

姜黄素对摄食高脂饲料的血鸚鵡生长、血液及肝脏部分免疫指标的影响

尚东维^{1,2}, 崔培¹, 孙金辉^{1*}

¹天津农学院水产学院, 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津

²天津农垦渤海农业集团有限公司, 天津

收稿日期: 2022年6月10日; 录用日期: 2022年6月20日; 发布日期: 2022年6月29日

摘要

以初始体重(85.53 g ± 3.50 g)的血鸚鵡为研究对象, 配制脂肪水平分别为8%、14%的基础饲料和高脂饲料, 并在高脂饲料中分别添加100、200、400 mg/kg的姜黄素作为饲料添加剂。试验共分为5个处理, 每个处理设3个平行, 每个平行饲喂50尾血鸚鵡, 试验周期为8周。结果显示: 添加姜黄素未对试验鱼生长造成影响。血鸚鵡摄食高脂饲料后, TG、CHOL、GLU含量以及AST活性均显著升高, 添加姜黄素后血鸚鵡的症状显著改善, 200 mg/kg组的血脂、Glu含量以及转氨酶活性均回到对照组水平。此外, 投喂高脂饲料的试验鱼的SOD和GSH-Px活性均显著低于对照组($P < 0.05$), 而添加200 mg/kg以上姜黄素的各组试验鱼SOD、GSH-Px活性显著高于高脂组, MDA含量显著低于高脂组($P < 0.05$), 各组的CAT活性均无显著影响($P > 0.05$)。结果表明, 摄食过量高脂饲料的血鸚鵡表现出氧化损伤状态, 而添加适200 mg/kg姜黄素提高血鸚鵡的抗氧化力、缓解肝脏损伤。

关键词

姜黄素, 血鸚鵡, 血液指标, 抗氧化性能

Effects of Curcumin on the Growth, Blood and Some Immune Parameters of Liver in Blood Parrots Feeding on High-Fat Diets

Dongwei Shang^{1,2}, Pei Cui¹, Jinhui Sun^{1*}

¹Tianjin Key Laboratory of Aqua-Ecology and Aquaculture, College of Fisheries Science, Tianjin Agricultural University, Tianjin

²Tianjin Nongken Bohai Sea Agriculture Group Co., Ltd., Tianjin

Received: Jun. 10th, 2022; accepted: Jun. 20th, 2022; published: Jun. 29th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 尚东维, 崔培, 孙金辉. 姜黄素对摄食高脂饲料的血鸚鵡生长、血液及肝脏部分免疫指标的影响[J]. 水产研究, 2022, 9(2): 65-71. DOI: 10.12677/ojfr.2022.92008

Abstract

Blood parrots with initial body weight ($85.53 \text{ g} \pm 3.50 \text{ g}$) were fed a basal diet or a high-fat diet with fat levels of 8% and 14%, respectively, and curcumin with mass fractions of 100, 200 and 400 mg/kg was added to the high-fat diet as a feed additive. The experiment was divided into 5 treatments, each with 3 parallels, and each parallel was fed to 50 blood parrots for 8 weeks. The results showed that: The addition of curcumin did not affect the growth performance of blood parrot. The symptoms of the blood parrots were significantly improved by the addition of curcumin, and the lipid, Glu and transaminase activities of the 200 mg/kg group returned to the level of the control group. In addition, the SOD and GSH-Px activities of the test fish fed high-fat diets were significantly lower than those of the control group ($P < 0.05$), while the SOD and GSH-Px activities of the test fish in each group supplemented with more than 200 mg/kg of curcumin were significantly higher than those of the high-fat group, and the MDA content was significantly lower than that of the high-fat group ($P < 0.05$), with no significant effect on CAT activity in any group ($P > 0.05$). The results showed that blood parrots consuming excessive high-fat diets exhibited oxidative damage, and the addition of 200 mg/kg curcumin improved the antioxidant power and alleviated liver damage in blood parrots.

Keywords

Curcumin, Blood Parrot, Blood Index, Antioxidant Properties

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

姜黄素(curcumin, Cur)是一种从姜科、天南星科植物中提取的多酚类化合物[1], 具有抗菌、抗炎、抗氧化、抗肿瘤、调节肠道菌群及清除自由基等多种生物学作用[2]-[7]。目前, 姜黄素作为一种替代抗生素的绿色添加剂已广泛应用在动物生产中。如: 姜黄素能够提高通过提高肉鸡[8] [9]、猪[10]的抗氧化性能、增强机体免疫功能和改善肠道健康, 进而提高其生长性能。对于反刍动物中而言, 有研究证实姜黄素不仅能够提高绵羊的生产性能和羊奶质量, 还可以促进睾丸的发育[11] [12]。对于水产动物而言, 已有研究证实, 适宜水平的姜黄素能够促进大黄鱼[13]、黄颡鱼[14]以及罗非鱼[15]的生长和饲料利用, 提高其非特异性免疫力。姜黄素还能提高鱼类的肠道消化酶活性, 改善肠道菌群组成, 降低肠道炎症因子表达量, 从而改善肠道健康[16] [17]。此外, 对建鲤[18]的研究发现, 姜黄素对其肝组织有保护作用, 能有效改善肝细胞 DNA 的损伤程度, 调节其抗氧化能力及相关细胞因子分泌。

血鸚鵡因其体色艳丽、体型圆润、易于饲养而广受欢迎。为保持其圆润丰满的体型, 常用高脂饲料投喂, 而长期摄食高脂饲料常会导致其肝脏组织中脂质过度沉积患上脂肪肝, 从而对其生长造成负面影响。因此, 如何缓解血鸚鵡的肝脏损伤已经成为研究热点。目前, 有关姜黄素作为饲料添加剂对血鸚鵡血液、肝脏生理生化指标的影响的研究尚未见报道。

故而, 本研究以血鸚鵡为试验对象, 用高脂饲料诱导血鸚鵡脂肪肝, 在饲料中添加姜黄素, 研究对其生长、部分血液和抗氧化指标的影响, 旨在姜黄素在血鸚鵡配合饲料中的应用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

2.1.1. 试验鱼

试验中所选用的 750 尾血鹦鹉由天津市嘉禾田源观赏鱼养殖有限公司提供, 初始体重 $85.53 \text{ g} \pm 3.50 \text{ g}$ 。

2.1.2. 试验饲料

试验用饲料以进口鱼粉、大豆浓缩蛋白等为主要蛋白源, 鱼油、豆油为脂肪源配置脂肪水平分别为 8%、14% 的饲料, 分别记为正常脂组(Normal-fat diet, NFD)和高脂组(High-fat diet, HFD), 在高脂组中分别添加 100、200 以及 400 mg/kg 的姜黄素作为试验组。各原料粉碎后过 60 目筛, 混匀后使用制粒机制成 $\Phi = 1.5 \text{ mm}$ 的颗粒料, 常温经 72 h 晾干后备用。饲料原料及常规营养组成见表 1。

Table 1. Feed raw materials and conventional nutritional composition

表 1. 饲料原料及常规营养组成

原料组成(%)	NFD	HFD	HFD + 100 Cur	HFD + 200 Cur	HFD + 400 Cur
进口鱼粉	50	50	50	50	50
大豆浓缩蛋白	12	12	12	12	12
小麦粉	12	12	12	12	12
次粉	10	10	10	10	10
鱼油	1	5	5	5	5
豆油	1	5	5	5	5
氯化胆碱	1	1	1	1	1
预混料	1	1	1	1	1
膨润土	9	1	1	1	1
磷酸二氢钙	1	1	1	1	1
羧甲基纤维素钠	2	2	2	2	2
姜黄素 mg/kg	0	0	100	200	400
营养成分组成(干物质)					
水分	9.22	9.95	10.55	9.58	10.24
粗蛋白(%)	43.24	43.05	42.53	43.39	42.92
粗脂肪(%)	8.26	14.91	14.69	14.13	14.78

2.1.3. 试验鱼饲养及日常管理

试验鱼于正式试验开始前进行 2 周暂养, 期间使用基础饲料(饲料脂肪水平为 8%, 不添加姜黄素)投喂。驯化结束后选取大小基本一致, 体格健壮的个体随机分为 5 组, 每组设置 3 个平行, 每个水槽中随机放 50 尾试验鱼(初始体重 $85.53 \text{ g} \pm 3.50 \text{ g}$)。每日分别于上午 9:00 与下午 17:00 进行饱食投喂。试验用水为曝气 48 h 的自来水, 水温 $26^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$, pH 值 8.0~8.2, 溶解氧 6.0~7.0 mg/L, 氨氮 1.2~1.3 mg/L, 养殖水槽使用电磁式空气泵 24 h 充氧。试验周期为 8 周。

2.1.4. 样品采集与测定

试验结束后, 从各槽中随机取 10 尾试验鱼, 取样前停喂 1 d, 使用丁香酚(1:10,000)麻醉后测定体重,

而后尾静脉采取血样, 血样样品离心 10 min (4°C , $4000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 取上清液, 于 -80°C 保存备用。取血后的试验鱼于冰盘上解剖取肝脏, 取出后用 4°C 去离子水冲净, 并按质量体积比 1:9 (W/V) 加入预冷生理盐水, 制成 10% 组织匀浆液, 离心 10 min (4°C , $3500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$), 取上清液, 于 -80°C 保存, 以备肝脏抗氧化指标的测定。

血清葡萄糖(Blood glucose, GLU)、甘油三酯(Triglyceride, TG)及总胆固醇(Total cholesterol, CHOL)含量、谷草转氨酶(Aspartate transaminase, AST)、谷丙转氨酶(Alanine aminotransferase, ALT)、肝脏超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase, GSH-Px)均采用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒测定, 具体测定方法参照说明书进行。

2.1.5. 试验指标的测定与计算

增重率(%), 存活率(%), 特定生长率(%/d)计算公式分别为

$$\text{增重率}(WG) = (W_t - W_0 / W_0) \times 100\% ,$$

$$\text{特定生长率}(SGR) = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\% ,$$

$$\text{存活率} = \text{存活尾数} / \text{总尾数} \times 100\% .$$

其中: W_0 为试验鱼初始平均质量(g); W_t 为试验鱼终末平均质量(g); t 为试验时间(d)。

2.1.6. 数据统计与分析

所有数据用平均值 \pm 标准误(Mean \pm SE)表示, 平均值和标准差由 EXCEL 软件计算得出。采用 SPSS 21.0 对试验数据进行单因素方差分析(ANOVA), 若差异显著($P < 0.05$), 则进行 Tukey 多重比较分析。

3. 结果与分析

3.1. 不同姜黄素添加量对血鹦鹉生长性能的影响

由表 2 可知, 各组试验鱼的存活率、增重率以及特定增长率均无显著影响($P < 0.05$)。

Table 2. Effects of different curcumin level on growth performance of blood parrot

表 2. 不同姜黄素添加量对喂食高脂饲料的血鹦鹉生长指标的影响

组别	NFD	HFD	HFD + 100 Cur	HFD + 200 Cur	HFD + 400 Cur
存活率/% SR	84.00 \pm 1.15	86.00 \pm 0	84.00 \pm 1.15	85.33 \pm 2.67	86.00 \pm 1.15
增重率/% WG	43.56 \pm 3.87	39.31 \pm 0.9	40.22 \pm 3.99	44.76 \pm 3.90	51.41 \pm 4.71
特定增长率/(%·d ⁻¹) SGR	0.64 \pm 0.05	0.59 \pm 0.01	0.60 \pm 0.05	0.66 \pm 0.05	0.74 \pm 0.05

注: 同列中标有不同字母者表示组间有显著性差异($P < 0.05$), 标有相同字母者表示组间无显著性差异($P > 0.05$), 下同。

3.2. 不同姜黄素添加量对血鹦鹉血液指标的影响

由表 3 可知, 投喂高脂饲料的试验鱼的 TG、CHOL、GLU 含量以及 AST 活性均显著升高($P < 0.05$), 添加姜黄素后试验鱼的症状显著改善, 200 mg/kg 组的血脂、Glu 含量以及转氨酶活性均回到对照组水平。

3.3. 不同姜黄素添加量对血鹦鹉肝脏生化指标的影响

由表 4 可知, 投喂高脂饲料的试验鱼的 SOD 和 GSH-Px 活性均显著低于对照组($P < 0.05$), 添加 200

mg/kg 以上姜黄素的各组试验鱼 SOD、GSH-Px 活性显著高于高脂组,MDA 含量显著低于高脂组($P < 0.05$),各组的 CAT 活性均无显著影响($P > 0.05$)。

Table 3. Effects of different curcumin level on blood characteristics of blood parrot

表 3. 不同姜黄素添加量对喂食高脂饲料的血鸚鵡部分血液指标的影响

组别	NFD	HFD	HFD + 100 Cur	HFD + 200 Cur	HFD + 400 Cur
CHOL/(mg·dL ⁻¹)	1.78 ± 0.19 ^b	6.53 ± 0.67 ^a	2.53 ± 0.11 ^b	0.99 ± 0.03 ^b	1.67 ± 0.12 ^b
TG/(mmol·L ⁻¹)	1.42 ± 0.2 ^b	3.90 ± 0.5 ^a	2.38 ± 0.58 ^{ab}	1.35 ± 0.26 ^b	1.35 ± 0.16 ^b
GLU/(mmol·L ⁻¹)	3.57 ± 0.5 ^b	10.20 ± 0.13 ^a	3.51 ± 0.16 ^b	3.32 ± 0.37 ^b	2.58 ± 0.28 ^b
ALT/(U·L ⁻¹)	16.72 ± 4.35 ^{ab}	32.72 ± 0.28 ^a	26.91 ± 0.58 ^a	26.33 ± 3.02 ^{ab}	10.31 ± 0.23 ^b
AST/(U·L ⁻¹)	44.49 ± 1.19 ^{bc}	77.15 ± 8.88 ^a	65.63 ± 1.98 ^{ab}	38.75 ± 6.6 ^{bc}	23.45 ± 2.42 ^c

Table 4. Effects of different curcumin level on hematological characteristics of blood parrot

表 4. 不同姜黄素添加量对喂食高脂饲料的血鸚鵡肝脏生化指标的影响

组别	NFD	HFD	HFD + 100 Cur	HFD + 200 Cur	HFD + 400 Cur
SOD/(U·mg ⁻¹ prot)	9.49 ± 0.97 ^a	2.26 ± 0.11 ^b	7.96 ± 0.09 ^{ab}	9.68 ± 1.28 ^a	10.05 ± 1.68 ^a
CAT/(U·mg ⁻¹ prot)	26.17 ± 0.51	29.91 ± 4.00	23.68 ± 1.84	22.83 ± 0.86	30.59 ± 4.07
MDA/(nmol·mg ⁻¹ prot)	2.76 ± 0.17 ^{ab}	3.07 ± 0.28 ^a	2.41 ± 0.05 ^{ab}	2.09 ± 0.12 ^b	1.98 ± 0.08 ^b
GSH-Px/(μmol·g ⁻¹ prot)	37.42 ± 3.67 ^a	16.75 ± 3.02 ^c	22.5 ± 1.16 ^{bc}	32.99 ± 4.18 ^{ab}	23.75 ± 2.41 ^{abc}

4. 讨论

已有研究发现姜黄素对鱼类体重的调节呈现出一定的剂量依赖效应,但不同种类的最适添加量差异较大,如对草鱼[19]的研究发现,饲料中添加 400、600 mg/kg 的姜黄素能促进其生长,降低饲料系数;对黄颡鱼[20]而言,添加 200 mg/kg 姜黄素能获得最佳生长性能;而张宝彤[15]等的研究发现,添加 30 mg/kg 姜黄素即可显著提高罗非鱼平均增重率和特定生长率,显著降低饵料系数。但有关姜黄素对鱼类生长性能的报道结果不尽相同,杨雨生[14]等对黄颡鱼的研究结果发现,添加姜黄素对其生长性能无显著影响,本研究结果与之相类似,造成这些差异的原因与试验对象种类、规格、养殖条件、试验时间以及姜黄素的纯度、投饲频率等多种因素有关。

TG 和 CHOL 的含量是反映机体脂类代谢能力的重要生化指标,血清中 AST 和 ALT 含量的增减可以反映肝脏是否发生损伤与病变。闫亚楠[21]等的研究发现,摄食高脂饲料的团头鲂,其血浆中 GLU、TG 含量、转氨酶活性以及肝脏 TG 含量均显著升高,表现出肝脏脂肪变性和氧化损伤,而添加白藜芦醇能有效缓解高脂诱导的团头鲂肝脏功能紊乱的状态。本试验与上述试验结果相类似,投喂高脂饲料后,血鸚鵡出现明显的高脂血症症状,同时,血清中的 AST 和 ALT 活性亦显著升高,推测血鸚鵡肝脏已经受损,而添加姜黄素后,这种状况得到改善,添加量为 200 mg/kg 时血脂、血糖以及转氨酶活性均回到对照组水平,这些结果证实姜黄素对于改善血鸚鵡的糖脂代谢、缓解肝脏损伤均有良好效果。

SOD 和 CAT 是体内活性氧自由基的清除剂,GSH-Px 是机体内广泛存在的过氧化物分解酶,MDA 是脂质过氧化的最终产物,能间接反应膜系统受损程度和细胞损伤程度[22]。研究发现,长期摄食高脂饲料会破坏机体新陈代谢过程中活性氧自由基的产生和消除这一动态平衡,其结果导致大量活性氧自由基(ROS)扩散到细胞的各个角落,改变一些生物膜的通透性,氧化一些脂类、蛋白质、酶和 DNA 引起机体,

造成机体组织器官氧化损伤[23]。本试验中, 高脂组血鸚鵡的 SOD 和 GSH-Px 活性均显著降低, 也在一定程度上印证了上述结果, 说明长期摄食高脂饲料可能对血鸚鵡的肝组织造成了氧化损伤。而添加 200 mg/kg 以上姜黄素后, 试验鱼的 SOD、GSH-Px 活性显著高于高脂组, MDA 含量显著低于高脂组, 说明姜黄素的加入从一定程度上减缓了这种损伤。在大黄鱼[13]、黄颡鱼(杨雨生)以及大菱鲂[24]的研究中, 都发现添加适宜水平的姜黄素能有效提高鱼体内部分组织的 SOD、CAT、GSH-PX 活性, 降低部分组织中 MDA 含量, 对提高鱼体抗氧化力, 抵抗氧化应激具有良好效果。在曹丽萍等研究中[18], 0.5% 和 1.0% 的姜黄素可以有效地恢复肝损伤的建鲤的肝脏组织; 上述姜黄素在鱼类上的研究结果都与本试验结果相互印证。

5. 结论

- 1) 本试验条件下, 饲料中添加姜黄素对血鸚鵡生长和存活均无显著影响。
- 2) 血鸚鵡长期摄食高脂饲料, 其血糖、血脂及转氨酶活性均显著升高, SOD、GSH-Px 活性显著降低, 表现出肝功能紊乱和氧化损伤, 添加姜黄素后血鸚鵡的症状显著改善, 200 mg/kg 组试验鱼的血脂、Glu 含量、转氨酶活性以及肝脏 SOD、GSH-Px 活性、MDA 含量均回到对照组水平, 因此, 在本试验条件下, 姜黄素的最适添加量为 200 mg/kg。

基金项目

天津市科技计划项目(18ZXBFNC00210); 天津市教委项目(2019KJ033)。

参考文献

- [1] 王敏, 王洪彪, 马晓蕊, 等. 姜黄素的提取、生理功能及其在肉鸡生产中的应用研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2022.
- [2] 孙俊, 徐伟, 陆荣柱, 等. 姜黄素对人肝癌 SMMC-7721 细胞裸鼠移植瘤的抑制作用及其机制[J]. 江苏大学学报(医学版), 2022(3): 219-225, 230.
- [3] 付江文, 张海波, 欧阳红兵, 等. 姜黄素的抗氧化功能及其在畜禽养殖中的应用研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2022.
- [4] Hanafy, N.A.N. (2021) Optimally Designed Theranostic System Based Folic Acids and Chitosan as a Promising Mucosal Delivery System for Encapsulating Curcumin LbL Nano-Template against Invasiveness of Breast Cancer. *International Journal of Biological Macromolecules*, **182**, 1981-1993. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.149>
- [5] Jun, W.S., Kyung-Soo, C., Do-Hee, K., et al. (2020) Curcumin Induces Stabilization of Nrf2 Protein through Keap1 Cysteine Modification. *Biochemical Pharmacology*, **173**, 113820-113859. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2020.113820>
- [6] 孙菁茹, 冯玉超. 姜黄素生物学功能的研究进展[J]. 农产品加工, 2020(16): 67-71, 74.
- [7] 阮栋, 王一冰, 蒋守群, 等. 姜黄素的生物活性及其调节动物肠道黏膜屏障功能的分子机制[J]. 动物营养学报, 2021, 33(4): 1801-1810.
- [8] 王鹏. 低聚木糖和姜黄素对肉仔鸡生产性能及免疫机能影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [9] Raheem, M.A., Hu, J.G., Yin, D.D., et al. (2021) Response of Lymphatic Tissues to Natural Feed Additives, Curcumin (*Curcuma longa*) and Black Cumin Seeds (*Nigella sativa*), in Broilers against *Pasteurella multocida*. *Poultry Science*, **100**, Article ID: 101005. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.01.028>
- [10] 王斐, 何进田, 沈明明, 等. 日粮添加姜黄素对宫内发育迟缓断奶仔猪生长性能和肠道组织形态的影响[J]. 畜牧与兽医, 2019, 51(6): 23-30.
- [11] Jagueszski, A.M., Perin, G., Bottari, N.B., et al. (2018) Addition of Curcumin to the Diet of Dairy Sheep Improves Health, Performance and Milk Quality. *Animal Feed Science and Technology*, **246**, 144-157. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.010>
- [12] Jiang, Z., Wan, Y., Li, P., et al. (2019) Effect of Curcumin Supplement in Summer Diet on Blood Metabolites, Antioxidant Status, Immune Response, and Testicular Gene Expression in Hu Sheep. *Animals (Basel)*, **9**, 720.

<https://doi.org/10.3390/ani9100720>

- [13] 俞军, 陈庆堂, 李昌辉, 等. 姜黄素对大黄鱼组织中磷酸酶活力及血清中细胞因子含量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(3):524-532
- [14] 杨雨生, 王洋, 曾祥茜, 等. 四种添加剂对黄颡鱼生长、消化与抗氧化能力的影响[J]. 饲料工业, 2018, 39(18): 17-24.
- [15] 张宝彤, 张波, 萧培珍, 等. 姜黄素对罗非鱼生长性能、血清生化指标及肠道组织形态的影响[J]. 中国饲料, 2014(2): 34-37.
- [16] Jiang, J., Wu, X.Y., Zhou, X.Q., *et al.* (2016) Effects of Dietary Curcumin Supplementation on Growth Performance, Intestinal Digestive Enzyme Activities and Antioxidant Capacity of Crucian Carp *Carassius auratus*. *Aquaculture*, **463**, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.05.040>
- [17] 解文丽. 四种功能性饲料添加剂对花鳊生长性能、脂肪代谢、非特异性免疫和肝肠健康的影响[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [18] 曹丽萍. 建鲤急性肝损伤模型的构建及几种中草药饲料添加剂对肝脏的保护作用[D]: [博士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [19] 明建华, 叶金云, 张易祥, 等. 姜黄素对草鱼生长性能、抗氧化应激能力及核因子 E2 相关因子 2/抗氧化反应元件信号通路相关基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(2): 809-823.
- [20] 张滕闲, 陈钱, 张宝龙, 等. 姜黄素对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)生长、消化与抗氧化能力的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(6): 56-63.
- [21] 闫亚楠, 夏斯蕾, 田红艳, 等. 白藜芦醇对高脂胁迫团头鲂抗氧化能力、非特异免疫机能和抗病力的影响[J]. 水生生物学报, 2017(1): 155-164.
- [22] 刘洋. 不同运动训练强度对小鼠血清 MDA 含量和 SOD 活性的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016(12): 231-233.
- [23] Tort, L. (2011) Stress and Immune Modulation in Fish. *Developmental & Comparative Immunology*, **35**, 1366-1375. <https://doi.org/10.1016/j.dci.2011.07.002>
- [24] 王雅慧, 裕玉, 麦康森, 等. 饲料中添加姜黄素对大菱鲂幼鱼生长、体组成及抗氧化酶活力的影响[J]. 水产学报, 2016, 40(9): 1299-1308.