



## 饲料中添加胆汁酸对黄鳝生长性能、血清生化 and 肝肠健康的影响

雷 薇, 李加敏, 方 鹏, 徐嘉玲, 罗天伦, 徐路遥, 彭 墨\*

(江西农业大学动物科学技术学院, 江西 南昌 330045)

**摘要:** 为探讨饲料中添加胆汁酸对黄鳝生长性能、血清生化指标、肝肠健康的影响。选择 1 200 尾大小均一的健康黄鳝 [初始均重 (23.00±0.03) g], 随机分为 5 组, 每组 4 个重复, 每个重复 60 尾, 配制胆汁酸添加量分别为 0、125、250、375 和 500 mg/kg 的等氮等脂饲料进行饲喂, 并分别命名为 CON、BA125、BA250、BA375 和 BA500 组。56 d 的饲养实验结果显示, 随着饲料中胆汁酸添加量的增加, 黄鳝终末均重、增重率和特定生长率均呈先升后降的趋势, 且 BA250 组显著高于 CON 和 BA500 组; 饲料转化率变化呈先降后升趋势。全鱼粗蛋白含量先升后降, 而肝脏粗脂肪含量呈先降后升趋势。CON 组血清谷丙转氨酶活性显著高于其他组, 而谷草转氨酶活性呈先降后升趋势。血清 D 乳酸含量呈降低趋势。血清二胺氧化酶呈先降后升趋势, 在 BA250 组中含量最低。与 CON 组相比, BA125 和 BA250 组肝脏结构较为完整, 肝小叶结构明显, 细胞核数量增多。过量胆汁酸 (BA375、BA500 组) 会导致肝细胞出现空泡化和破裂。肝脏中脂滴含量呈先降后升的趋势。肝脏 *acc* 和 *dgat2* 的 mRNA 表达水平呈降低趋势, *cpt1* 的 mRNA 表达水平呈先升后降的趋势, *ppara* 的 mRNA 表达水平在 BA375 时最高。肠道的绒毛宽度和固有层宽度呈先升后降的趋势, 但 BA500 组绒毛高度和绒毛宽度均显著低于 CON 组。黄鳝肝脏的总超氧化物歧化酶活性呈上升趋势, BA250 组谷胱甘肽过氧化物酶活性最高, 过氧化氢酶活性在 BA250 组最高, 丙二醛含量在 BA250 组最低。肠道总超氧化物歧化酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性均呈先升后降的趋势, 丙二醛的含量先降后升, 在 BA250 组显著低于 CON 和 BA375 组。肠道紧密连接蛋白基因 *zo1*、*zo2* 和 *occludin* 的 mRNA 表达水平均呈先升后降的趋势。本研究表明, 饲料中添加适量的胆汁酸可提高黄鳝的生长性能, 增强肝脏和肠道的抗氧化能力, 且可通过上调脂肪分解代谢和抑制脂肪合成代谢降低肝脂沉积, 缓解肝脏损伤, 改善肝肠功能。本实验胆汁酸适宜添加量为 250.0~283.3 mg/kg。本研究可为黄鳝的健康养殖积累基础数据和提供参考。

**关键词:** 黄鳝; 胆汁酸; 生长性能; 抗氧化能力; 肝脏健康; 肠道屏障

中图分类号: S 963.7

文献标志码: A

水产集约化养殖规模的不断扩大和渔业资源的匮乏导致鱼粉供不应求, 为降低饲料成本和缓

解水产饲料生产的压力, 人们将目光聚焦于来源广泛且蛋白质含量高的植物原料。植物原料中的

收稿日期: 2024-03-11 修回日期: 2024-03-16

资助项目: 国家自然科学基金 (32072992); 江西省“双千计划”首批培养类项目 (jxsq2019201081)

第一作者: 雷薇 (照片), 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: leiwei981@163.com

通信作者: 彭墨, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: pengmowell@jxau.edu.cn

抗营养因子和胆固醇缺失往往降低其在水产养殖中的有效利用。因此, 寻找合适的饲料添加剂以促进水产养殖动物的生长、代谢和抗氧化能力, 成为水产动物集约化养殖的必然选择<sup>[1-2]</sup>。

胆汁酸 (bile acids, BAs) 是由肝脏胆固醇分解代谢产生的最终产物, 可以将脂质乳化成小的乳糜颗粒, 扩大脂质与消化酶的接触面积, 进而起到加速脂肪分解, 缓解肝脏脂肪异常沉积的作用<sup>[3]</sup>。研究表明, 胆汁酸可以提高仔猪<sup>[4]</sup>和仔鸡<sup>[5]</sup>的生长性能和免疫力, 调节小鼠<sup>[6]</sup>的肝脏脂肪代谢, 显著提升鳊 (*Siniperca chuatsi*)<sup>[7]</sup>、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[8]</sup>和乌鳢 (*Channa argus*)<sup>[9]</sup>的生长性能。添加适量胆汁酸可以降低大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)<sup>[10]</sup>、红鳍东方鲀 (*Takifugu rubripes*)<sup>[11]</sup>、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)<sup>[12]</sup>和珍珠龙胆石斑鱼 [*Epinephelus fuscoguttatus* (♀) × *E. lanceolatus* (♂)]<sup>[13]</sup>由高脂饲料诱导的肝脂异常沉积。同时, 胆汁酸适量添加可显著提高鳊<sup>[7]</sup>和宽体舌鳈 (*Cynoglossus robustus*)<sup>[14]</sup>鱼体的抗氧化能力, 增加大口黑鲈<sup>[10]</sup>的肠黏膜厚度, 改变草鱼和珍珠龙胆石斑鱼的胆汁酸图谱<sup>[12-13]</sup>。因此, 饲料中添加胆汁酸对养殖鱼类的生长、代谢和抗氧化等具有积极的调控作用。

黄鳊 (*Monopterus albus*) 是一种典型的肉食性淡水养殖鱼类之一, 其肉质细腻, 且具有丰富的营养价值。黄鳊贪食, 生长中极易出现花白肝等脂肪异常沉积、肝肠功能障碍等现象<sup>[15]</sup>, 是黄鳊养殖产业亟待解决的重要问题。

鱼粉作为黄鳊饲料的主要蛋白原料, 是导致其养殖成本高的主要原因。用植物性蛋白源替代鱼粉, 会造成饲料中胆固醇 (胆汁酸合成的前体物质) 的含量减少。因此, 本实验旨在通过向黄鳊饲料中添加胆汁酸, 探究其对黄鳊生长性能、体组成、血清生化和肝肠健康的影响, 同时确定黄鳊饲料中胆汁酸的适宜添加量, 为黄鳊的健康养殖积累基础数据和提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验设计

采用单因素试验设计, 以鱼粉为主要蛋白质源,  $\alpha$  淀粉作为主要糖源, 鱼油、豆油按 1:1 (重量比) 混合作为饲料的主要脂肪源, 设计粗蛋白水平约为 42%、粗脂肪水平约为 7.9% 的 5 组不同胆

汁酸添加量的等氮等脂饲料。5 组饲料的胆汁酸添加量分别 0、125、250、375 和 500 mg/kg, 并分别命名为 CON、BA125、BA250、BA375 和 BA500 组。基础饲料配方组成及营养成分见表 1。实验中所用的其他原料均购自深圳市澳华集团股份有限公司。所有饲料原料均粉碎并通过 60 目筛, 然后均匀加入混合后的鱼油和大豆油 (1:1, 重量比) 并充分混合, 最终成品于自封袋中密封, 保存于 -20 °C 冰箱备用。

### 1.2 养殖管理

本实验所选的黄鳊购自江西余干黄鳊养殖场。筛选 1 200 尾初始平均体重为 (23.00±0.03) g 的健康黄鳊, 首先采用网箱进行养殖, 禁食 24 h 后将其分为 5 组, 每组 4 个网箱 (规格为 2.0 m×1.0 m×2.0 m), 每个网箱 60 尾。养殖期间, 每天 17:00—18:00 饱食投喂, 养殖周期为 56 d。整个实验期间观察并记录黄鳊的摄食量和水质情况。养殖水温 20.9~29.5 °C, 溶解氧含量 ≥5 mg/L, pH 为 6.5~7.4, 氨氮含量 ≤2.0 mg/L, 亚硝酸盐浓度 ≤0.10 mg/L。

### 1.3 样本采集

实验结束后, 禁食 24 h。称重和计数后记录每个网箱中的黄鳊数量和总重, 采用 MS-222 麻醉后, 每个网箱取 3 尾鱼, 分别称量体重、体长, 进行静脉采血, 之后解剖获取肝脏和内脏团进行称重, 取其肝脏、肠道存于 2 mL 冻存管中, 液氮速冻后转移至 -80 °C 超低温冰箱中保存。取肝脏和肠道组织存于 4% 多聚甲醛溶液。本研究获得了江西农业大学实验动物管理和使用伦理委员会批准, 实验过程中操作人员严格遵守江西农业大学伦理规范, 并按照江西农业大学伦理委员会制定的规章制度执行。

### 1.4 测定指标及方法

生长性能 生长性能相关计算公式:

存活率 (survival rate, SR, %) =  $N_t/N_0 \times 100\%$

增重率 (weight gain rate, WGR, %) =  $(W_t - W_0) / W_0 \times 100\%$

特定生长率 (specific growth rate, SGR, %/d) =  $(\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$

饲料转化率 (feed conversion rate, FCR) =  $[FC / (W_t - W_0)] \times 100\%$

肥满度 (condition factor, CF, g/cm<sup>3</sup>) =  $(W_t -$

表 1 实验饲料的组成及营养成分

项目 items	组别 groups <sup>4)</sup>					%
	CON	BA125	BA250	BA375	BA500	
<b>原料 ingredients</b>						
蒸汽鱼粉 peruvian steam fish meal <sup>1)</sup>	30	30	30	30	30	
谷朊粉 wheat gluten <sup>1)</sup>	7	7	7	7	7	
豆粕 soybean meal <sup>1)</sup>	8	8	8	8	8	
麦麸 wheat bran <sup>1)</sup>	9.610 0	9.597 5	9.585 0	9.572 5	9.560 0	
鸡肉粉 chicken Meal <sup>1)</sup>	8	8	8	8	8	
乌贼膏 squid paste <sup>1)</sup>	1	1	1	1	1	
$\alpha$ 淀粉 $\alpha$ starch <sup>1)</sup>	15	15	15	15	15	
棉籽粕 cottonseed meal <sup>1)</sup>	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
菜粕 rapeseed meal <sup>1)</sup>	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	
鱼油 fish oil	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
豆油 soybean oil	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
磷酸二氢钙 Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
氯化胆碱 choline chloride	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
多维 multidimensional <sup>2)</sup>	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	
多矿 multimineral <sup>2)</sup>	1	1	1	1	1	
丙酸钙 calcium propanoate	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
乙氧基喹啉 ethoxyquin	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
胆汁酸 bile acids <sup>3)</sup>	0.000 0	0.012 5	0.025 0	0.037 5	0.050 0	
合计 total	100	100	100	100	100	
<b>营养组成 nutrient composition</b>						
水分 moisture	9.0	8.9	9.0	8.7	8.8	
粗灰分 crude ash	10.0	9.9	10.0	10.1	10.0	
粗蛋白 crude protein	42.6	42.2	42.6	42.5	42.5	
粗脂肪 crude lipid	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	

注: 1)干物质组成(g/kg)为蒸汽鱼粉, 粗蛋白 683.5, 粗脂肪 74; 谷朊粉, 粗蛋白 830.6, 粗脂肪 9.6; 豆粕, 粗蛋白 442.0, 粗脂肪 19.0; 麦麸, 粗蛋白 157.0, 粗脂肪 39.0; 鸡肉粉, 粗蛋白 650.0, 粗脂肪 100.0; 乌贼膏, 粗蛋白301.0, 粗脂肪 207.2;  $\alpha$ 淀粉, 粗蛋白 7.4, 粗脂肪 1.9; 棉籽粕, 粗蛋白 470.0, 粗脂肪 5.0; 菜粕, 粗蛋白 386.0, 粗脂肪 14.0。2)多维多矿由青岛玛斯特生物技术有限公司(山东青岛)提供。维生素和矿物质组成参考文献<sup>[16]</sup>。3)胆汁酸由山东龙昌动物保健品股份有限公司提供(山东济南), 其中猪去氧胆酸+猪胆酸 $\geq 77\%$ 、鹅去氧胆酸 $\geq 17\%$ (纯度 $>95\%$ )。4)处理组分别为对照组, CON; 125 mg/kg胆汁酸处理组, BA125; 250 mg/kg胆汁酸处理组, BA250; 375 mg/kg胆汁酸处理组, BA375; 500 mg/kg胆汁酸处理组, BA500, 下同。

Notes: 1) composition of dry matter (g/kg) were as follows. Peruvian steam fish meal: crude protein 683.5, crude lipid 74.0; wheat gluten: crude protein 830.6, crude lipid 9.6; soybean meal: crude protein 442.0, crude lipid 19.0; wheat bran: crude protein 157.0, crude lipid 39.0; chicken meal: crude protein 650.0, crude lipid 100.0; squid paste: crude protein 301.0, crude lipid 207.2;  $\alpha$  starch: crude protein 7.4, crude lipid 1.9; cottonseed meal: crude protein 470.0, crude lipid 5.0; rapeseed meal: crude protein 386.0, crude lipid 14.0; 2) multidimensional and multimineral provided by Qingdao Master Biotechnology Co., Ltd. (Qingdao, China), and detailed information on its vitamin and mineral premix composition can be found in literature<sup>[16]</sup>; 3) bile acids were bought from Shandong Longchang Animal Health Product Co., Ltd. (Jinan, China), with hyodeoxycholic acid + porcine cholic acid  $\geq 77\%$ , chenodeoxycholic acid  $\geq 17\%$  (purity  $> 95\%$ ); 4) treatment groups: CON, control group; 125 mg/kg bile acid treatment group, BA125; 250 mg/kg bile acid treatment group, BA250; 375 mg/kg bile acid treatment group, BA375; 500 mg/kg bile acid treatment group, BA500; the same below.

$$W_0)/L^3 \times 100$$

$$\text{肝体比 (hepatosomatic index, HSI, \%)} = (W_l / W_t) \times 100\%$$

$$\text{脏体比 (viscerosomatic index, VSI, \%)} = (W_v / W_t) \times 100\%$$

式中,  $W_t$  和  $W_0$  分别为终末均重 (g, final body weight, FBW) 和初始均重 (g, initial body weight, IBW),  $N_t$  和  $N_0$  分别为养殖后的终末尾数和初始尾数,  $L$  为鱼体长 (cm, body length),  $W_l$  为肝脏重 (g, liver

weight),  $W_v$  为内脏重 (g, visceral weight), FC 为饲料消耗总量 (g, total amount of the feed consumed)。

饲料和全鱼营养成分测定 按照 AOAC 的标准方法测定实验饲料和全鱼的营养成分<sup>[16]</sup>: 将样品在 105 °C 烘箱中烘干至恒重得到水分含量; 用凯氏定氮法测定样品的粗蛋白含量; 用索式抽提法测定样品中粗脂肪的含量; 将样品在 550 °C 的马弗炉中灼烧 6 h 至恒重得到灰分含量。

血清生理生化指标测定 总胆汁酸 (total bile acids, TBA)、血尿氮 (blood urea nitrogen, BUN)、总胆固醇 (Total cholesterol, CHOL)、高密度脂蛋白胆固醇 (high density lipoprotein cholesterol, HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇 (low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、谷丙转氨酶 (glutamic-pyruvic transaminase, ALT) 和谷草转氨酶 (glutamic oxaloacetic transaminase, AST) 的测定使用贝克曼 AU480 生化分析仪以及配套的试剂盒。D 乳酸 (lactate dehydrogenase, D-LA) 的测定使用上海优选品牌酶联免疫分析 (ELISA) 试剂盒。二胺氧化酶 (diamine oxidase, DAO) 的测定使用上海抚生实业有限公司酶联免疫分析 (ELISA) 试剂盒。

肠道消化酶和组织生化指标测定 肠道消化相关的胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶活性, 与肠道抗氧化能力相关的谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px)、丙二醛 (malondialdehyde, MDA)、总超氧化物歧化酶 (total superoxide dismutase, T-SOD) 和过氧化氢酶 (catalase,

CAT), 均通过南京建成生物工程研究所试剂盒进行测定, 方法参考说明书。

基因表达量测定 (RT-PCR 法) 肠道总 RNA 使用 Trizol 试剂 (TaKaRa, 日本) 提取, 使用 NanoDrop2000 超微量分光光度计 (Thermo Fisher, 美国) 测定总 RNA 浓度。随后使用 Prime-Script™ 反转录试剂盒 (TaKaRa, 日本) 合成 cDNA, 并用 DEPC (diethyl pyrocarbonate) 水进行稀释后置于 -20 °C 保存备用。定量反转录-聚合酶链式反应使用实时定量 PCR 仪 (Bio-rad - CFX96) 进行实验, 反应体积为 10 μL, 其中引物 0.4 μL, cDNA 0.5 μL、SYBR Green qPCR Mix (High ROX) (艾德莱生物科技有限公司, 北京) 5.0 μL、无菌非酶水 4.1 μL。定量聚合酶链式反应程序设置为 95 °C 预变性 2 min, 95 °C 变性 15 s, 55~60 °C 退火 72 min, 72 °C 延伸 10 s, 40 个循环之后形成熔解曲线。采用 2<sup>-ΔΔCt</sup> 方法计算基因表达<sup>[16]</sup>。分析扩增效率后选择 18S rRNA 作为本研究内参基因。引物序列如表 2 所示。

表 2 黄鳝实时定量 PCR 引物

Tab. 2 Quantitative primer of *M. albus*

目的基因 target gene	上游引物(5'-3') forward primers (5'-3')	下游引物(5'-3') reverse primers (5'-3')	登录号 accession number
<i>acc</i>	TCTGACAGCGACCCCTTCT	GCCCCACACATTCTTATGTC	XM_020598745.1
<i>dgat2</i>	ACTTCCGCTTCCCTTG	ATTCCTGTCTCGTTATGTG	XM_020622054.1
<i>cpt1</i>	AGGTTCTTTGTGTTCCGGCT	TCCTCTCCATCTGCTGCTCT	XM_020587904.1
<i>ppara</i>	GATGATGCCCTGGGATTGA	AGCCTTGTCTGAGCACACCTG	XM_020601270.1
<i>zo-1</i>	GGCATCATCCCAACAAA	GCGAAGACCACGGAACCT	XM_020606626.1
<i>zo-2</i>	AGCCGAGGTCGCACTTTA	GCTTTGCTTCTGTGGTTGAT	XM_020621520.1
<i>occludin</i>	GCAGCCATCGACTTCATAGG	TCACCCCAACAACGTAGACA	XM_020602872.1
18S	ATTTCGACACGGAGAGG	CATGGGTTTAGGATACGCTC	XM_020605951.1

### 1.5 数据分析

数据用“平均值±标准差 (mean±SD, n=4)”表示, 采用 SPSS 12.0 统计软件进行单因素方差分析, 若组间差异显著 (P<0.05), 则作 Duncan 氏多重比较分析。所有原始数据用 Microsoft Excel 2017 软件处理, 然后分别用 Microsoft Word 2017 和 Graph-Pad Prism 5 软件绘制成图表。

## 2 结果

### 2.1 饲料中添加胆汁酸对黄鳝生长性能的影响

由表 3 可知, 随着饲料胆汁酸添加量的增加, 黄鳝 FBW、WGR 和 SGR 呈先升后降趋势, BA250

和 BA375 组 FBW、WGR 和 SGR 显著高于 CON 和 BA500 组 (P<0.05)。FCR 随胆汁酸添加量的增加呈先降后升趋势, BA250 组的 FCR 显著低于 CON 组和 BA500 组 (P<0.05), 但与 BA125 和 BA375 组之间无显著差异 (P>0.05)。胆汁酸的添加对黄鳝的 HSI 和 VSI 无显著影响 (P>0.05), 但 BA250 组 CF 显著高于 CON、BA375 和 BA500 组 (P<0.05)。

### 2.2 黄鳝饲料适宜胆汁酸添加量

以特定生长率为评价指标, 经一元二次回归分析:  $y = -3.0 \times 10^{-6}x^2 + 1.7 \times 10^{-3}x + 1362.3 \times 10^{-3}$  ( $R^2 = 0.9307$ ), 得知胆汁酸最适添加量为 283.3 mg/kg; 以饲料转化率为评价指标, 经一元二次回归分析:

表 3 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝生长性能的影响

Tab. 3 Effects of dietary bile acids on the growth performance of *M. albus*

指标 indexes	组别 groups				
	CON	BA125	BA250	BA375	BA500
初始均重/g IBW	23.00±0.03	22.95±0.03	23.05±0.02	23.00±0.04	23.00±0.02
终末均重/g FBW	49.98±0.92 <sup>ab</sup>	52.60±0.69 <sup>bc</sup>	55.57±0.83 <sup>c</sup>	54.46±0.87 <sup>c</sup>	49.29±1.79 <sup>a</sup>
增重率/% WGR	116.92±3.81 <sup>ab</sup>	128.86±3.24 <sup>bc</sup>	140.88±3.82 <sup>c</sup>	136.47±4.06 <sup>c</sup>	114.36±7.83 <sup>a</sup>
存活率/% SR	89.44±3.09	97.08±1.72	94.17±2.93	91.67±3.19	94.58±0.42
特定增长率/(%/d) SGR	1.38±0.03 <sup>ab</sup>	1.48±0.03 <sup>bc</sup>	1.57±0.03 <sup>c</sup>	1.54±0.03 <sup>c</sup>	1.33±0.05 <sup>a</sup>
饲料转化率 FCR	1.95±0.06 <sup>bc</sup>	1.66±0.13 <sup>ab</sup>	1.56±0.10 <sup>a</sup>	1.63±0.06 <sup>ab</sup>	2.04±0.11 <sup>c</sup>
肝体比/% HSI	5.85±0.23	5.44±0.11	5.22±0.15	5.17±0.33	5.33±0.26
脏体比/% VSI	9.79±0.44	9.66±0.21	9.51±0.22	9.23±0.40	8.90±0.14
肥满度/(g/cm <sup>3</sup> ) CF	0.24±0.00 <sup>a</sup>	0.24±0.01 <sup>ab</sup>	0.26±0.00 <sup>b</sup>	0.23±0.00 <sup>a</sup>	0.23±0.00 <sup>a</sup>

注: 同行数据肩标不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

Notes: In the same row, values with different lowercase letters superscripts mean significant difference, the same below.

$y = 7.0 \times 10^{-6}x^2 - 3.5 \times 10^{-3}x + 1962.3 \times 10^{-3}$  ( $R^2 = 0.9847$ ), 得出胆汁酸最适添加量为 250.0 mg/kg。据此, 初始体重为 (23.00±0.03) g 的黄鳝饲料中胆汁酸适宜添加量为 250.0~283.3 mg/kg。

### 2.3 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝体成分的影响

由表 4 可知, 随饲料中胆汁酸添加量的增加, 全鱼粗蛋白呈先升后降趋势 ( $P < 0.05$ ), 在 BA250 组达到最高值。肝脏的粗脂肪随饲料胆汁酸添加量的增加呈先降后升趋势 ( $P < 0.05$ )。全鱼水分、粗脂肪、灰分和肌肉粗脂肪在各组间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.4 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝血清生化指标和肠道通透性指标的影响

由表 5 可知, LDL-C 浓度在 BA500 组显著高于其余各组 ( $P < 0.05$ )。ALT 含量在添加胆汁酸的各个处理组中均显著低于 CON 组, 而 AST 含量

随胆汁酸添加量的增加呈先降后升的趋势 ( $P < 0.05$ )。肠道通透性指标的结果显示, 随胆汁酸添加量的增加, D-LA 含量呈降低趋势 ( $P < 0.05$ )。而 DAO 呈先降后升趋势 ( $P < 0.05$ ), 在 BA250 组中含量最低。TBA、BUN 和 T-CHO 各组间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.5 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肠道消化能力的影响

由表 6 可知, 饲料中添加胆汁酸对黄鳝肠道的淀粉酶和胰蛋白酶活性无显著影响 ( $P > 0.05$ )。在 BA250 组中, 肠道脂肪酶活性显著低于其他组 ( $P < 0.05$ ), 且其他组之间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.6 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肠道抗氧化能力的影响

由表 7 可知, 随着胆汁酸添加量的增加, 黄鳝肠道的 T-SOD 和 GSH-Px 活性均呈先升后降的

表 4 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝全鱼体成分、肝脏和肌肉粗脂肪含量(湿重)的影响

Tab. 4 Effects of dietary bile acids on the body composition and total lipid content (wet weight) in liver and muscle of *M. albus*

指标 indexes	组别 groups					%
	CON	BA125	BA250	BA375	BA500	
<b>全鱼 whole body</b>						
水分 moisture	70.08±0.92	70.31±1.90	70.91±3.06	71.65±0.38	71.80±1.90	
粗蛋白 crude protein	20.25±0.08 <sup>a</sup>	19.90±0.15 <sup>a</sup>	22.14±0.09 <sup>b</sup>	20.26±0.18 <sup>a</sup>	20.07±0.13 <sup>a</sup>	
粗脂肪 crude lipid	4.05±0.27	3.61±0.32	3.31±0.21	3.12±0.18	3.58±0.25	
灰分 ash	3.08±0.08	2.82±0.10	2.74±0.06	2.79±0.12	2.88±0.10	
<b>肝脏 liver</b>						
粗脂肪 crude lipid	3.57±0.09 <sup>b</sup>	2.99±0.30 <sup>b</sup>	2.02±0.26 <sup>a</sup>	1.89±0.35 <sup>a</sup>	2.10±0.23 <sup>a</sup>	
<b>肌肉 muscle</b>						
粗脂肪 crude lipid	3.07±0.13	3.00±0.47	3.25±0.37	3.12±0.42	3.07±0.13	

表 5 饲料中胆汁酸添加量对黄鳍血清生理生化指标和肠道通透性指标的影响

Tab. 5 Effects of dietary bile acids on the serum physiological and biochemical indexes and intestinal permeability indexes of *M. albus*

指标 indexes	组别 groups				
	CON	BA125	BA250	BA375	BA500
胆汁酸/( $\mu\text{mol/L}$ ) TBA	3.09 $\pm$ 0.13	3.00 $\pm$ 0.29	3.79 $\pm$ 0.25	3.25 $\pm$ 0.20	3.24 $\pm$ 0.19
血尿素/( $\text{mmol/L}$ ) BUN	1.03 $\pm$ 0.05	1.13 $\pm$ 0.12	1.33 $\pm$ 0.18	1.48 $\pm$ 0.12	1.23 $\pm$ 0.15
总胆固醇/( $\text{mmol/L}$ ) T-CHO	3.37 $\pm$ 0.05	4.22 $\pm$ 0.27	3.38 $\pm$ 0.49	3.12 $\pm$ 0.55	3.57 $\pm$ 0.37
高密度脂蛋白胆固醇/( $\text{mmol/L}$ ) H-LDC	3.23 $\pm$ 0.27	3.23 $\pm$ 0.53	3.66 $\pm$ 0.72	4.04 $\pm$ 0.47	3.63 $\pm$ 0.51
低密度脂蛋白胆固醇/( $\text{mmol/L}$ ) L-DLC	0.84 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	1.07 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.12 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	1.19 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>	1.87 $\pm$ 0.18 <sup>b</sup>
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	7.47 $\pm$ 0.98 <sup>b</sup>	3.70 $\pm$ 0.31 <sup>a</sup>	3.57 $\pm$ 0.34 <sup>a</sup>	3.98 $\pm$ 0.18 <sup>a</sup>	4.63 $\pm$ 0.32 <sup>a</sup>
谷草转氨酶/(U/L) AST	21.53 $\pm$ 0.58 <sup>c</sup>	11.20 $\pm$ 1.90 <sup>a</sup>	12.77 $\pm$ 2.68 <sup>ab</sup>	15.87 $\pm$ 1.51 <sup>abc</sup>	17.83 $\pm$ 1.71 <sup>bc</sup>
D-乳酸/( $\text{ng/mL}$ ) D-LA	14.96 $\pm$ 1.21 <sup>c</sup>	11.95 $\pm$ 0.44 <sup>b</sup>	11.24 $\pm$ 0.55 <sup>ab</sup>	10.91 $\pm$ 0.58 <sup>ab</sup>	9.27 $\pm$ 0.29 <sup>a</sup>
二胺氧化酶/( $\text{pg/mL}$ ) DAO	344.50 $\pm$ 21.90 <sup>b</sup>	259.70 $\pm$ 14.80 <sup>a</sup>	258.40 $\pm$ 21.84 <sup>a</sup>	322.47 $\pm$ 25.56 <sup>ab</sup>	330.00 $\pm$ 24.67 <sup>ab</sup>

表 6 饲料中胆汁酸添加量对黄鳍肠道消化酶活性的影响

Tab. 6 Effects of dietary bile acids on the intestinal digestive enzymes activity of *M. albus*

指标 indexes	组别 groups				
	CON	BA125	BA250	BA375	BA500
淀粉酶/(U/ $\mu\text{g prot}$ ) amylase	28.00 $\pm$ 2.30	23.99 $\pm$ 1.14	29.85 $\pm$ 3.01	26.22 $\pm$ 4.21	28.81 $\pm$ 2.25
脂肪酶/(U/g prot) lipase	1.05 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	1.03 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>	0.75 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.10 $\pm$ 0.04 <sup>b</sup>	1.01 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>
胰蛋白酶/(U/mg prot) trypsin	384.10 $\pm$ 31.02	374.20 $\pm$ 29.37	368.60 $\pm$ 39.80	485.63 $\pm$ 48.17	477.19 $\pm$ 38.29

趋势, 在 BA250 组中黄鳍肠道 T-SOD 的活性显著高于 BA375 和 BA500 组 ( $P<0.05$ )。MDA 的含量随着胆汁酸添加量的增加呈现先降后升的趋势 ( $P<0.05$ ), BA250 组显著低于 CON 和 BA375 组 ( $P<0.05$ )。

## 2.7 饲料中胆汁酸添加量对黄鳍肝脏抗氧化酶活性的影响

由表 8 可知, 随着胆汁酸添加量的增加, 肝脏 T-SOD 活性呈上升趋势 ( $P<0.05$ ), BA375 和 BA500 组显著高于 CON 和 BA125 组 ( $P<0.05$ )。

表 7 饲料中胆汁酸添加量对黄鳍肠道抗氧化酶活性的影响

Tab. 7 Effects of dietary bile acids on the intestinal antioxidant enzyme activity of *M. albus*

指标 indexes	组别 groups				
	CON	BA125	BA250	BA375	BA500
总超氧化物歧化酶/(U/mg prot) T-SOD	32.66 $\pm$ 1.46 <sup>ab</sup>	36.8 $\pm$ 2.52 <sup>ab</sup>	39.19 $\pm$ 3.56 <sup>b</sup>	30.65 $\pm$ 2.19 <sup>a</sup>	28.97 $\pm$ 1.83 <sup>a</sup>
谷胱甘肽过氧化物酶/( $\text{nmol}\cdot\text{min}\cdot\text{mg prot}$ ) GSH-Px	103.59 $\pm$ 1.29 <sup>bc</sup>	110.75 $\pm$ 1.67 <sup>c</sup>	105.11 $\pm$ 7.65 <sup>bc</sup>	92.14 $\pm$ 2.89 <sup>ab</sup>	83.35 $\pm$ 6.2 <sup>ab</sup>
丙二醛/( $\text{nmol/mg prot}$ ) MDA	1.50 $\pm$ 0.19 <sup>c</sup>	0.92 $\pm$ 0.08 <sup>ab</sup>	0.89 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	1.33 $\pm$ 0.19 <sup>bc</sup>	1.05 $\pm$ 0.14 <sup>ab</sup>

表 8 饲料中胆汁酸添加量对黄鳍肝脏抗氧化酶活性的影响

Tab. 8 Effects of dietary bile acids on the liver antioxidant enzyme activity of *M. albus*

指标 indexes	组别 groups				
	CON	BA125	BA250	BA375	BA500
总超氧化物歧化酶/(U/mg prot) T-SOD	109.83 $\pm$ 12.53 <sup>a</sup>	109.75 $\pm$ 12.36 <sup>a</sup>	114.24 $\pm$ 4.33 <sup>ab</sup>	140.50 $\pm$ 6.86 <sup>bc</sup>	145.01 $\pm$ 8.50 <sup>c</sup>
谷胱甘肽过氧化物酶/( $\text{nmol/mg prot}$ ) GSH-Px	80.55 $\pm$ 4.57 <sup>a</sup>	80.85 $\pm$ 1.97 <sup>a</sup>	99.73 $\pm$ 3.49 <sup>b</sup>	89.91 $\pm$ 1.78 <sup>a</sup>	94.48 $\pm$ 2.92 <sup>b</sup>
过氧化氢酶/(U/mg prot) CAT	5.59 $\pm$ 0.62 <sup>bc</sup>	5.48 $\pm$ 0.32 <sup>bc</sup>	7.34 $\pm$ 0.57 <sup>c</sup>	5.04 $\pm$ 0.94 <sup>ab</sup>	3.38 $\pm$ 0.51 <sup>a</sup>
丙二醛/( $\text{nmol/mg prot}$ ) MDA	1.14 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.18 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	0.79 $\pm$ 0.09 <sup>a</sup>	1.26 $\pm$ 0.11 <sup>b</sup>	1.52 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>

BA250 和 BA500 组 GSH-Px 活性显著高于 CON 组 ( $P<0.05$ )。BA250 组 CAT 活性最高, BA500 组最低 ( $P<0.05$ )。

## 2.8 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肝脏组织学结构的影响

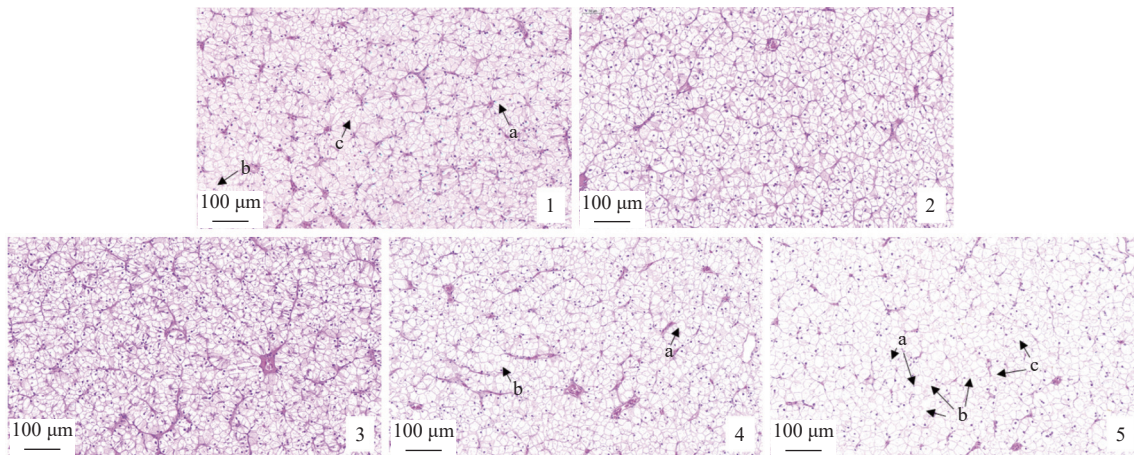
肝脏 H.E 染色结果显示, CON 组肝细胞肿大, 部分肝细胞壁模糊 (图版 I)。BA125 和 BA250 组肝脏组织学结构较为完整, 细胞核数量增多。BA375 组肝细胞出现空泡化和破裂。BA500 组肝细胞空泡化严重, 无核和破裂细胞增多。肝脏油红 O 染色结果显示, 随饲料胆汁酸添加量增加, 肝脏脂滴数量呈先降后升趋势, 且在 BA250 组最少 (图版 II)。

## 2.9 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肝脏脂肪代谢的影响

随饲料胆汁酸添加量的增加, 肝脏 *acc* 和 *dgat2* 的 mRNA 表达水平呈降低趋势 ( $P<0.05$ ), *cpt1* 的 mRNA 表达水平呈先升后降的趋势 ( $P<0.05$ ), *ppara* 的 mRNA 表达水平在 BA375 时最高 ( $P<0.05$ ) (图 1)。

## 2.10 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肠道组织学结构的影响

肠道形态学指标如图版 III 和图 2 所示, 各组肠道结构完整, 肠绒毛整齐, 肠黏膜光滑。但随饲料胆汁酸添加量的增加, 肠道绒毛宽度和固有

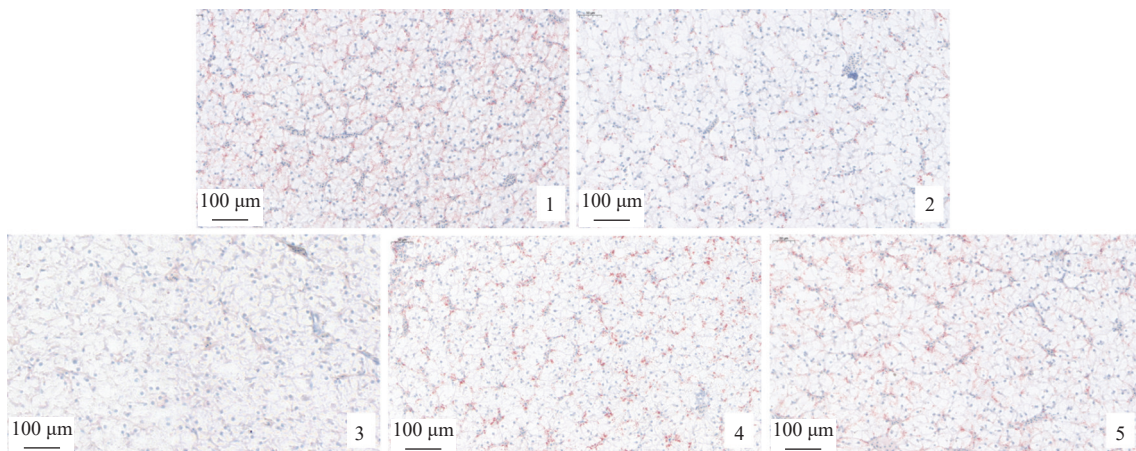


图版 I 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肝脏组织形态的影响 (H.E 染色) ( $\times 40$ )

1-5 分别表示 0、125、250、375 和 500 mg/kg 胆汁酸组, 下同。a. 细胞核消失或缩小, b. 细胞膜破裂, c. 细胞空泡。

### Plate I Effects of dietary bile acids on liver morphology of *M. albus* ( $\times 40$ )

1-5 are CON, BA125, BA250, BA375 and BA500 groups, respectively, the same below. a. the disappearance or shrinkage of the nucleus, b. cell membrane rupture, c. cellular vacuole.



图版 II 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肝脏组织形态的影响 (油红 O 染色) ( $\times 40$ )

### Plate II Effects of dietary bile acids on liver oil red staining of *M. albus* ( $\times 40$ )

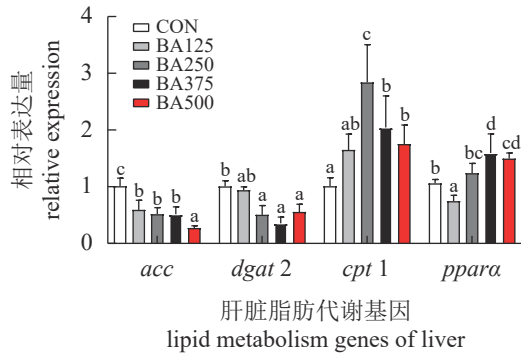


图 1 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肝脏脂肪代谢相关基因的影响

柱上不同字母代表组间存在显著差异,  $P < 0.05$ , 下同。

Fig. 1 Effects of dietary bile acids on lipid metabolism-related genes in liver of *M. albus*

The different letters on the column represent significant differences between groups,  $P < 0.05$ , the same below.

层宽度呈先升后降趋势 ( $P < 0.05$ ), 肠绒毛宽度在 BA375 组达到最高, 固有层宽度在 BA250 组达到最高。BA500 组绒毛宽度显著低于 CON 组 ( $P < 0.05$ ); BA500 组肠道绒毛高度显著低于其余各组, 而其他各组之间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.11 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肠道屏障相关基因表达的影响

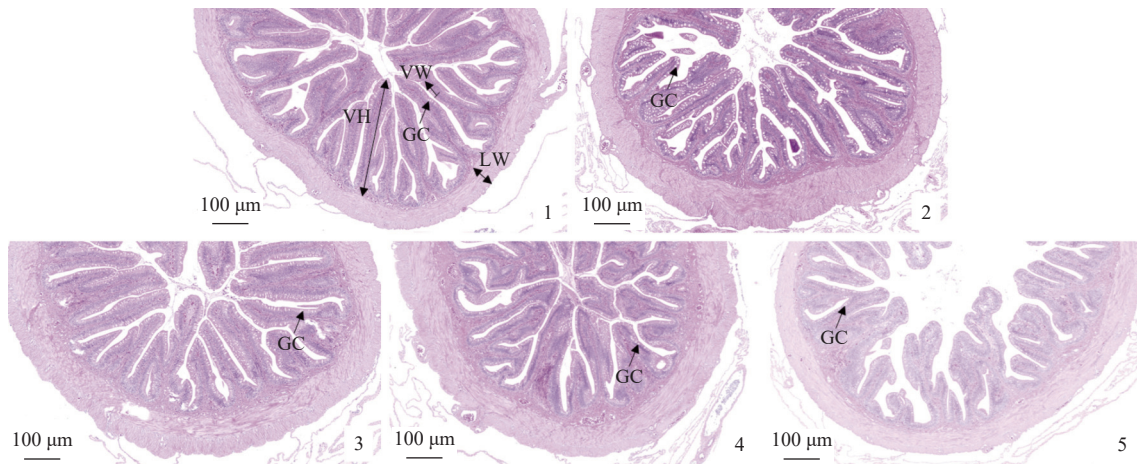
如图 3 所示, 随饲料胆汁酸添加量的增加, *zo1*、*zo2* 和 *occludin* 的 mRNA 表达水平平均呈先升后降趋势 ( $P < 0.05$ ), *zo1*、*zo2* 和 *occludin* 的 mRNA 表达水平分别在 BA375 组、BA250 组和 BA125

组达到最高。

## 3 讨论

### 3.1 胆汁酸对黄鳝生长性能的影响

胆汁酸是在肝脏中由胆固醇产生, 可提高脂肪消化效率, 促进胆固醇和有毒代谢物的排泄<sup>[12]</sup>。本研究发现, 添加适量的胆汁酸可显著改善黄鳝的生长性能。在鳊<sup>[7]</sup>、虹鳟<sup>[8]</sup>、乌鳢<sup>[9]</sup>和草鱼<sup>[12]</sup>的研究中均有相似的结果。可能的原因是胆汁酸促进鱼体对脂肪的代谢吸收。同时本研究发现, 饲料中胆汁酸含量过量时, 黄鳝的增重率和终末均重有下降的趋势, 且饲料转化率显著升高。这与在尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)<sup>[17]</sup> 中的研究结果一致。可能是过量的胆汁酸造成了胆固醇积累、肝细胞毒性等负面影响, 进而导致生长性能降低。适量的胆汁酸可起到促进鱼类生长的作用, 而过量的胆汁酸可能会造成毒性并抑制鱼类的生长。在本研究中, 饲料中添加胆汁酸并未显著影响胰蛋白酶和淀粉酶的活性, 甚至降低了脂肪酶的活性。添加胆汁酸并未影响大黄鱼 (*Larimichthys crocea*)<sup>[18]</sup> 肠道主要消化酶活性; 提高了乌鳢<sup>[9]</sup>和豹纹鳃棘鲈 (*Plectropomus leopardus*)<sup>[19]</sup> 肠道脂肪酶和胰蛋白酶的活性; 提高了宽体舌鳈<sup>[14]</sup> 肠道脂肪酶和淀粉酶活性, 但不影响其蛋白水解酶活性。因此, 胆汁酸添加对鱼类消化酶造成的影响并不一致, 这可能与鱼类的种类、大小、养殖条件和饲料组成有关。



图版 III 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肠道组织形态的影响 (H.E 染色) ( $\times 5$ )

LW. 固有层宽度, VH. 绒毛高度, VW. 绒毛宽度, GC. 杯状细胞。

Plate III Effects of dietary bile acids on intestinal morphology of *M. albus* ( $\times 5$ )

LW. lamina propria width, VH. villus height, VW. villus width, GC. goblet cell.



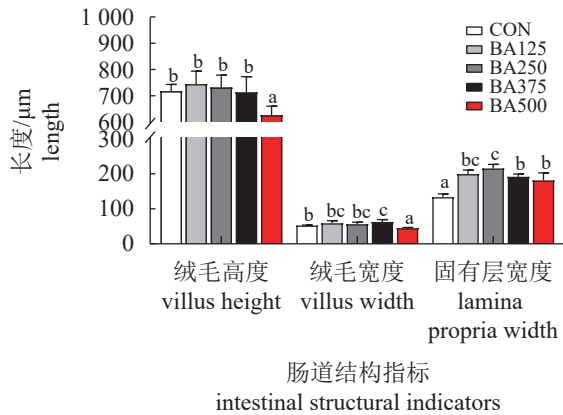


图2 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肠道结构的影响

Fig. 2 Effects of dietary bile acids on intestinal structure of *M. albus*

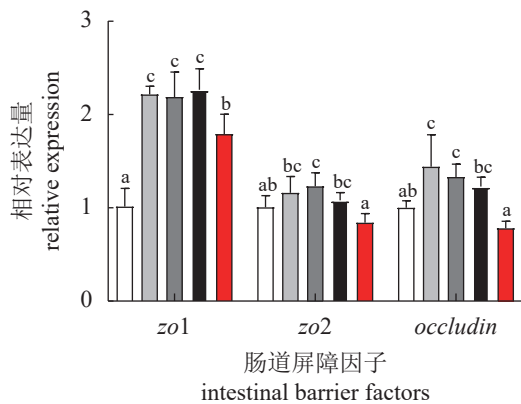


图3 饲料中胆汁酸添加量对黄鳝肠道屏障相关基因表达的影响

Fig. 3 Effects of dietary bile acids on the expression of genes related to intestinal barrier of *M. albus*

本研究以特定生长率和饲料转化率为评价指标, 采用一元二次回归分析, 得出黄鳝饲料胆汁酸的适宜添加量为 250.0~283.3 mg/kg。目前, 在不同鱼类的研究中, 饲料中添加的胆汁酸是否能有效地促进鱼类的生长结论并不一致。饲料中添加适量的胆汁酸对大多数鱼类生长性能有积极的促进作用, 如大口黑鲈在胆汁酸(鹅去氧胆酸)添加量为 900 mg/kg 时生长性能最佳<sup>[10]</sup>; 鳊<sup>[7]</sup>在胆汁酸(猪去氧胆酸占 70.9%, 猪胆酸占 8.0%, 鹅去氧胆酸占 20.2%)添加量为 900 mg/kg 时生长性能显著提升; 而大黄鱼在胆汁酸(混合胆汁酸)添加量为 300 mg/kg 时生长性能最佳<sup>[20]</sup>。但对一些鱼类的研究表明, 饲料中添加胆汁酸并不能显著改善生长性能, 如红鳍东方鲀<sup>[11]</sup>。因此, 胆汁酸的添加效果需根据鱼的种类而异。

### 3.2 胆汁酸对黄鳝体成分和脂肪代谢的影响

本研究发现, 适量的胆汁酸添加可显著降低黄鳝肝脏中粗脂肪含量。饲料添加胆汁酸降低了鳊<sup>[7]</sup>和红鳍东方鲀<sup>[11]</sup>的全鱼和肝脏中的粗脂肪含量。饲料胆汁酸添加量从 150 mg/kg 提高至 450 mg/kg 时显著降低了大黄鱼肝脏的脂肪含量, 主要是通过降低脂肪合成基因的表达, 以及提高脂质氧化基因的表达来实现<sup>[20]</sup>。此结果与本实验研究结果相似, *acc* 和 *dgat2* 是鱼类中重要的脂肪酸合成基因, *cpt1* 和 *ppara* 在脂肪酸的氧化分解中起重要调节作用, 胆汁酸的添加可提高 *cpt1* 和 *ppara* 基因的表达水平, 同时降低 *acc* 和 *dgat2* 的表达水平, 加速脂肪的氧化分解, 进而缓解黄鳝肝脏脂肪沉积。然而, 过量的胆汁酸可能会破坏胆汁酸的动态平衡, 并对脂类代谢产生相反的影响。珍珠龙胆斑鱼高脂饲料中补充 300~900 mg/kg 胆汁酸可降低其肝脏甘油三酯和脂肪含量, 而添加 1 200~1 500 mg/kg 胆汁酸则作用相反<sup>[13]</sup>。本实验发现, 饲料中胆汁酸添加量为 250 mg/kg 时, 全鱼粗蛋白的含量显著高于其余各组。在凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)<sup>[21]</sup> 中也有类似的结果。推测其可能的原因, 是鱼类增加了对脂肪的吸收利用, 从而促进鱼体自身的蛋白质沉积。

### 3.3 胆汁酸对黄鳝肝脏健康的影响

血清中谷丙转氨酶和谷草转氨酶的含量是评估肝脏损伤的重要指标。本研究中发现, 添加胆汁酸的处理组的血清谷丙转氨酶含量显著低于对照组, 且谷草转氨酶的含量随胆汁酸添加量的增加呈先降后升趋势, 推测饲料中添加适量胆汁酸可缓解黄鳝肝脏损伤, 而饲料中过量胆汁酸的添加可能导致肝脏健康受损。在尼罗罗非鱼<sup>[17]</sup>和凡纳滨对虾<sup>[19]</sup>中也有相似的结果。

动物细胞的健康与氧化和抗氧化平衡相关, 引起机体氧化应激的主要原因之一是机体内活性氧 (ROS) 的异常增加, 生成了脂质过氧化物<sup>[22]</sup>。丙二醛的含量反映了机体脂质过氧化物的程度, 也能间接反映细胞的受损程度<sup>[23]</sup>。SOD 是生物体内至关重要的抗氧化酶之一, 可清除机体内自由基, 从而维护机体免受氧化损伤<sup>[24]</sup>。草鱼饲料中, 添加胆汁酸的处理组与未添加的处理组相比, SOD 活性显著上升<sup>[25]</sup>。随着饲料中胆汁酸添加量的增加, 黄鳝肝脏中 T-SOD 呈逐渐上升的趋势。适量胆汁酸的添加可提高 GSH-Px 和 CAT 的活性,

在胆汁酸添加量为 250 mg/kg 时, 二者的活性最高。肝脏中 MDA 的含量呈先降低后升高的趋势, 且在 BA250 组时的含量最低。在对黄鳝的研究中发现, 胆汁酸在基因水平上正向调控氧化应激 Nrf2-Keap1 通路, 可以降低黄鳝肠道氧化应激反应<sup>[16]</sup>。该结果与对哺乳动物<sup>[26]</sup>中的结果一致, 推测胆汁酸的抗氧化作用可能依赖于通过调节 Nrf2-Keap1 信号通路, 进而发挥清除丙二醛和增强鱼体抗氧化能力的作用。

肝脏是脂肪代谢的重要器官。研究表明, 饲料中低浓度的胆汁酸添加对尼罗罗非鱼的肝脏形态无显著影响, 而添加 1.35 g/kg 的胆汁酸会导致其肝细胞出现严重的核迁移和空泡化现象<sup>[17]</sup>。饲料中添加 300 mg/kg 的胆汁酸可改善大口黑鲈的肝细胞肿大和空泡化, 同时降低肝脏的脂滴数量, 改善肝脏脂肪蓄积情况<sup>[25]</sup>。凡纳滨对虾饲料中添加适量胆汁酸可使肝胰腺小体恢复正常, 排列整齐, 改善肝胰腺的健康<sup>[21]</sup>。本研究发现, 饲料中添加适量的胆汁酸可降低黄鳝肝细胞的空泡化, 恢复肝脏的完整性, 同时减少脂肪在肝脏中的蓄积。但过量的胆汁酸 (500 mg/kg) 会导致肝脏空泡数目增多, 肝细胞破裂, 从而导致肝脏损伤。

### 3.4 胆汁酸对黄鳝肠道健康的影响

本研究结果发现, 黄鳝肠道中 T-SOD 和 GSH-Px 的活性随胆汁酸添加量的增加呈先升后降的趋势。推测饲料中适量胆汁酸的添加可提高黄鳝肝脏和肠道的抗氧化能力, 过量的胆汁酸可能不一定会达到综合抗氧化的效果, 且鱼体中不同的器官对胆汁酸的耐受性可能不同, 因此几种酶活性呈现不同的变化趋势。

肠道是鱼类消化吸收的主要场所, 其肠绒毛决定消化吸收效率。研究表明, 饲料中添加适量胆汁酸对鱼体会产生积极的影响, 添加适量胆汁酸可增加大口黑鲈肠道绒毛长度和杯状细胞数量<sup>[27]</sup>。在本研究中, 随着饲料胆汁酸添加量的增加, 肠道的绒毛宽度和固有层宽度呈先升后降的趋势, 在 BA250 组时固有层宽度达到最高, 而在 BA500 组中绒毛宽度显著低于对照组。同时 BA500 组的绒毛高度显著低于对照组, 表明饲料中添加适量胆汁酸 (125~375 mg/kg) 可能通过改善肠道结构促进鱼体对营养物质的消化吸收, 进而促进生长; 但高浓度 (500 mg/kg) 的胆汁酸添加会对黄鳝肠道结构造成损伤, 进一步影响肠道健康。

<https://www.china-fishery.cn>

肠道健康与黏膜屏障的完整性密切相关。DAO 是主要存在于肠黏膜上皮细胞内的代谢酶, D-LA 是肠道内细菌的代谢产物, 正常情况下二者在血清中含量极低。当肠上皮细胞损伤时, 肠道黏膜被破坏, 通透性增加, 往往会导致 DAO 和 D-LA 进入机体血液中, 因此二者在血清中的含量通常作为评判肠道屏障功能的重要指标<sup>[28]</sup>。本实验结果显示, 随着饲料中胆汁酸添加量的增加, 黄鳝血清中 D-LA 的含量呈显著降低的趋势。DAO 呈先降后升的趋势。同时, 对肠道屏障具有保护和调节功能的紧密连接蛋白基因 (*zo1*、*zo2*、*occludin*) 的表达水平也呈先升后降的趋势。综上, 推测胆汁酸适量添加可提高黄鳝肠道屏障的功能, 降低肠道的通透性, 而过量的胆汁酸可能造成肠道屏障的损伤。该结果与张帆等<sup>[29]</sup>对小鼠 (*Mus musculus*) 的研究结果相似, 对于胆汁酸减轻机体的肠道损伤的作用可能与胆汁酸受体有关。胆汁酸受体 G 蛋白偶联受体 5 (TGR5) 被胆汁酸激活, TGR5 激活后可减轻炎症反应, 抑制 NF- $\kappa$ B 信号传导, 通过抑制肠道炎症反应进而减轻肠道的损伤。

## 4 结论

饲料中适量添加胆汁酸可增强黄鳝肝脏和肠道抗氧化能力, 降低肝脏损伤和肝脂沉积, 改善肠道功能, 进而提高黄鳝生长性能。以特定生长率和饲料转化率作为评价指标, 采用一元二次回归方程得, 初始均重为 (23.00 $\pm$ 0.03) g 的黄鳝饲料中胆汁酸的适宜添加量为 250.0~283.3 mg/kg。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [1] 浦岩松. 抗生素在水产养殖应用存在的问题及对策[J]. 黑龙江水产, 2023, 42(4): 291-293.  
Pu Y S. Problems and countermeasures of antibiotic application in aquaculture[J]. Northern Chinese Fisheries, 2023, 42(4): 291-293 (in Chinese).
- [2] 陈笑冰, 潘秀莲, 孙作登, 等. 渔用抗生素应用研究和减量措施分析[J]. 中国水产, 2022(7): 74-76.  
Chen X B, Pan X L, Sun Z D, et al. Application research and reduction measures analysis of fishery antibiotics[J]. China Fisheries, 2022(7): 74-76 (in Chinese).

中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- [3] 彭秀蓉. 胆汁酸对草鱼生长和肠道健康的作用及其机制 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.  
Peng X R. Effects of dietary bile acids on growth and intestinal health and its potential mechanisms of on-growing grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019 (in Chinese).
- [4] 刘奕纯, 翟振亚, 牛凯敏, 等. 胆汁酸在猪禽营养中的研究进展 [J]. 中国兽医学报, 2022, 42(5): 1090-1096.  
Liu Y C, Zhai Z Y, Niu K M, *et al.* Advances in bile acid in swine and poultry nutrition[J]. Chinese Journal of Veterinary Science, 2022, 42(5): 1090-1096 (in Chinese).
- [5] 曹爱智, 李金宝, 娄倩倩. 胆汁酸对肉鸡生产、屠宰和免疫功能的影响 [J]. 饲料研究, 2011, 34(6): 35-37.  
Cao A Z, Li J B, Lou Q Q. Effects of bile acid on production, slaughtering and immune function of broilers[J]. Feed Research, 2011, 34(6): 35-37 (in Chinese).
- [6] Steinacher D, Claudel T, Trauner M. Therapeutic mechanisms of bile acids and nor-ursodeoxycholic acid in non-alcoholic fatty liver disease[J]. *Digestive Diseases*, 2017, 35(3): 282-287.
- [7] Zhang Y P, Feng H X, Liang X F, *et al.* Dietary bile acids reduce liver lipid deposition via activating farnesoid X receptor, and improve gut health by regulating gut microbiota in Chinese perch (*Siniperca chuatsi*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022, 121: 265-275.
- [8] 颀志刚, 牛翠娟. 可利康对虹鳟生长的影响 [J]. 饲料研究, 2002, 25(10): 22, 25  
Xie Z G, Niu C J. Effect of Kelikang on the growth of rainbow trout[J]. *Feed Research*, 2002, 25(10): 22, 25 (in Chinese).
- [9] Hou Y B, Hou Y, Yao L, *et al.* Effects of chromium yeast, tributyrin and bile acid on growth performance, digestion and metabolism of *Channa argus*[J]. *Aquaculture Research*, 2019, 50(3): 836-846.
- [10] Yin P, Xie S W, Zhuang Z X, *et al.* Dietary supplementation of bile acid attenuate adverse effects of high-fat diet on growth performance, antioxidant ability, lipid accumulation and intestinal health in juvenile large-mouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture*, 2021, 531: 735864.
- [11] Liao Z B, Sun B, Zhang Q G, *et al.* Dietary bile acids regulate the hepatic lipid homeostasis in tiger puffer fed normal or high-lipid diets[J]. *Aquaculture*, 2020, 519: 734935.
- [12] Zhou J S, Chen H J, Ji H, *et al.* Effect of dietary bile acids on growth, body composition, lipid metabolism and microbiota in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, 24(2): 802-813.
- [13] Xu J, Xie S W, Chi S Y, *et al.* Protective effects of taurocholic acid on excessive hepatic lipid accumulation via regulation of bile acid metabolism in grouper[J]. *Food & Function*, 2022, 13(5): 3050-3062.
- [14] Li Y Z, Wang S P, Hu Y R, *et al.* Dietary bile acid supplementation reveals beneficial effects on intestinal healthy status of tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2021, 116: 52-60.
- [15] 张俊智. 饲料中添加丁酸钠对黄鳝生长、免疫及肠道健康的影响 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.  
Zhang J Z. Effect of dietary sodium butyrate on growth, immune and intestinal health in rice filed eel (*Monopterus albus*)[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015 (in Chinese).
- [16] Lei W, Li J M, Fang P, *et al.* Effects of dietary bile acids on growth performance, lipid deposition, and intestinal health of rice field eel (*Monopterus albus*) fed with high-lipid diets[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2023, 2023: 3321734.
- [17] Jiang M, Wen H, Gou G W, *et al.* Preliminary study to evaluate the effects of dietary bile acids on growth performance and lipid metabolism of juvenile genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed plant ingredient-based diets[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, 24(4): 1175-1183.
- [18] Li J B, Wang Z, Cao X F, *et al.* Effects of supplemental mixed bile acids on growth performance, body composition, digestive enzyme activities, skin color, and flesh quality of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) in soybean oil based diet[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1149887.
- [19] Gao Y J, Yao Y F, Huang J, *et al.* Effect of dietary bile acids supplementation on growth performance, feed utilization, intestinal digestive enzyme activity and fatty acid transporters gene expression in juvenile leopard coral grouper (*Plectropomus leopardus*)[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1171344.
- [20] Ding T, Xu N, Liu Y T, *et al.* Effect of dietary bile acid

- (BA) on the growth performance, body composition, antioxidant responses and expression of lipid metabolism-related genes of juvenile large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fed high-lipid diets[J]. *Aquaculture*, 2020, 518: 734768.
- [21] 王瑗瑗. 低鱼粉饲料中添加胆汁酸和胆固醇对凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 生长、营养物质利用和肝胰腺健康影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2023.
- Wang Y Y. Supplemental effects of bile acid and cholesterol in low fishmeal diets on growth, nutrient utilization, hepatopancreas health of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023 (in Chinese).
- [22] Jos Á, Pichardo S, Prieto A I, *et al.* Toxic cyanobacterial cells containing microcystins induce oxidative stress in exposed tilapia fish (*Oreochromis* sp.) under laboratory conditions[J]. *Aquatic Toxicology*, 2005, 72(3): 261-271.
- [23] Wei X B, Liu H Q, Sun X, *et al.* Hydroxysafflor yellow A protects rat brains against ischemia-reperfusion injury by antioxidant action[J]. *Neuroscience Letters*, 2005, 386(1): 58-62.
- [24] 张海燕, 姚树欣. 自由基新说 [J]. *中学生物学*, 2010, 26(9): 6-8.
- Zhang H Y, Yao S X. Discussion on free radical[J]. *Middle School Biology*, 2010, 26(9): 6-8 (in Chinese).
- [25] 郭永丽, 饶碧波, 郭慧, 等. 胆汁酸添加剂对草鱼抗氧化能力的影响 [J]. *广东农业科学*, 2009, 36(6): 133-135.
- Guo Y L, Rao B B, Guo H, *et al.* Effects of dietary bile acid additives on anti-oxidative capacity in grass carp *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2009, 36(6): 133-135 (in Chinese).
- [26] Liu Y, Azad M A K, Kong X F, *et al.* Dietary bile acids supplementation modulates immune response, antioxidant capacity, glucose, and lipid metabolism in normal and intrauterine growth retardation piglets[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 991812.
- [27] 杨惠慈, 夏耘, 张凯, 等. 饲料中添加黄连素和胆汁酸对大口黑鲈生长、抗氧化指标、肝肠组织结构及肠道菌群的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(6): 1-11.
- Yang H C, Xia Y, Zhang K, *et al.* Effects of dietary berberine and bile acid supplementation on largemouth bass growth, antioxidant indices, liver and intestinal tissue and its microbiota[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(6): 1-11 (in Chinese).
- [28] 余嘉文, 姚文娟, 朱和玲, 等. 肠道屏障功能对消化道肿瘤化学治疗后不良反应及营养状况的影响 [J]. *海军军医大学学报*, 2023, 44(2): 205-213.
- Yu J W, Yao W J, Zhu H L, *et al.* Effects of intestinal barrier function on adverse reactions and nutritional status of patients with gastrointestinal tumor after chemotherapy[J]. *Academic Journal of Naval Medical University*, 2023, 44(2): 205-213. (in Chinese).
- [29] 张帆, 汤礼军, 黄竹, 等. 鹅去氧胆酸对重症急性胰腺炎大鼠胰腺及肠道损伤的影响及意义 [J]. *西部医学*, 2022, 34(12): 1723-1728,1742.
- Zhang F, Tang L J, Huang Z, *et al.* Effect and significance of chenodeoxycholic acid on pancreatic and intestinal injury in rats with severe acute pancreatitis[J]. *Medical Journal of West China*, 2022, 34(12): 1723-1728,1742 (in Chinese).

## Effects of dietary bile acids on growth performance, serum biochemistry, liver and intestinal health of rice field eel (*Monopterus Albus*)

LEI Wei, LI Jiamin, FANG Peng, XU Jialing, LUO Tianlun, XU Luyao, PENG Mo\*

(College of Animal Science and Technology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** In recent years, searching for suitable feed additives to promote the growth, metabolism, and antioxidant capacity of aquatic animals has become an inevitable task for the aquaculture industry. The purpose of this trial was to study the effects of dietary bile acid (BAs) on growth performance, body composition, serum biochemical indexes, as well as liver and intestinal health of *Monopterus albus*. 1 200 eels (23.00±0.05) g were randomly divided into 5 groups with 4 replicates in each group. The fish in the five groups were fed isonitrogenous diets supplemented with 0, 125, 250, 375 and 500 mg/kg BA, and named as CON, BA125, BA250, BA375 and BA500 groups, respectively. The results of the 56-day feeding experiment showed that as the amount of BA increased, the final average weight, weight gain rate, and specific growth rate first increased and then decreased, with significantly higher figures in the BA250 group compared to the CON and BA500 groups. The feed conversion ratio showed a trend of first decreasing and then increasing. The crude protein content in whole body increased firstly and then decreased, while the trend for crude lipid content in liver was the opposite. The activity of serum glutamic pyruvic transaminase in the CON group was significantly higher than in the other groups, while the activity of glutamic oxaloacetic transaminase showed a trend of first decreasing and then increasing. The content of D-lactic acid decreased gradually, while diamine oxidase activity decreased at first and then increased. Compared with the CON group, the liver structure of the BA125 and BA250 groups was more intact. Excessive BA (BA375, BA500 groups) caused vacuolation and rupture of hepatocytes. The number of lipid droplets in liver decreased at first and then increased. The mRNA expression levels of *acc* and *dgat2* in the liver showed a decreasing trend, while the mRNA expression level of *cpt1* first increased and then decreased, and the mRNA expression level of *ppara* was highest in the BA375 group. The intestinal villus width and muscle layer thickness increased at first and then decreased, but the villus height and villus width in BA500 group were significantly lower than those in CON group. The total superoxide dismutase activity in the liver showed a gradual upward trend, with the highest glutathione peroxidase activity and catalase activity in the BA250 group, and the lowest malondialdehyde content in the BA250 group. The activities of total superoxide dismutase and glutathione peroxidase in the intestine both showed a trend of increasing first and decreasing afterwards, while the trend of malondialdehyde was the opposite, with the BA250 group significantly lower than the CON and BA375 groups. The mRNA expression levels of the intestinal tight junction protein genes *zo1*, *zo2*, and *occludin* all showed a significant trend of increasing first and then decreasing. The study showed that the addition of appropriate amounts of BA to the feed can improve the growth performance of *Monopterus albus*, enhance the antioxidant capacity of the liver and intestine, reduce lipid deposition in the liver by increasing lipid catabolism and inhibiting lipid synthesis, and alleviate liver damage and improve liver and intestinal function. The suitable dietary addition amount of BA in *M. albus* is 250.0-283.3 mg/kg.

**Key words:** *Monopterus albus*; bile acid; growth performance; antioxidant capacity; liver health; intestinal barrier

**Corresponding author:** PENG Mo. E-mail: [pengmowell@jxau.edu.cn](mailto:pengmowell@jxau.edu.cn)

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (32072992); Double Thousand Program of Jiangxi Province (jxsq2019201081)