化指标和攻毒后存活率

在养殖实验结束后, 对照组超氧化物歧化酶(*SOD*)活性显著低于另外 3 个处理组($P<0.05$; 表 6); 各组过氧化氢酶(*CAT*)活性没有显著性差异($P>0.05$); 螺旋藻加溶血卵磷脂组谷胱甘肽过氧化物酶(*GPX*)活性和还原型谷胱甘肽(*GSH*)含量显著高于叶黄素和对照组($P<0.05$); 螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组的丙二醛(*MDA*)含量显著低于另外 2 个处理组($P<0.05$)。

如图 2 所示, 攻毒 96h 后螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂组的实验鱼累计存活率显著高于叶黄素和对照组($P<0.05$)。

表 2 不同实验饲料对黄颡鱼生长和饲料利用的影响

Tab. 2 Effects of different diets on growth and feed utilization of yellow catfish ($n=3$)

指标Index	Con	SP	Lut	SPL
初始体重IBW (g) ¹	4.78±0.02	4.79±0.01	4.80±0.01	4.80±0.01
20d体重20 days BW (g) ²	8.64±0.15	8.46±0.34	8.81±0.42	8.30±0.14
终末体重FBW (g) ³	18.93±0.15	19.73±1.38	17.99±1.25	18.73±1.64
特定生长率SGR (%/d) ⁴	1.98±0.18	2.23±0.18	1.78±0.20	2.37±0.07
饲料效率FE (%) ⁵	31.48±4.66 ^a	48.50±2.17 ^b	38.40±5.56 ^{ab}	63.20±2.11 ^c
摄食率FR (%BW/d) ⁶	3.56±0.32	3.16±0.04	3.39±0.22	3.36±0.18
蛋白沉积率PRE (%) ⁷	14.03±2.34 ^a	22.03±0.93 ^b	19.10±1.47 ^b	27.88±0.06 ^c

注: 表中数据表示为平均值±标准误($n=3$), 同行数值不同上标英文字母表示差异显著($P<0.05$); 下同; ¹初始体重 IBW (g): Initial body weight; ²20d体重 20 days BW (g): 20 days body weight; ³终末体重 FBW (g): Final body weight; ⁴特定生长率 *SGR* (%/d)=100×[ln(终末体重)-ln(初始体重)]/天数; ⁵饲料效率 *FE* (%)=(100×鱼体总增重)/饲料干物质摄入量; ⁶摄食率 *FR* (%BW/d)=100×干物质摄食量/[天数×(初始体重+终末体重)/2]; ⁷蛋白质沉积率 *PRE* (%)=(100×鱼体蛋白质沉积量)/蛋白质摄入量

Note: Date presented are Mean±SE ($n=3$), Values in the same row with different superscript letters are significantly different ($P<0.05$). The same applies below. ⁴Specific growth rate (%/d)=100×[ln(FBW)-ln(IBW)]/days; ⁵Feed efficiency (%)=(100×fresh body weight gain)/dry feed intake; ⁶Feed rate (%BW/d)=100×dry feed intake/[days×(IBW+FBW)/2]; ⁷Protein retention efficiency (%)=(100×body retained protein)/protein intake

表 3 不同实验饲料对黄颡鱼的鱼体组成的影响

Tab. 3 Effects of different diets on body chemical composition of yellow catfish (%; $n=3$)

成分Composition	Con	SP	Lut	SPL
水分Moisture	74.98±0.25	74.16±0.32	74.36±0.91	73.13±0.56
粗蛋白Crude protein	14.30±0.11	14.58±0.09	14.34±0.23	14.57±0.25
粗脂肪Crude lipid	5.77±0.46	6.77±0.46	7.52±0.16	7.54±0.61
灰分Ash	3.66±0.06 ^b	3.48±0.05 ^{ab}	3.36±0.06 ^a	3.29±0.06 ^a

3 讨论

3.1 生长和饲料利用

本研究前期使用不补充任何色素添加剂的对照组饲料投喂杂交黄颡鱼, 20d后各个处理间的实验鱼体重没有统计学差异。在后期35d用对照组饲料及分别添加叶黄素、螺旋藻和螺旋藻加溶血卵磷脂的饲料继续投喂杂交黄颡鱼, 对杂交黄颡鱼生长和摄食率的影响并不显著, 但造成饲料效率和蛋白沉积率的差异。螺旋藻作为新型水产动物饲料原料已经引起了较高的关注, 在High density(*Salmo trutta caspius*)饲料中添加2.64%的螺旋藻替代2%的鱼粉对鱼体的生长和饲料利用均无显著影响, 但当添加量达到3.96%替代4%的鱼粉时, 实验鱼的特定生长率和饲料转化效率显著提高^[15], 说明螺旋藻可

以替代水产动物饲料中的鱼粉, 从而减轻鱼粉供不应求的压力。在饲料中添加螺旋藻的含量高达75%对尼罗罗非鱼的生长没有负面影响, 而且添加量在30%左右时, 鱼体的生长达到最大值^[16]。有学者报道螺旋藻能够改善动物肠道微生物平衡, 从而促进食物消化吸收, 最终提高动物的生长^[4, 5]。卵磷脂可以提高饲料转化率, 促进脂质的吸收和转运, 提高鱼类对脂肪和其他营养物质的消化吸收^[17]。在本研究中, 饲料中添加0.1%的溶血卵磷脂能显著提高杂交黄颡鱼的饲料效率, 于本研究结果一致的是在异育银鲫饲料中添加0.1%的溶血卵磷脂同样能提高异育银鲫的饲料效率^[7]。在对建鲤(*Cyprinus carpio* var. Jian)的研究中发现, 添加0.1%的乳化剂溶血卵磷脂实验鱼的饲料效率相比于对照组显著提高17.9%^[18], 相似的是在本研究中添加0.1%

表 4 不同实验饲料对黄颡鱼皮肤的颜色影响
Tab. 4 Body color of yellow catfish fed different experimental diets (n=9)

皮肤Skin		Con	SP	Lut	SPL
背部皮肤Dorsal skin	亮度 L	38.92±1.36	40.01±1.48	40.57±1.43	38.85±1.93
	红度 a*	-2.56±0.23 ^b	-3.22±0.33 ^a	-3.42±0.19 ^{ab}	-3.69±0.26 ^a
	黄度 b*	5.42±0.43 ^a	7.07±0.78 ^b	8.95±0.48 ^a	9.37±0.77 ^b
	饱和度 C	5.9 ±0.49 ^a	9.60±0.48 ^b	7.31±0.70 ^a	10.45±0.8 ^b
腹部皮肤Abdominal skin	亮度 L	83.69±0.36	83.07±0.28	82.86±0.32	82.85±0.31
	红度 a*	-7.22±0.24 ^b	-7.81±0.35 ^{ab}	-7.86±0.25 ^{ab}	-8.53±0.36 ^a
	黄度 b*	13.69±0.90 ^a	17.68±0.86 ^c	22.46±1.72 ^b	24.43±0.69 ^c
	饱和度 C	15.51±0.85 ^a	26.16±1.11 ^c	19.34±0.91 ^b	25.18±0.99 ^c

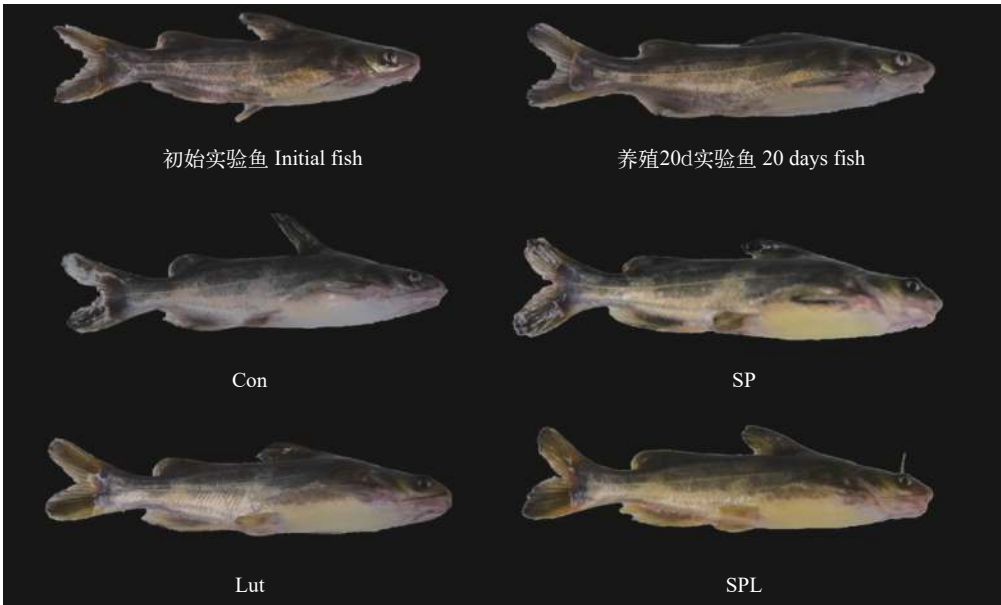


图 1 不同养殖阶段和不同处理组的实验鱼

Fig. 1 The fish of different stage and different treatment groups

Con. 对照组, 不添加色素; SP. 添加2% 螺旋藻; Lut. 添加0.2% 叶黄素; SPL. 添加添加2% 螺旋藻和0.1%溶血卵磷脂
Con. without pigments; SP. 2% *A. platensis*; Lut. 0.2% lutein; SPL. 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids

表 5 不同实验饲料对黄颡鱼皮肤叶黄素含量的影响
Tab. 5 Effects of different diets on skin lutein contents of yellow catfish (μg/g)

皮肤Skin	20d	Con	SP	Lut	SPL
背部皮肤Dorsal skin	15.03±1.88	16.90±0.91	18.27±0.50	17.31±1.30	16.70±0.99
腹部皮肤Abdominal skin	13.32±1.39 ^a	13.16±1.42 ^a	18.65±0.78 ^b	15.98±1.38 ^{ab}	18.10±1.64 ^b

表 6 不同实验饲料对黄颡鱼血浆抗氧化产物和抗氧化酶活性的影响
Tab. 6 Effects of different diets on oxidant and antioxidant activities in the plasma of yellow catfish (n=6)

指标Index	Con	SP	Lut	SPL
超氧化物歧化酶SOD (U/mL)	9.29±1.21 ^a	14.97±0.93 ^b	13.48±1.24 ^b	13.84±1.72 ^b
过氧化氢酶CAT (U/mL)	30.38±1.89	31.39±1.99	31.81±1.63	33.62±0.83
谷胱甘肽过氧化物酶GPX (U/mL)	38.78±1.82 ^a	44.64±3.30 ^{ab}	41.46±3.83 ^a	53.66±3.01 ^b
还原型谷胱甘肽GSH (μmol/L)	15.13±1.56 ^a	20.85±2.08 ^{ab}	16.78±1.64 ^a	25.33±2.17 ^b
丙二醛MDA (μmol/L)	5.96±0.42 ^b	4.51±0.40 ^a	6.81±0.59 ^b	4.59±0.29 ^a

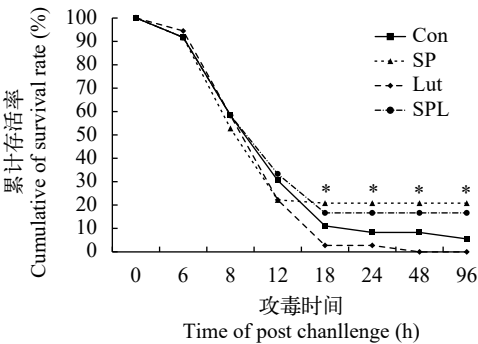


图 2 不同处理组对黄颡鱼攻毒后96h累计存活率的影响
Fig. 2 The cumulative survival rate (%) of yellow catfish fed with different diets challenging with *A. hydrophila* for 96h
每个数值为3个重复的平均值(n=12)。标记有*表示该实验组与对照组在某一时间具有显著性差异(P<0.05)
Each datum represents the mean of three replicates (n=12). Markers assigned with * mean significantly difference between experimental groups and the control group at a specific sampling time (P<0.05)

溶血卵磷脂相比于只添加2%的螺旋藻处理组, 黄颡鱼的饲料效率显著提升30.3%。叶黄素是家禽和水产饲料中常用的着色剂, 较多的研究结果显示其对动物的生长没有明显的促进作用^[19, 20], 这与本研究结果一致。

3.2 全鱼基本组分

在本研究中, 叶黄素、螺旋藻和溶血卵磷脂的添加对杂交黄颡鱼的体蛋白和体脂肪均无显著影响, 这与在淡水虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[21]、尼罗罗非鱼^[22, 23]和奥尼罗非鱼(*Oreochromis aureus* ♂×*Oreochromis niloticus* ♀)^[24]中的研究结果一致。但之前研究表明添加28.79%的螺旋藻能够降低鱼体的脂肪含量^[25], 是因为螺旋藻富含一种具有抗氧化和降脂功能的多酚类物质^[26–28]。此外, 螺旋藻富含多不饱和脂肪酸, 能够降低胆固醇和甘油三酯在

鱼体肝脏中的大量堆积, 从而降低体脂的含量^[29]。

3.3 鱼体体色

鱼类的体色是影响其品质的重要因素之一, 直接影响养殖鱼类的价格和消费者的选择。野生黄颡鱼体表颜色为黄黑相间的黄褐色, 但在人工养殖过程中, 配合饲料中营养物质含量, 色素的缺乏及养殖环境和鱼体自身的健康状况均会对鱼类的体色造成影响^[30]。在本研究中, 前期由于饲料中缺乏色素的补充造成杂交黄颡鱼体色退化, 在后期饲料中添加叶黄素, 螺旋藻及溶血卵磷脂对杂交黄颡鱼皮肤的亮度没有影响, 但可以增加鱼体皮肤的黄度、红度和饱和度, 其中螺旋藻的提升效果更为显著, 说明螺旋藻能够更快速的改善鱼体体色, 提高水产动物的品质, 从而增加水产品的价值。螺旋藻作为天然的类胡萝卜素来源, 在其他研究中也得到证实能够增强鱼体的体色和肉色^[31, 32]。叶黄素同样能够改善鱼类的体色, 在饲料中添加叶黄素和虾青素混合物能够增强大黄鱼皮肤的黄度值, 改善鱼体的体色^[33]。但本研究的结果表明, 在杂交黄颡鱼的体色异常的情况下, 饲料中添加螺旋藻能够比叶黄素更高效的改善鱼体的体色。与对照组相比, 螺旋藻饲料中添加溶血卵磷脂能够显著改善鱼体的体色, 但与只添加螺旋藻的处理组相比, 差异并不显著。

在饲料中添加螺旋藻及溶血卵磷脂, 杂交黄颡鱼腹部皮肤叶黄素的含量显著高于对照组, 添加叶黄素也能够增加腹部皮肤的叶黄素含量, 但效果并不显著。在本研究中, 虽然叶黄素饲料中的叶黄素含量高于螺旋藻饲料, 但最终叶黄素在杂交黄颡鱼皮肤中的沉积量却相反, 可能是由于螺旋藻饲料中叶黄素更易被鱼体吸收。在沙鳅(*Botia dario*)的研究中发现, 饲料中添加10%的螺旋藻可以显著增加鱼体皮肤和肌肉中的类胡萝卜素含量^[34]。叶黄素

属于脂溶性类胡萝卜素,和其他类胡萝卜素一样,鱼体不能自身合成,必须从食物中获取^[35]。叶黄素在动物体内的转运吸收,需要脂质的参与,最终由高密度脂蛋白(HDL)和低密度脂蛋白(LDL)转运到靶组织中^[36]。溶血卵磷脂是一种生物乳化剂,能够有效促进乳糜微粒的形成,增强脂肪的吸收和利用,进而有助于叶黄素的吸收和转运^[24]。

3.4 抗氧化能力和存活率

近年来,螺旋藻在水产养殖中的应用不只是作为鱼粉的替代源,同时作为一种功能型添加剂越来越受关注。螺旋藻因其富含藻蓝蛋白、类胡萝卜素和藻多糖等生物活性物质,能够增强抗氧化酶的活性,防止脂质过氧化和DNA损伤,清除自由基^[37]。在本研究中,饲料中添加螺旋藻能够增强杂交黄颡鱼血浆超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性,同时增加还原型谷胱甘肽(GSH)含量,降低脂质过氧化产物丙二醛(MDA)含量。与本研究一致,螺旋藻能够显著提高罗非鱼GSH含量,GPX和SOD活性降低的现象,通过清除自由基和提高鱼体的抗氧化性能使溴氰菊酯对鱼体的毒性最小化^[37]。同时,在石斑鱼(*Plectropomus leopardus*)的饲料中添加螺旋藻能够显著增强鱼体的总抗氧化能力(T-AOC),降低丙二醛的含量,显著提高鱼体感染哈维氏弧菌(*V. harveyi*)后的存活率^[38]。此外,研究表明鱼体的抗氧化状态和鱼体体色具有相关性,虹鳟肝脏的非酶和酶抗氧化反应都与皮肤和肌肉的红度值显著相关^[39],同样在本研究中抗氧化能力高的实验鱼相对黄度值也显著提高,说明提高鱼体的抗氧化能力同时可以促进鱼体着色。在本文中,螺旋藻能够显著提高杂交黄颡鱼感染嗜水气单胞菌后的存活率,提高鱼体对病菌的抵抗能力。这些结果表明螺旋藻可以作为水产动物的免疫增强剂。在饲料中添加叶黄素和虾青素等比例混合物,能够增强大黄鱼的总抗氧化能力,SOD和CAT(过氧化氢酶)活性,降低MDA含量,说明饲料中添加螺旋藻能够增强鱼体抗氧化能力^[33]。此外,叶黄素能够提高金鱼(*Carassius auratus*)幼鱼养殖中的存活率^[40],这与本研究中的结果相似。

4 结论

在本研究中,饲料中添加0.2%叶黄素、2%螺旋藻及复合添加2%螺旋藻和0.1%的溶血磷脂对杂交黄颡鱼幼鱼的生长没有负面影响,并且可以增加饲料效率和蛋白沉积率;叶黄素、螺旋藻和溶血卵磷脂的添加对杂交黄颡鱼鱼体水分,蛋白和脂肪含量没有影响;饲料中添加2%螺旋藻及复合添加

2%螺旋藻和0.1%的溶血磷脂可以增加杂交黄颡鱼皮肤的黄度,红度和饱和度及杂交黄颡鱼皮肤中叶黄素含量,同时可以增强杂交黄颡鱼抗氧化能力,降低鱼体血浆中丙二醛含量。此外叶黄素、螺旋藻和溶血卵磷脂的添加均可以提高杂交黄颡鱼感染嗜水气单胞菌后的存活率,但螺旋藻添加组的效果更为显著。综上所述,杂交黄颡鱼“黄优一号”在前期投喂缺乏色素的饲料造成体色异常后,饲料中添加螺旋藻或配合添加溶血卵磷脂比叶黄素更有效地改善鱼体的体色,同时更能提高黄颡鱼的抗氧化能力和抗病力。

参考文献:

- [1] Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, *et al.* Commercial applications of microalgae [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2006, **101**(2): 87-96.
- [2] Kim S S, Rahimnejad S, Kim K W, *et al.* Partial replacement of fish meal with *Spirulina pacifica* in diets for parrot fish (*Oplegnathus fasciatus*) [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, **13**(2): 197-204.
- [3] Abdel-Tawwab M, Ahmad M H. Live spirulina (*Arthrospira platensis*) as a growth and immunity promoter for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), challenged with pathogenic *Aeromonas hydrophila* [J]. *Aquaculture Research*, 2009, **40**(9): 1037-1046.
- [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(396-399): 14-19.
- [5] James R, Sampath K, Thangarathinam R, *et al.* Effect of dietary spirulina level on growth, fertility, coloration and leucocyte count in red swordtail, *Xiphophorus helleri* [J]. *The Israeli Journal of Aquaculture*, 2006, **58**(2): 97-104.
- [6] Wang L B, Xue M, Wang J, *et al.* Effect of natural xanthophylls on performance and body pigmentation of yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, **36**(7): 1102-1110. [王鲁波, 薛敏, 王嘉, 等. 天然叶黄素对黄颡鱼生长性能和皮肤着色的影响 [J]. *水产学报*, 2012, **36**(7): 1102-1110.]
- [7] Li H X, Liu W B, Li X F, *et al.* Effects of dietary cholinechloride, betaine and lysophospholipids on the growth performance, fat metabolism and blood indices of crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, **34**(2): 127-134. [李红霞, 刘文斌, 李向飞, 等. 饲料中添加氯化胆碱、甜菜碱和溶血卵磷脂对异育银鲫生长、脂肪代谢和血液指标的影响 [J]. *水产学报*, 2010, **34**(2): 127-134.]
- [8] Zhang B K, Li H T, Zhao D Q, *et al.* Lysophosphatidylcholine increased apparent digestibility of poultry fat in broiler chicken diet [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, **22**(3): 662-669. [张炳坤, 李海涛, 赵冬

- 琴, 等. 溶血卵磷脂提高肉仔鸡对禽脂的表观消化率 [J]. *动物营养学报*, 2010, **22**(3): 662-669.]
- [9] Habib B, Parvin M, Huntington T C, *et al.* A Review on Culture, Production and Use of Spirulina as Food for Humans and Feeds for Domestic Animals and Fish [M]. Food & Agriculture Organization of the United Nations, 2008: 41.
- [10] CIE, International commission on illumination, recommendations on uniform colour spaces, colour difference equations, psychometric colour terms [Z]. Supplement No. 2 to CIE publication No 15, colorimetry, Austria, 1976.
- [11] Hunt R W. The specification of colour appearance. I. Concepts and terms [J]. *Color Research & Application*, 1977, **2**(2): 55-68.
- [12] AOAC. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists, 17th ed [Z]. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, USA, 2003: 920.39-2001.11.
- [13] Karadas F, Grammenidis E, Surai P F, *et al.* Effects of carotenoids from lucerne, marigold and tomato on egg yolk pigmentation and carotenoid composition [J]. *British Poultry Science*, 2006, **47**(5): 561-566.
- [14] Ferreira A L A, Yeum K J, Matsubara L S, *et al.* Doxorubicin as an antioxidant: maintenance of myocardial levels of lycopene under doxorubicin treatment [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2007, **43**(5): 740-751.
- [15] Roohani A M, Abedian Kenari A, Fallahi Kapoorchali M, *et al.* Effect of spirulina *Spirulina platensis* as a complementary ingredient to reduce dietary fish meal on the growth performance, whole-body composition, fatty acid and amino acid profiles, and pigmentation of Caspian brown trout (*Salmo trutta caspius*) juveniles [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, **25**(3): 633-645.
- [16] Velasquez S F, Chan M A, Abisado R G, *et al.* Dietary spirulina (*Arthrospira platensis*) replacement enhances performance of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2016, **28**(2): 1023-1030.
- [17] Wang Y Y, Liu J Y. The requirements of fatty acids, cholesterol and phospholipids for fishes and prawns [J]. *Journal of Fisheries of China*, 1991, **15**(2): 177-184. [王渊源, 刘佳英. 鱼虾需要的脂肪酸, 胆固醇和磷脂 [J]. 水产学报, 1991, **15**(2): 177-184.]
- [18] Wang J T, Song J Y, Li H T, *et al.* Effect of emulsifier on growth performance and blood biochemical index in common carp *Cyprinus carpio* var. Jian [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2009, **24**(3): 257-260. [王纪亭, 宋憬愚, 李海涛, 等. 乳化剂对建鲤生长及血液生化指标的影响 [J]. 大连水产学院学报, 2009, **24**(3): 257-260.]
- [19] Shi S Y, Li X Q, Leng X J, *et al.* Effect of different forms of xanthophylls on body color of hybrid catfish (*Silurus meridionalis* Chen×*Silurus asotus* Linnaeus) [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, **19**(2): 54-58. [史少奕, 李小勤, 冷向军, 等. 饲料中添加不同形式叶黄素对杂交鲢体色的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2010, **19**(2): 54-58.]
- [20] Ding X F, Ye Y T, Jiang R, *et al.* Effects of feed pigments on growth and physiological function of *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Cereal and Feed industry*, 2008(9): 39-41, 47. [丁小峰, 叶元土, 蒋蓉, 等. 饲料色素对黄颡鱼生长和生理机能的影响 [J]. 粮食与饲料工业, 2008(9): 39-41, 47.]
- [21] Zelaty H, Murthy S, Nazarkardeh M, *et al.* Influence of dietary supplementation of carotenoid (Diacetate of Lutein-Mesozeaxanthin) on growth performance, biochemical body composition in freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Journal of Aquaculture and Marine Biology*, 2016, **4**(2): 378-386.
- [22] Abdel-Latif H M R, Khalil R H. Evaluation of twophytobiotics, *Spirulina platensis* and *Origanum vulgare* extract on growth, serum antioxidant activities and resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to pathogenic *Vibrio alginolyticus* [J]. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*, 2014, **5**(1): 250-255.
- [23] Mahmoud M M A, El-Lamie M M M, Kilany O E, *et al.* Spirulina (*Arthrospira platensis*) supplementation improves growth performance, feed utilization, immune response, and relieves oxidative stress in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) challenged with *Pseudomonas fluorescens* [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2018(72): 291-300.
- [24] Li H T, Tian L X, Wang Y D, *et al.* Effects of lysolecithin on growth performance, body composition and hematological indices of hybrid tilapia (*Oreochromis aureus*♂×*Oreochromis niloticus*♀) [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2010, **25**(2): 143-146. [李海涛, 田丽霞, 王银东, 等. 溶血卵磷脂对奥尼罗非鱼生长性能, 鱼体成分及血液指标的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2010, **25**(2): 143-146.]
- [25] Liu C, Liu H, Xu W, *et al.* Effects of dietary *Arthrospira platensis* supplementation on the growth, pigmentation, and antioxidation in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Aquaculture*, 2019(510): 267-275.
- [26] Casazza A A, Ferrari P F, Aliakbarian B, *et al.* Effect of UV radiation or titanium dioxide on polyphenol and lipid contents of *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* [J]. *Algal research*, 2015(12): 308-315.
- [27] Saito M, Saito K, Kunisaki N, *et al.* Green tea polyphenols inhibit metalloproteinase activities in the skin, muscle, and blood of rainbow trout [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, **50**(24): 7169-7174.
- [28] Yang D P, Kong D X, Zhang H Y. Multiple pharmacological effects of olive oil phenols [J]. *Food Chemistry*, 2007, **104**(3): 1269-1271.

- [29] Cao S P, Han D, Xie S Q, *et al.* Effects of dietary fishmeal replacement with *Spirulina platensis* powder on the growth performance, feed utilization and protein deposition in juvenile gibel carp (*Carassis auratus gibelio* var. CAS III) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(4): 647-654. [曹申平, 韩冬, 解绶启, 等. 螺旋藻粉替代饲料中鱼粉对异育银鲫幼鱼生长, 饲料利用和蛋白沉积的影响 [J]. *水生生物学报*, 2016, **40**(4): 647-654.]
- [30] Jiang Z, Huang Q. Advances in research on the cause and influencing factors of fish body color [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2019, **46**(2): 110-113. [蒋焯, 黄权. 鱼类体色成因及影响因素研究进展 [J]. *水产科技情报*, 2019, **46**(2): 110-113.]
- [31] Teimouri M, Amirkolaie A K, Yeganeh S. The effects of dietary supplement of *Spirulina platensis* on blood carotenoid concentration and fillet color stability in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2013(414): 224-228.
- [32] Güroy B, Şahin İ, Mantoğlu S, *et al.* Spirulina as a natural carotenoid source on growth, pigmentation and reproductive performance of yellow tail cichlid *Pseudotropheus acei* [J]. *Aquaculture International*, 2012, **20**(5): 869-878.
- [33] Han X X, Wang Q R, Ye K, *et al.* Effect of xanthophylls and astaxanthin on the skin color and antioxidant capacity of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Journal of Fisheries Research*, 2018, **40**(2): 104-110. [韩星星, 王秋荣, 叶坤, 等. 叶黄素和虾青素对大黄鱼体色及抗氧化能力的影响 [J]. *渔业研究*, 2018, **40**(2): 104-110.]
- [34] Gogoi S, Mandal S C, Patel A B. Effect of dietary *Wolffia arrhiza* and *Spirulina platensis* on growth performance and pigmentation of Queen loach *Botia dario* (Hamilton, 1822) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(1): 285-291.
- [35] Alma A V, Juan C O, Pablo E V E. The effect of marigold (*Tagetes erecta*) as natural carotenoid source for the pigmentation of goldfish (*Carassius auratus* L.) [J]. *Research Journal of Fisheries and Hydrobiology*, 2013, **8**(2): 31-37.
- [36] Ishida B, Bartley G. Carotenoids: chemistry, sources, and physiology [J]. *Encyclopedia of Human Nutrition*, 2005(1): 330-338.
- [37] Abdelkhalek N K M, Ghazy E W, Abdel-Daim M M. Pharmacodynamic interaction of *Spirulina platensis* and deltamethrin in freshwater fish Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*: impact on lipid peroxidation and oxidative stress [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(4): 3023-3031.
- [38] Yu W, Wen G, Lin H, *et al.* Effects of dietary Spirulina platensis on growth performance, hematological and serum biochemical parameters, hepatic antioxidant status, immune responses and disease resistance of Coral trout *Plectropomus leopardus* (Lacepede, 1802) [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2018(74): 649-655.
- [39] Kalinowski C T, Larroquet L, Véron V, *et al.* Influence of dietary astaxanthin on the hepatic oxidative stress response caused by episodic hyperoxia in rainbow trout [J]. *Antioxidants*, 2019, **8**(12): 626.
- [40] Besen K P, Melim E W H, da Cunha L, *et al.* Lutein as a natural carotenoid source: Effect on growth, survival and skin pigmentation of goldfish juveniles (*Carassius auratus*) [J]. *Aquaculture Research*, 2019, **50**(8): 2200-2206.

THE EFFECTS OF *ARTHROSPIRA PLATENSIS* AND LUTEIN ON THE GROWTH, ANTIOXIDANT CAPACITY AND PIGMENTATION IN HYBRID YELLOW CATFISH (*PELTEOBAGRUS FULVIDRACO*♀ × *PELTEOBAGGRUS VACHELLI*♂)

LIU Cui^{1,2}, LIU Hao-Kun¹, ZHU Xiao-Ming^{1,3}, HAN Dong^{1,3}, JIN Jun-Yan¹, YANG Yun-Xia¹ and XIE Shou-Qi^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Engineering Research Center for Aquatic Animal Nutrition and Feed, Wuhan 430072, China)

Abstract: *Arthrospira platensis* is rich in protein, vitamins, minerals, essential amino acids, pigments carotenoids, essential fatty acids and antioxidant compounds. Carotenoids, including lutein, β -carotene, astaxanthin and so forth, which dissolve in fat and result in yellow, red, orange, and green pigmentation of the eggs, skin, and flesh of many fish species. Antioxidant compounds, such as phycocyanin, and tocopherols have significant effects on scavenging free radicals. Lutein is considered as an effective functional compound benefiting human health and widely used as a natural food colorant due to its antioxidant potential and the intense yellow color. However, high density in intensive aquaculture has led to outbreaks of bacterial infections that caused high mortality of yellow catfish, which impeded the further

rapid development of the yellow catfish culture industry. Nutritional and environmental factors can cause abnormal body color, which also has a negative effect on the quality and value of fish. To evaluate the effects of *Arthrospira platensis* and lutein on the growth, pigmentation, antioxidant capacity and disease resistance in hybrid yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*♀×*Pelteobagrus vachelli*♂), four isonitrogenous (400 g crude protein/kg diet) and isolipidic (85 g crude lipid/kg diet) diets containing 2% *A. platensis* (SP), 0.2% lutein (Lut), 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids (SPL) and without pigments (Control) were designed. A total of 720 fish [initial body weight of (4.79±0.01) g] were stocked into 12 tanks at a density of 60 fish per tank. Fish were fed a diet without pigments for 20 days, then fed four experimental diets for 35 days. A bacterial challenge test using *Aeromonas hydrophila* was subsequently conducted. The results indicated that there were no significant difference in final body weight (FBW), specific growth rate (SGR) and feeding rate (FR) among all groups ($P>0.05$). The feed efficiency (FE) of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were significantly higher than those of the 0.2% lutein and control groups ($P<0.05$), and supplementing 0.1% lysophospholipids significantly increased feed efficiency ($P<0.05$). The protein retention efficiency (PRE) of the control group was the lowest ($P<0.05$), and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids had the highest PRE ($P<0.05$). The chemical composition results showed that there were no difference on moisture, crude protein and crude lipid of the whole body of each group ($P>0.05$), while the ash content in 0.2% lutein and 2% *A. platensis* groups were lower than the control group ($P<0.05$). There was no difference on the skin lightness between different groups, while the skin yellowness of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were significantly higher than those in the 0.2% lutein and control groups ($P<0.05$). The skin redness of the 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids group was significantly higher than the control group ($P<0.05$), and the redness of dorsal skin in the 2% *A. platensis* group had similar results. The skin chroma of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were significantly higher than those in the 0.2% lutein and control groups ($P<0.05$). The lutein contents in abdominal skin of the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups were 18.65 and 18.10 µg/g, respectively, which significantly increased compared with the control group (13.16 µg/g) and the initial level (13.32 µg/g) ($P<0.05$). There was no significant difference in lutein content in dorsal skin among all groups ($P>0.05$). The experimental fish fed 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids had better body color. Dietary *A. platensis* and lutein significantly increased the activities of plasma SOD ($P<0.05$). The activities of plasma GPX and the contents of plasma GSH in the 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids group were higher than those in the 0.2% lutein and control groups ($P<0.05$). The MDA contents decreased significantly in the 2% *A. platensis* and 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids groups ($P<0.05$). 96h post challenge with *A. hydrophila*, the cumulative survival rates of yellow catfish of 2% *A. platensis*, 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids, 0.2% lutein and control groups were 20.83%, 16.67%, 5.55% and 0, respectively. The cumulative survival rates of yellow catfish of 2% *A. platensis*, 2% *A. platensis* with 0.1% lysophospholipids were significantly higher compared to those of 0.2% lutein and control groups ($P<0.05$). In conclusion, supplemental *A. platensis* can increase pigmentation and enhance total antioxidant capacity and disease resistance of hybrid yellow catfish. Lutein can also effectively enhance pigmentation, and lysophospholipids can significantly improve feed utilization. However, dietary *A. platensis* is more effective than lutein in improving the body color and enhancing antioxidant capacity and disease resistance of hybrid yellow catfish.

Key words: *Arthrospira platensis*; Lutein; Hybrid yellow catfish; Pigmentation; Antioxidation