



## 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈生长、肝脏健康及肠道屏障的影响

黄 嘉<sup>1</sup>, 冉旭东<sup>1</sup>, 刘欣平<sup>1</sup>, 胡 伟<sup>2</sup>, 唐仁军<sup>3</sup>,  
郑 娟<sup>3</sup>, 陈拥军<sup>1</sup>, 何远法<sup>1</sup>, 林仕梅<sup>1\*</sup>

(1. 西南大学水产学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 重庆市长寿区水产技术推广站, 重庆 401220;

3. 重庆市梁平区农业农村委员会, 重庆 400020)

**摘要:** 为探明胆汁酸与牛磺酸在大口黑鲈饲料中的互作效应, 在基础饲料中分别添加 0.03% 胆汁酸 (BA)、0.5% 牛磺酸 (Tau) 和 0.03% 胆汁酸+0.5% 的牛磺酸 (BA+Tau), 配制成 4 种等氮 (粗蛋白 46%) 等脂 (粗脂肪 10%) 的实验饲料, 在室内循环系统饲养大口黑鲈 (15.33±0.23 g) 8 周。结果显示, 饲料中单独或联合添加胆汁酸、牛磺酸均显著改善大口黑鲈生长性能, 降低血糖 (GLU)、血清中甘油三酯 (TG) 和胆固醇 (TC) 含量及谷丙转氨酶 (ALT) 与谷草转氨酶 (AST) 活性。同对照组相比, 实验组肝脏抗氧化酶 (SOD、CAT、GSH-Px) 活性显著增加, 而丙二醛 (MDA) 含量显著降低。同时调节肝脏糖代谢基因 (*gck*、*pkfr*、*pygl*、*pck1*) 以及脂代谢基因 (*cpt1*、*acaca*) 的 mRNA 表达水平, 降低肝脂和肝糖原含量, 明显改善肝脏的组织形态结构。此外, 饲料中单独或组合添加胆汁酸、牛磺酸均显著提高肠道抗氧化酶 (SOD、CAT、GSH-Px) 活性; 下调肠道促炎细胞因子 (*il-1β*、*il-8* 和 *tnf-α*) 的相对表达水平, 而二者组合还上调抗炎细胞因子 (*il-10*、*tgf-β*) 的相对表达水平。同时提高肠道紧密连接蛋白基因 *zo-1* 的相对表达水平, 二者配伍还显著提高基因 *claudin-1*、*occludin-1* 的相对表达水平。而胆汁酸组血清 D-乳酸 (D-lac) 含量和二胺氧化酶 (DAO) 活性显著低于对照组。研究表明, 饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或组合添加均能提高肝肠抗氧化能力、调节糖脂代谢和增强免疫功能, 改善肝脏和肠道健康, 进而促进大口黑鲈生长, 且二者还表现出协同效应。

**关键词:** 大口黑鲈; 胆汁酸; 牛磺酸; 肝脏健康; 肠道屏障

**中图分类号:** S 963.73

**文献标志码:** A

大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 目前是我国重要的淡水经济养殖鱼类, 因肉质鲜美紧实、无肌间刺、适宜加工等优点, 深受消费者喜爱, 养殖效益也十分突出, 2022 年我国养殖产量超过 80 万 t, 养殖规模与养殖产量逐年上升。但高度

集约化、高水平营养以及大量植物性原料应用导致大口黑鲈生长、健康、抗病力等一系列问题在生产上逐渐凸显, 因此, 通过营养学途径来解决上述实际问题, 是目前学界和业界关注的重点。胆汁酸、牛磺酸作为功能性的物质, 参与动物体

收稿日期: 2024-02-26 修回日期: 2024-03-20

资助项目: 重庆市现代农业产业技术体系 (CQMAITS202315); 重庆市水产科技创新重点攻关项目 (CQFTIU2024)

第一作者: 黄嘉 (照片), 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: [hj196245433@163.com](mailto:hj196245433@163.com)

通信作者: 林仕梅, 从事水产动物营养与健康养殖技术研究, E-mail: [linism198@163.com](mailto:linism198@163.com)



内多种生物学和生理学过程, 是我国批准使用的饲料添加剂。研究表明, 饲料中添加胆汁酸<sup>[1-3]</sup>、牛磺酸<sup>[4-5]</sup>可以有效改善养殖动物的生长性能和健康状况。肝脏是胆汁和牛磺酸的主要合成场所, 肝脏功能受损, 则胆汁酸和牛磺酸合成受阻。肝脏中生成的初级胆汁酸与牛磺酸结合形成结合型胆汁酸 (牛磺胆酸), 从而发挥重要的生理功能。一方面牛磺酸可以直接影响胆汁酸的合成<sup>[6]</sup>, 另一方面牛磺酸与胆汁酸共轭形成与机体健康密切相关的物质, 既可缓解疾病的发生<sup>[7]</sup>, 又可促进疾病的发展<sup>[8]</sup>。在肉鸡<sup>[9]</sup>上的研究显示, 胆汁酸和牛磺酸二者在改善生长性能上并无协同效应。在水产动物上, 单独添加胆汁酸或牛磺酸的作用效果已经得到证实<sup>[1,4]</sup>, 有关二者的协同作用未见资料报道。大口黑鲈作为典型的肉食性鱼类, 可以作为模式生物, 具有代表性和研究价值。为此, 本实验以大口黑鲈为研究对象, 从生长性能、抗

氧化能力、免疫力以及肠道物理屏障等维度探讨胆汁酸与牛磺酸是否存在互作关系, 为胆汁酸和牛磺酸在水产饲料中的应用提供理论依据, 同时为水产动物的健康养殖提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

以鱼粉、国产鸡肉粉、豆粕和棉籽蛋白为主要蛋白源, 鱼油和豆油为脂肪源, 基于现有的参数配制一种基础饲料, 分别添加 0.03% 胆汁酸 (BA)、0.5% 牛磺酸 (Tau)、0.03% 胆汁酸+0.5% 牛磺酸 (BA+Tau) 配制成 4 种等氮 (粗蛋白 46%) 等脂 (粗脂肪 10%) 的实验饲料 (表 1)。所有原料经 320  $\mu\text{m}$  筛粉碎后, 逐级稀释混合均匀, 制成粒径为 2.5 $\times$ 3.0 mm 的硬颗粒饲料, 自然风干后于 4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱保存备用。

表 1 实验饲料组成及营养水平 (风干基础)

Tab. 1 Composition and nutrient levels of test diets (air-dry basis)

| 项目 items                                   | 组别 groups  |       |       |        |
|--------------------------------------------|------------|-------|-------|--------|
|                                            | 对照 control | BA    | Tau   | BA+Tau |
| <b>原料/% ingredient</b>                     |            |       |       |        |
| 鱼粉 fish meal                               | 35.00      | 35.00 | 35.00 | 35.00  |
| 国产鸡肉粉 domestic chicken powder              | 10.00      | 10.00 | 10.00 | 10.00  |
| 豆粕 soybean meal                            | 12.00      | 12.00 | 12.00 | 12.00  |
| 大豆浓缩蛋白 concentrated soy protein            | 4.00       | 4.00  | 4.00  | 4.00   |
| 棉籽蛋白 cottonseed protein                    | 11.00      | 11.00 | 11.00 | 11.00  |
| 小麦蛋白粉 wheat gluten                         | 3.00       | 3.00  | 3.00  | 3.00   |
| 面粉 flour                                   | 13.00      | 13.00 | 13.00 | 13.00  |
| 鱼油 fish oil                                | 2.00       | 2.00  | 2.00  | 2.00   |
| 豆油 soybean oil                             | 5.00       | 5.00  | 5.00  | 5.00   |
| 氯化胆碱 choline chloride                      | 0.50       | 0.50  | 0.50  | 0.50   |
| 磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ | 0.50       | 0.50  | 0.50  | 0.50   |
| 胆汁酸 bile acid                              |            | 0.03  |       | 0.03   |
| 牛磺酸 taurine                                |            |       | 0.50  | 0.50   |
| 复合预混料 composite premix <sup>1)</sup>       | 3.00       | 3.00  | 3.00  | 3.00   |
| 微晶纤维素 microcrystalline cellulose           | 1.00       | 0.97  | 0.50  | 0.47   |
| <b>营养成分/% nutritional levels</b>           |            |       |       |        |
| 粗蛋白 crude protein                          | 46.61      | 46.31 | 46.12 | 46.68  |
| 粗脂肪 crude lipid                            | 10.75      | 10.94 | 10.76 | 10.75  |
| 粗灰分 crude ash                              | 11.82      | 11.72 | 11.82 | 11.79  |

注: 1) 维生素预混料和矿物质预混料。维生素预混料(mg/kg), 维生素A 18, 维生素D<sub>3</sub> 5, 维生素E 150, 维生素C (350 g/kg) 500, 维生素B<sub>1</sub> 16, 维生素B<sub>6</sub> 20, 维生素B<sub>12</sub> 6, 维生素K<sub>3</sub> 18, 核黄素 40, 肌醇 320, 泛酸 60, 烟酸 80, 叶酸 5, 生物素 2, 乙氧基喹啉 100。矿物质预混料 (mg/kg), 钠 30, 钾 50, 镁 100, 铜 4, 铁 25, 锌 35, 锰 12, 碘 1.6, 硒 0.2, 钴 0.8。

Notes: 1) Vitamin premixes and mineral premixes. vitamin premix (mg/kg), VA 18, VD<sub>3</sub> 5, VE 150, VC (350 g/kg) 500, VB<sub>1</sub> 16, VB<sub>6</sub> 20, VB<sub>12</sub> 6, VK<sub>3</sub> 18, riboflavin 40, inositol 320, calcium-D-pantothenate 60, niacinamide 80, folic acid 5, biotin 2, ethoxyquin 100. mineral premix (mg/kg): Na 30, K 50, Mg 100, Cu 4, Fe 25, Zn 35, Mn 12, I 1.6, Se 0.2, Co 0.8.

## 1.2 饲养管理

实验鱼种为 2022 年农业主导品种大口黑鲈“优鲈 3 号”, 购自重庆市三峡生态渔业有限公司, 暂养在室内循环养殖系统玻璃缸中, 用商品料驯化 15 d。选取体质健壮、活力好的大口黑鲈 [初始体重 ( $15.33 \pm 0.23$ ) g], 随机分为 4 个处理组, 每个处理组设 3 个重复, 每个重复 30 尾实验鱼, 在室内淡水循环养殖系统 (容积: 180 L) 饲养 8 周。养殖水源为脱氯自来水, 每天投喂 2 次 (8: 30、17: 30), 光照周期为 12 L : 12 D。养殖期间水温  $25.0 \sim 28.0$  °C, 溶解氧  $\geq 6.7$  mg/L, 氨氮  $\leq 0.42$  mg/L, pH 7.3~7.9。

## 1.3 样品制备与分析

**样品采集** 生长实验结束禁食 24 h 后, 用 0.01% MS-222 麻醉后逐尾称重计数。每个重复随机取 3 尾鱼用于体成分的测定。每个重复随机取 5 尾鱼, 在冰盘上解剖分离出肝脏和肠道组织, 液氮速冻后  $-80$  °C 冰箱保存备用。每个重复随机取 5 尾鱼, 用一次性注射器从尾静脉取血, 立即血糖试纸测血糖, 其余血液  $4$  °C 冰箱过夜离心 ( $4\ 000$  r/min, 10 min), 收集血清于  $-80$  °C 冰箱保存备用。每个重复随机取 3 尾鱼, 分离出肝脏, 在相同部位切取约  $1\text{ cm}^3$  的肝脏组织用于石蜡组织切片。每个重复随机取 6 尾鱼, 在无菌操作台上用灭菌的解剖器材解剖, 在相同部位取约  $3\text{ mm}^3$  的肝脏与肠道组织样品, 置于含有  $500\text{ }\mu\text{L}$  RNA 保护液 (TaKaRa, 日本) 的无菌无酶离心管中, 液氮速冻后  $-80$  °C 冰箱保存, 用于基因相对表达量的测定。实验过程中操作人员严格遵守实验动物伦理规范, 并按照实验动物伦理委员会制定的规章制度执行。

**常规营养成分的测定** 粗蛋白质含量采用凯氏定氮法 (GB/T 6432—2018) 测定; 粗脂肪含量采用索式抽提法 (GB/T 2479—2003) 测定; 粗灰分含量采用  $550$  °C 马弗炉煅烧法 (GB/T 212—2008) 测定; 肝脏脂肪含量采用氯仿-甲醇法测定。

**肝脏组织学切片** 用苏木精-伊红染液 (H.E) 染色。在光学显微镜 (OLYMPUS, DP73, 尼康, 日本) 下观察、拍照。

**酶学及代谢指标测定** 采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定超氧化物歧化酶 (SOD, WST-1 法)、过氧化氢酶 (CAT, 钼酸铵法)、谷胱

甘肽过氧化物酶 (GSH-Px)、谷草转氨酶 (AST, 比色法)、谷丙转氨酶 (ALT, 赖氏法) 以及丙二醛 (MDA, TBA 法)、甘油三酯 (TG, GPO-PAP 酶法) 和总胆固醇 (TC, COD-PAP 酶法) 含量均采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定, 测定方法参照试剂盒说明书进行。血糖采用血糖仪 (Accu-Chek Active, 血糖试纸货号 07124155, 德国) 测量。二胺氧化酶 (DAO) 和 *D*-乳酸 (*D*-Lac) 采用 ELISA 试剂盒 (上海生物科技有限公司) 测定。

**基因表达分析** 肝脏及肠道总 RNA 使用 RNAiso Plus 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 浓度并适当稀释至  $1\ 000\text{ ng}/\mu\text{L}$ 。随后使用反转录试剂盒 PrimeScript™ RT reagent Kit with gDNA Eraser (TaKaRa, 日本) 将提取的总 RNA 反转录为 cDNA, 并用 DEPC 水稀释后备用。采用荧光定量 PCR 仪 (Bio-Rad CFX96, 美国) 进行 qRT-PCR 检测, 引物序列见表 2。以  $\beta$ -actin 为内参, 采用  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  法计算基因的相对表达量。

## 1.4 计算公式

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

增重率 (WGR, %) =  $[(W_t - W_0) / W_0] \times 100\%$ ;

摄食率 (FR, %/d) =  $F / [(W_t + W_0) / 2 \times t] \times 100\%$ ;

饲料系数 (FCR) =  $F / (W_t - W_0)$ ;

存活率 (SR) =  $N_t / N_0 \times 100\%$

式中,  $W_t$  (g) 和  $W_0$  (g) 分别为终末鱼体重和初始鱼体重;  $t$  (d) 为养殖实验天数;  $F$  (g) 为总摄食量;  $N_t$  和  $N_0$  分别表示终末尾数和初始尾数。

## 1.5 数据分析

采用 SPSS 25.0 软件对实验所得数据进行双因素方差分析 (Two-way ANOVA), 差异显著时 ( $P < 0.05$ ), 用 Tukey 进行多重比较。统计数据均以平均值  $\pm$  标准差 (means  $\pm$  SD) 表示。

## 2 结果

### 2.1 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈生长性能和体组成的影响

饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加均显著提高 FBW、WGR 和 SGR 水平, 且受二者之间交互作用的影响 ( $P < 0.05$ ) (表 3)。而 Tau 和 BA+Tau 组 FI、FCR 显著低于其他组 ( $P < 0.05$ )。各实验组大口黑鲈成活率均为 100%。

表 2 实时定量 (RT-PCR) 引物设计序列

Tab. 2 Primers pair sequences for real-time PCR

| 基因<br>gene                 | 上游引物<br>forward primer(5'-3') | 下游引物<br>reverse primer(5'-3') | 产物大小 /bp<br>products length | 登录号<br>GenBank |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------|
| <i>sod</i>                 | TTTGTAGCAGGAGGGCGATT          | CTGAGCACCTTGTCCTGTGAT         | 258                         | 119895678      |
| <i>cat</i>                 | GGTGTTACGGATGAGATG            | GGAGAAGCGGACAGCAAT            | 178                         | 119893048      |
| <i>GSH-Px</i>              | CGTTACACTGCCAAGGGACTCGT       | GCCATTCCCTGGACGGACATAC        | 120                         | 119886459      |
| <i>il-8</i>                | TCCTGGCTGCTCTGGCTCTC          | GGATGGCCCTCCTGTTAATGG         | 111                         | 119892024      |
| <i>il-10</i><br><i>-10</i> | GCCAGCAGCATCATTACCAC          | AACCAGGACGGACAGGAGG           | 115                         | 119885912      |
| <i>il-1β</i>               | CGTGCCAACAGTGTGAAGAC          | TGGACAGAACAACGGGACTAC         | 193                         | 119914255      |
| <i>tgf-β</i>               | GGCAATGTAAGCGGTATGTC          | CTTGGTGTGTTGTAGAGGG           | 186                         | 119882881      |
| <i>tnf-α</i>               | AAATAGTGATTCTCAAGACGG         | TGAACAGTATGGCTCAGATGG         | 126                         | 119906688      |
| <i>g6pc1a</i>              | TCAGGTCATGCTATGGGTGC          | TGACTTGGTGTGGGAAGTGG          | 196                         | 119915800      |
| <i>gys2</i>                | CATCGGTCAATTTCCACG            | GCCTATCACCTGCCTCC             | 185                         | 119918252      |
| <i>pck1</i>                | ACGTCAACTGGTTCGCAAGA          | TGAGGCAGGTAGCCACAGC           | 142                         | 119886115      |
| <i>pygl</i>                | AACCAACGGCATCACTC             | AGGGCAGCATTATCAACA            | 144                         | 119910231      |
| <i>gck</i>                 | CTCGCTCTGCTCGTATGT            | CTCCCTTCCTCCGACTG             | 208                         | 119891486      |
| <i>pfkla</i>               | GCATCCCTATCTGTATAATCCC        | TCCACATTAGTCTTCAGGTCGT        | 274                         | 119904003      |
| <i>pklr</i>                | GATGACACTGCCGACTCTT           | ATTGGCTCCTGGTCGATGTC          | 105                         | 119897542      |
| <i>srebp1</i>              | CCAGGACCGAACTCAGCTTT          | TTGAGGTGAGGACGACAAGC          | 273                         | 119888831      |
| <i>acaca</i>               | TGTCTTCTGAGCCTTTCTTC          | GGTGATGTGCTCGCATACTG          | 189                         | 119896220      |
| <i>cpt1</i>                | CATTACAGGACAAAGGGAA           | CACGAACAAAGGCACAAG            | 121                         | 119893292      |
| <i>ppar-α</i>              | CCCGTCGTCAGTTGTTTAT           | CTGGAAGCGGCAGTGTT             | 250                         | 119893378      |
| <i>zo-1</i>                | GGCAAGAACCACCAAGAGG           | GCTGCGAAGACCACGAA             | 141                         | 119893804      |
| <i>claudin-1</i>           | CCAGTTTCTCTGCCGTTG            | CAACCCAGCCAGGAAACAG           | 169                         | 119898961      |
| <i>ccludin-1</i>           | CCTGCTCAGACTTCTTGCCG          | CTGTTGGACCACTCACTGCTTTTC      | 99                          | 119902247      |
| <i>β-actin</i>             | CCATCTATGAGGGCTACGC           | CGGCTGTGGTGGTGAAG             | 123                         | XM_038695351.1 |

表 3 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈生长性能的影响

Tab. 3 Effects of bile acids and taurine on growth performance of *M. salmoides*

| 项目<br>items     | 对照<br>control             | BA                       | Tau                       | BA+Tau                    | Two-Way ANOVA ( <i>P</i> ) |        |        |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------|--------|
|                 |                           |                          |                           |                           | BA                         | Tau    | BA×Tau |
| 初均重/g IBW       | 15.33±0.23                | 15.30±0.18               | 15.40±0.15                | 15.38±0.20                |                            |        |        |
| 末均重/g FBW       | 62.38±2.73 <sup>a</sup>   | 70.95±0.25 <sup>b</sup>  | 70.88±1.55 <sup>b</sup>   | 71.83±2.56 <sup>b</sup>   | 0.004                      | 0.004  | 0.012  |
| 增重率/% WGR       | 306.91±17.80 <sup>a</sup> | 363.70±1.66 <sup>b</sup> | 360.26±10.04 <sup>b</sup> | 367.06±16.60 <sup>b</sup> | 0.003                      | 0.006  | 0.011  |
| 特定生长率/(%/d) SGR | 2.50±0.08 <sup>a</sup>    | 2.74±0.01 <sup>b</sup>   | 2.73±0.04 <sup>b</sup>    | 2.75±0.07 <sup>b</sup>    | 0.003                      | 0.005  | 0.009  |
| 摄食率/(%/d) FI    | 2.62±0.03 <sup>b</sup>    | 2.64±0.05 <sup>b</sup>   | 2.38±0.05 <sup>a</sup>    | 2.42±0.02 <sup>a</sup>    | 0.204                      | <0.001 | 0.657  |
| 饲料系数 FCR        | 1.06±0.05 <sup>b</sup>    | 1.01±0.02 <sup>b</sup>   | 0.89±0.03 <sup>a</sup>    | 0.88±0.05 <sup>a</sup>    | 0.340                      | <0.001 | 0.409  |
| 存活率/% SR        | 100.00                    | 100.00                   | 100.00                    | 100.00                    |                            |        |        |

注：同行数据肩标不同字母表示组间差异显著( $P<0.05$ )，下同。

Notes: Values in the same row with different letter superscripts were significantly different between groups ( $P<0.05$ ), the same below.

饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加均显著提高全鱼粗蛋白、降低全鱼粗脂肪及肝脂和肝糖原含量 ( $P<0.05$ )，而对全鱼粗灰分含量没有影响。且二者之间的交互作用对全鱼粗脂肪、肝脂和肝糖原含量均有显著的影响 ( $P<0.05$ ) (表 4)。

2.2 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈血清生化指标的影响

饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加显著降低血清 GLU、TC、TG 含量及 ALT 和 AST 活性 ( $P<0.05$ ) (表 5)。此外，胆汁酸与牛磺酸对血

表 4 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈体组成的影响

Tab. 4 Effects of bile acid and taurine on body composition of *M. salmoides*

| 项目<br>items |                   | 对照<br>control           | BA                      | Tau                     | BA+Tau                  | Two-Way ANOVA ( <i>P</i> ) |        |        |
|-------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|--------|--------|
|             |                   |                         |                         |                         |                         | BA                         | Tau    | BA×Tau |
| 体成分         | body composition  |                         |                         |                         |                         |                            |        |        |
| 水分/%        | moisture          | 68.56±0.28              | 68.44±1.05              | 68.93±1.37              | 68.00±1.22              | 0.417                      | 0.960  | 0.528  |
| 粗蛋白/%       | crude protein     | 15.40±0.19 <sup>a</sup> | 16.53±0.45 <sup>b</sup> | 16.60±0.18 <sup>b</sup> | 16.04±0.29 <sup>b</sup> | 0.002                      | 0.423  | 0.079  |
| 粗脂肪/%       | crude lipid       | 9.78±0.09 <sup>b</sup>  | 8.93±0.13 <sup>a</sup>  | 8.96±0.31 <sup>a</sup>  | 9.19±0.13 <sup>a</sup>  | 0.020                      | 0.031  | 0.001  |
| 粗灰分/%       | crude ash         | 4.43±0.09               | 4.38±0.24               | 4.33±0.10               | 4.14±0.12               | 0.208                      | 0.087  | 0.473  |
| 肝脏成分        | liver composition |                         |                         |                         |                         |                            |        |        |
| 肝脏脂肪/%      | liver lipid       | 6.74±0.27 <sup>c</sup>  | 4.39±0.18 <sup>b</sup>  | 4.12±0.57 <sup>b</sup>  | 3.48±0.42 <sup>a</sup>  | <0.001                     | <0.001 | 0.005  |
| 肝糖原/(mg/g)  | liver glycogen    | 52.35±3.27 <sup>b</sup> | 36.26±2.17 <sup>a</sup> | 38.09±2.53 <sup>a</sup> | 34.75±1.92 <sup>a</sup> | 0.007                      | 0.031  | 0.043  |

表 5 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈血清生化指标的影响

Tab. 5 Effects of bile acids and taurine on serum biochemical indexes of *M. salmoides*

| 项目<br>items      | 对照<br>control          | BA                     | Tau                    | BA+Tau                  | Two-Way ANOVA ( <i>P</i> ) |       |        |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|-------|--------|
|                  |                        |                        |                        |                         | BA                         | Tau   | BA×Tau |
| 葡萄糖/(mmol/L) GLU | 2.10±0.26 <sup>c</sup> | 1.40±0.32 <sup>a</sup> | 1.70±0.21 <sup>b</sup> | 1.48±0.21 <sup>a</sup>  | <0.001                     | 0.583 | 0.190  |
| 总胆固醇/(mmol/L) TC | 8.86±0.45 <sup>b</sup> | 7.64±0.59 <sup>a</sup> | 7.72±1.02 <sup>a</sup> | 7.22±0.39 <sup>a</sup>  | 0.005                      | 0.008 | 0.193  |
| 甘油三酯/(mmol/L) TG | 2.22±0.17 <sup>c</sup> | 1.50±0.45 <sup>a</sup> | 1.91±0.13 <sup>b</sup> | 1.74±0.14 <sup>ab</sup> | <0.001                     | 0.733 | 0.019  |
| 谷丙转氨酶/(U/L) ALT  | 1.76±0.10 <sup>b</sup> | 1.39±0.17 <sup>a</sup> | 1.28±0.31 <sup>a</sup> | 1.35±0.30 <sup>a</sup>  | 0.065                      | 0.010 | 0.075  |
| 谷草转氨酶/(U/L) AST  | 8.46±0.49 <sup>b</sup> | 5.72±0.65 <sup>a</sup> | 6.07±0.79 <sup>a</sup> | 5.90±0.61 <sup>a</sup>  | <0.001                     | 0.001 | <0.001 |

清 TG 含量和 AST 活性存在交互影响 ( $P<0.05$ )。

2.3 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肝脏健康的影响

饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加均显著提高肝脏 SOD、CAT 和 GSH-Px 活性、降低 MDA 含量 ( $P<0.05$ )。且 SOD 和 GSH-Px 活性均受饲料牛磺酸和胆汁酸二者之间交互作用的影响 ( $P<0.05$ )(图 1)。

饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加均显

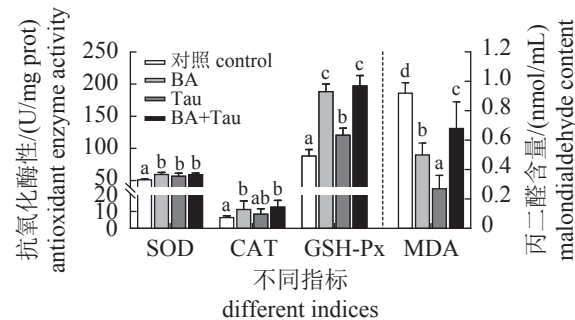


图 1 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肝脏抗氧化指标的影响

Fig. 1 Effects of bile acids and taurine on liver antioxidant index of *M. salmoides*

著提高肝脏抗炎细胞因子 *il-10*、*tgf- $\beta$*  的相对表达水平、降低促炎细胞因子 *il-1 $\beta$*  的相对表达水平 ( $P<0.05$ )，而不影响促炎细胞因子 *il-8* 和 *tnf- $\alpha$*  的相对表达水平 ( $P>0.05$ )(图 2)。且胆汁酸与牛磺酸二者对基因 *il-10* 和 *il-1 $\beta$*  的相对表达水平存在交互影响 ( $P<0.05$ )。观察发现，各实验组肝脏外观饱满，但对照组肝脏颜色发黄(图版)。从组织切片可观察到 BA、Tau 和 BA+T 组肝细胞体积正常、排列整齐、界线明显，细胞核更为清晰，空泡率较低。

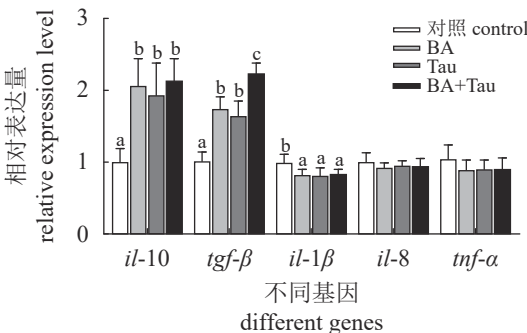
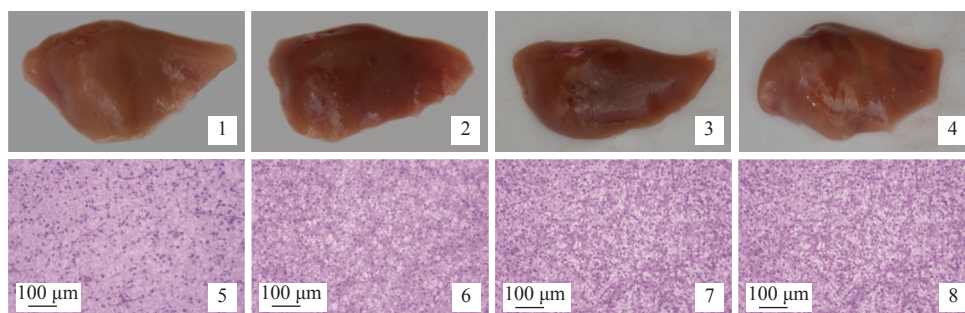


图 2 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肝脏免疫基因表达水平的影响

Fig. 2 Effects of bile acid and taurine on liver immune genes expression in *M. salmoides*



图版 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肝脏组织形态学的影响

1. 对照组肝脏外观, 2. BA 组肝脏外观, 3. Tau 组肝脏外观, 4. BA+Tau 组肝脏外观, 5. 对照组肝脏切片, 6. BA 组肝脏切片, 7. Tau 组肝脏切片, 8. BA+Tau 组肝脏切片。

#### Plate Effect of bile acids and taurine on liver morphology of *M. salmoides* (×200, H. E)

1. control group liver appearance, 2. BA group liver appearance, 3. Tau group liver appearance, 4. BA+T group liver appearance, 5. control group liver section, 6. BA group liver section, 7. Tau group liver section, 8. BA+Tau group liver section.

### 2.4 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肝脏糖脂代谢的影响

饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加均显著提高糖酵解基因 *gck*、*pklr* 和糖原分解基因 *pygl* 的相对表达水平、降低糖异生基因 *pck1* 的相对表达水平 ( $P<0.05$ ), 而不影响糖代谢基因 *gys2*、*g6pc1a* 和 *pfkla* 的相对表达水平 ( $P>0.05$ )。且胆汁酸与牛磺酸对基因 *gck* 的相对表达水平存在交互作用 ( $P<0.05$ )(图 3)。

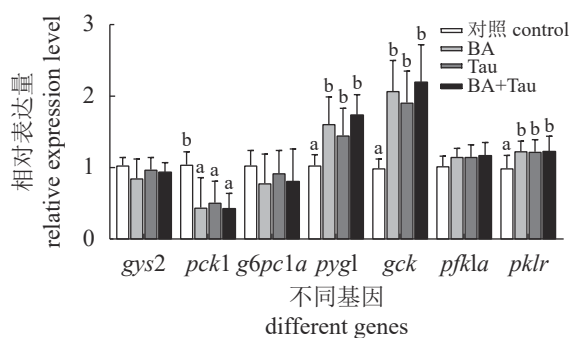


图 3 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肝脏糖代谢基因表达水平的影响

Fig. 3 Effects of bile acid and taurine on expression levels of liver glucose metabolism genes in *M. salmoides*

饲料中添加胆汁酸或牛磺酸还显著提高脂肪分解基因 *cpt1* 的相对表达水平、降低脂肪合成基因 *acaca* 的相对表达水平 ( $P<0.05$ ), 而不影响脂代谢基因 *srebp1* 和 *ppar-α* 的相对表达水平 ( $P>0.05$ )(图 4)。且二者之间的交互作用对基因 *cpt1* 和 *acaca* 的相对表达水平有显著影响 ( $P<0.05$ )。

### 2.5 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肠道健康的影响

饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加均显

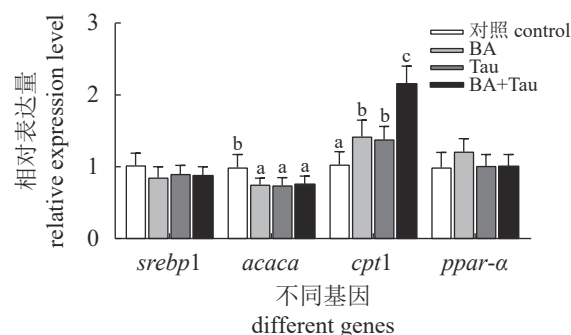


图 4 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肝脏脂代谢基因表达水平的影响

Fig. 4 Effects of bile acid and taurine on expression levels of liver lipid metabolism genes in *M. salmoides*

著提高肠道 SOD、CAT 和 GSH-Px 活性、降低 MDA 含量 ( $P<0.05$ ), 且二者对 MDA 含量存在交互影响 ( $P<0.05$ )(图 5)。此外, 饲料中胆汁酸、牛磺酸单独或联合添加均显著降低肠道促炎细胞因子 *il-1β*、*il-8* 和 *tnf-α* 的相对表达水平, 而二者组

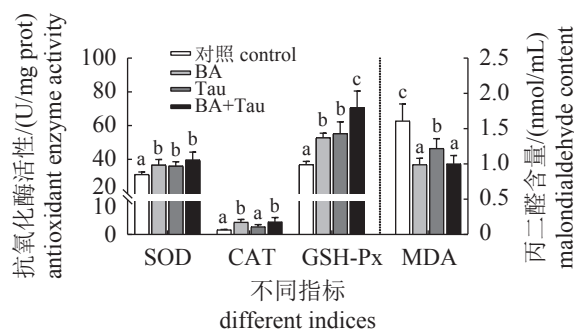


图 5 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肠道抗氧化指标的影响

Fig. 5 Effects of bile acid and taurine on intestinal antioxidant index of *M. salmoides*

合提高抗炎细胞因子 *il-10*、*tgf- $\beta$*  的相对表达水平 ( $P<0.05$ )。且二者对 *il-1 $\beta$*  和 *il-8* 的相对表达水平存在交互影响 ( $P<0.05$ ) (图 6)。

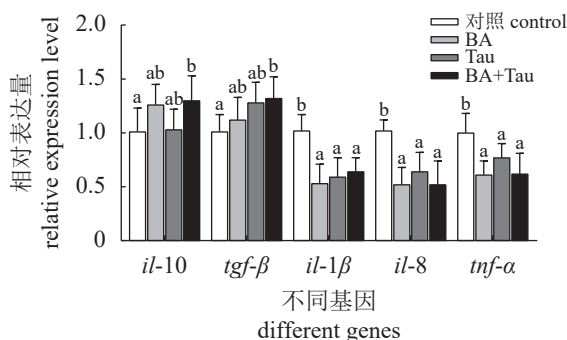


图 6 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肠道免疫基因的影响

Fig. 6 Effects of bile acid and taurine on intestinal immune genes of *M. salmoides*

饲料中单独或联合添加胆汁酸和牛磺酸均显著提肠道紧密连接蛋白基因 *zo-1* 的相对表达水平, 二者配伍显著提高基因 *claudin-1*、*occludin-1* 的相对表达水平 ( $P<0.05$ ), 而胆汁酸组对 *claudin-1*、*occludin-1* 基因的相对表达水平无显著影响。饲料中添加胆汁酸和牛磺酸对基因 *claudin-1* 和 *zo-1* 的相对表达水平有交互作用 ( $P<0.05$ ) (图 7)。此外, 饲料中添加胆汁酸显著降低血清 DAO 活性和 *D-Lac* 含量 ( $P<0.05$ ), 而牛磺酸单独或二者联合添加均不影响血清 DAO 活性和 *D-Lac* 含量 (图 8)。

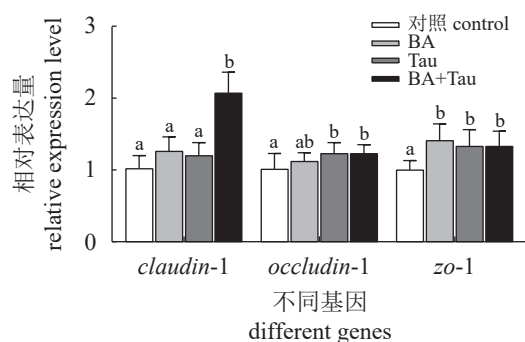


图 7 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肠道紧密连接蛋白基因表达水平的影响

Fig. 7 Effect of bile acid and taurine on intestinal tight junction protein gene expression of *M. salmoides*

### 3 讨论

本实验结果表明, 饲料中添加胆汁酸显著促进大口黑鲈生长。在前期研究中发现, 高淀粉水

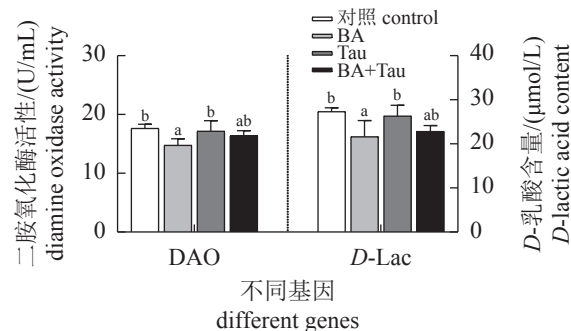


图 8 胆汁酸和牛磺酸对大口黑鲈肠道通透性的影响

Fig. 8 Effects of bile acid and taurine on intestinal permeability of *M. salmoides*

平饲料中添加胆汁酸可以改善大口黑鲈的生长性能<sup>[1]</sup>; 同样在高脂饲料中添加胆汁酸也改善了大口黑鲈的生长性能<sup>[10]</sup>; 此外饲料中添加脱氧胆酸钠<sup>[11]</sup>或混合型胆汁酸<sup>[12]</sup>均可提高大口黑鲈终末体重; 在草鱼<sup>[13]</sup>、尼罗罗非鱼<sup>[14]</sup>饲料中添加胆汁酸可以改善植物蛋白的利用。以上结果显示, 外源胆汁酸补充能够有效促进鱼类的生长而不受饲料配方、鱼种及胆汁酸剂型的影响。在饲料中添加牛磺酸后, 大口黑鲈 FI 和 FCR 水平显著下降, 而 WGR 和 SGR 水平显著提高, 说明添加牛磺酸可显著提高大口黑鲈的生长性能。同时牛磺酸能够提高蛋白质效率, 减少蛋白质作为能源物质损耗<sup>[15]</sup>。这与在饲料中添加一定量的牛磺酸对斜带石斑鱼 (*Epinephelus coioides*)<sup>[4]</sup>、花鲈 (*Lateolabrax maculatus*)<sup>[16]</sup>、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[17]</sup>、杂交鳢 (*Channa maculata* × *Channa argus*)<sup>[18]</sup> 生长的影响是一致的。牛磺酸还可刺激鱼类采食感受器, 增强摄食效率, 这充分解释了大口黑鲈 FI 水平显著下降而生长性能显著提高的原因, 这一结论在杂交鳢<sup>[17]</sup>和大菱鲆<sup>[19]</sup>等鱼中得到验证。但也有研究认为适宜的牛磺酸有利于动物的摄食, 而过量添加牛磺酸在一定程度上会抑制其摄食和生长<sup>[16,20]</sup>。这可能与牛磺酸的添加剂量有关, 牛磺酸在大口黑鲈饲料中的最适添加量还需要进一步研究。在本研究中, 胆汁酸和牛磺酸及其组合使用能有效改善大口黑鲈生长性能。

目前实验也发现, 饲料中牛磺酸、胆汁酸单独或组合添加均显著提高大口黑鲈的粗蛋白质含量, 同时降低粗脂肪含量。在大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)<sup>[21]</sup>上也发现添加胆汁酸能显著降低全鱼粗脂肪含量、提高粗蛋白含量, 表明胆汁酸能促进脂肪分解供能而节约饲料蛋白质, 从而提高鱼体蛋白沉积, 促进鱼类生长。同样在斜带石斑

鱼<sup>[4]</sup>和花鲈<sup>[16]</sup>上也发现, 饲料中添加牛磺酸显著提高体蛋白含量、降低体脂含量, 与本研究结果一致。饲料中添加牛磺酸可提高大口黑鲈体蛋白含量, 原因可能是补充牛磺酸从而减少体内牛磺酸的合成, 促进含硫氨基酸更多地参与蛋白质合成代谢, 进而促进机体蛋白沉积<sup>[22]</sup>; 降低鱼体脂肪含量是因为牛磺酸参与结合型胆汁酸的合成, 还能提高限速酶胆固醇 7 $\alpha$ -羧化酶 (CYP7A1) 的活性<sup>[19]</sup>, 产生降脂效应, 从而减少体脂沉积。也有研究显示, 牛磺酸能够改善肉鸡胸肌的肉品质<sup>[23]</sup>。众所周知, 牛磺酸可与胆酸结合形成牛磺胆酸或牛磺鹅脱氧胆酸等结合型胆汁酸, 通过乳化作用, 促进脂肪消化吸收, 这可能是牛磺酸与胆汁酸组合对大口黑鲈体蛋白和体脂含量产生交互作用的原因, 其机制仍需进一步研究。

血液生化指标是评价鱼体健康水平和营养状况的重要指标<sup>[24]</sup>。本实验结果发现, 饲料中牛磺酸、胆汁酸单独或组合添加均显著降低血清 AST 和 ALT 活性, 表明牛磺酸和胆汁酸能够改善肝脏功能, 具有保护肝脏的作用。血清中 GLU、TC、TG 含量降低, 则说明牛磺酸和胆汁酸能够降低大口黑鲈血糖, 促进脂肪代谢, 这与在大菱鲆<sup>[25]</sup>、大口黑鲈<sup>[26]</sup>上的研究结果一致。胆汁酸组、牛磺酸组以及二者配伍组肝脏糖原分解基因 *pygl* 和糖酵解基因 *gck* 表达水平显著升高, 而糖异生基因 *pck1* 表达水平显著降低, 表明添加胆汁酸和牛磺酸改善了大口黑鲈的糖代谢, 促进血糖分解, 进而降低血糖和肝糖原含量。胆汁酸与牛磺酸结合形成结合型胆汁酸, 而结合型胆汁酸对葡萄糖稳态具有有益作用<sup>[25]</sup>。本研究中大口黑鲈血清 GLU 含量受牛磺酸和胆汁酸二者之间交互作用的影响, 进一步验证了以上观点。此外, 胆汁酸组和牛磺酸组肝脏脂肪分解基因 *cpt1* 表达水平也显著升高, 而脂肪合成基因 *acaca* 表达水平显著降低, 这表明胆汁酸和牛磺酸均可调节脂肪代谢, 促进甘油三酯的水解, 进而降低血清 TG 含量和鱼体肝脏脂肪沉积, 且在肝脂和血清 TG 含量上牛磺酸和胆汁酸存在显著的交互作用。本研究结果显示, 饲料中添加牛磺酸和胆汁酸后, 肝脏组织脂泡数量减少, 空泡化明显改善, 脂肪蓄积情况改善, 进一步佐证了以上结论。可见, 牛磺酸和胆汁酸对大口黑鲈的糖脂代谢机能具有一定调节作用。

氧化反应不仅会影响动物的健康, 还会降低肉的营养价值。体内过量的 ROS 会破坏蛋白质、

核酸等生物大分子, 增加脂质过氧化程度, 产生大量 MDA, 危及动物的健康生长。已有研究表明, 高淀粉水平饲料中添加胆汁酸可以改善大口黑鲈肝脏的抗氧化能力 (SOD 和 CAT 升高, MDA 降低)<sup>[1]</sup>, 高脂饲料中添加胆汁酸同样可以改善大口黑鲈<sup>[10]</sup>、大黄鱼<sup>[27]</sup>的抗氧化能力。类似的结果在哺乳动物<sup>[2,28]</sup>上也有报道。饲料中添加牛磺酸同样能提高花鲈<sup>[16]</sup>、杂交鳢<sup>[18]</sup>和虹鳟<sup>[22]</sup>的抗氧化能力。这与本研究结果相似, 饲料中添加牛磺酸和胆汁酸均能显著提高大口黑鲈肝脏 SOD、CAT 和 GSH-Px 活性, 降低 MDA 含量, 且胆汁酸与牛磺酸二者对 SOD 和 GSH-Px 活性有交互影响, 表明胆汁酸与牛磺酸配伍能够提高肝脏抗氧化能力。牛磺酸不仅是 GSH-Px 的前体, 还可以促进谷胱甘肽二硫化物生成 GSH-Px<sup>[29]</sup>。可见, 牛磺酸通过增强抗氧化酶活性发挥其抗氧化功能<sup>[30]</sup>。韩红丽等<sup>[23]</sup>研究发现, 在日粮中添加牛磺酸可改善肉鸡胸肌的肉品质和抗氧化功能。以上结果表明, 饲料中添加胆汁酸或牛磺酸降低了大口黑鲈的各种应激反应, 抑制了肝脏脂质和糖原积累, 减轻了肝脏的负担, 胆汁酸对养殖鱼类肉品质的改善作用还需进一步探讨。

肠道健康是鱼类消化和吸收营养物质的重要保障。研究表明, 饲料中补充牛磺酸或胆汁酸可以通过影响肠道菌群组成<sup>[11,26]</sup>、肠道形态结构<sup>[10,26]</sup>、肠道消化酶活性<sup>[14,16]</sup>等途径改善鱼类的肠道功能。本研究结果显示, 饲料中单独或联合添加胆汁酸、牛磺酸均显著提高大口黑鲈肠道抗氧化酶 (SOD、CAT、GSH-Px) 活性、降低脂质过氧化物 (MDA) 含量, 表明胆汁酸和牛磺酸可以提升抗氧化能力, 缓解脂质过氧化物对机体的氧化损伤。同时, 饲料中添加牛磺酸或胆汁酸可以上调肠道抗炎细胞因子 (*il-10*、*tgf- $\beta$* ) 相对表达量降低促炎细胞因子 (*il-1 $\beta$* 、*il-8*、*tnf- $\alpha$* ) 相对表达量, 这说明饲料中添加牛磺酸和胆汁酸对大口黑鲈的肠道免疫有积极作用。由此推测, 饲料中添加牛磺酸或胆汁酸改善大口黑鲈肠道健康可能是通过调控抗氧化酶, 减少肠道的炎症反应来实现的。本研究也发现, 饲料中添加牛磺酸或胆汁酸可以上调肠道紧密连接蛋白基因 (*zo-1*、*claudin-1*) 的表达, 降低血清 DAO 活性和 D-Lac 含量, 这进一步证实饲料中添加牛磺酸和胆汁酸可以提高大口黑鲈肠道的抗氧化能力和免疫能力, 进而增强肠道屏障功能<sup>[31]</sup>。

在本实验条件下, 饲料中单独或组合添加胆

汁酸和牛磺酸均不同程度改善大口黑鲈的生长性能, 还会提高鱼体的抗氧化能力和免疫力, 调节糖脂代谢, 增强肠道屏障的保护功能, 进而改善大口黑鲈的肝脏和肠道健康。同时发现胆汁酸与牛磺酸组合对部分参数(如生长、血清生化指标、抗氧化酶、免疫指标等)存在交互作用, 因胆汁酸和牛磺酸的作用效果存在剂量效应, 所以二者的协同或累加效应仍需进一步研究, 确定其适宜的剂量协同效应和具体调控机制。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

### 参考文献 (References):

- [1] Guo J L, Kuang W M, Zhong Y F, *et al.* Effects of supplemental dietary bile acids on growth, liver function and immunity of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed high-starch diet[J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2020, 97: 602-607.
- [2] 陈张华, 王亚超, 张玲, 等. 胆汁酸对断奶仔猪生长性能、免疫功能和抗氧化能力的影响[J]. *动物营养学报*, 2024, 36(2): 823-832.  
Chen Z H, Wang Y C, Zhang L, *et al.* Effects of bile acid on growth performance, immune function and antioxidant capacity of weaned piglets [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(2): 823-832 (in Chinese).
- [3] 左旭冬, 王桢璐, 慈晓通, 等. 饲料中添加鹅脱氧胆酸对种鸡脂代谢、生产性能及子代肌肉发育的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(8): 2589-2598.  
Zuo X D, Wang Z L, Ci X T, *et al.* Effects of dietary chenodeoxycholic acid on lipid metabolism and performance of breeding hens and muscle development of their offspring[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(8): 2589-2598 (in Chinese).
- [4] 王彦飞, 周铭文, 李家旭, 等. 饲料牛磺酸含量对斜带石斑鱼幼鱼生长性能、体成分、*TauT* mRNA 表达量及牛磺酸合成关键酶活性的影响[J]. *水产学报*, 2019, 43(4): 1116-1125.  
Wang Y F, Zhou M W, Li J X, *et al.* Effects of dietary taurine content on growth performance, body composition, expression of taurine transporter (*TauT*) mRNA and key enzyme activities of taurine synthesis in juvenile grouper (*Epinephelus coioides*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 1116-1125 (in Chinese).
- [5] Han H L, Zhang J F, Yan E F, *et al.* Effects of taurine on growth performance, antioxidant capacity, and lipid metabolism in broiler chickens[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(11): 5707-5717.
- [6] Murakami S, Fujita M, Nakamura M, *et al.* Taurine ameliorates cholesterol metabolism by stimulating bile acid production in high - cholesterol - fed rats[J]. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 2016, 43(3): 372-378.
- [7] Kusaczuk M. Tauroursodeoxycholate-bile acid with chaperoning activity: molecular and cellular effects and therapeutic perspectives[J]. *Cells*, 2019, 8(12): 1471.
- [8] Jiao N A, Baker S S, Chapa-Rodriguez A, *et al.* Suppressed hepatic bile acid signaling despite elevated production of primary and secondary bile acids in NAFLD[J]. *Gut*, 2018, 67(10): 1881-1891.
- [9] Alzawqari M H, Al-Baadani H H, Alhidary I B, *et al.* Effect of taurine and bile acid supplementation and their interaction on performance, serum components, ileal viscosity and carcass characteristics of broiler chickens[J]. *South African Journal of Animal Science*, 2016, 46(4): 448-457.
- [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 largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Aquaculture*, 2021, 531: 735864.
- [11] 周楠楠, 丁斐斐, 张乐, 等. 饲料中添加脱氧胆酸钠对大口黑鲈生长、糖代谢及肠道菌群的影响[J]. *水产学报*, 2021, 45(10): 1740-1752.  
Zhou N N, Ding F F, Zhang L, *et al.* Effects of dietary sodium deoxycholate on the growth, glucose metabolism and intestinal microbiota of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(10): 1740-1752 (in Chinese).
- [12] Yu H H, Zhang L L, Chen P, *et al.* Dietary bile acids enhance growth, and alleviate hepatic fibrosis induced by a high starch diet via AKT/FOXO1 and cAMP/AMPK/SREBP1 pathway in *Micropterus salmoides*[J]. *Frontiers in Physiology*, 2019, 10: 1430.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Wu Y B, Ma H J, Wang X J, *et al.* Taurine supplementation increases the potential of fishmeal replacement by soybean meal in diets for largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. *Aquaculture nutrition*, 2021, 27: 691-699 (in Chinese).
- [16] 虞为, 杨育凯, 林黑着, 等. 牛磺酸对花鲈生长性能、

- 消化酶活性、抗氧化能力及免疫指标的影响[J]. 南方水产科学, 2021, 17(2): 78-86.
- Yu W, Yang Y K, Lin H Z, *et al.* Effects of taurine on growth performance, digestive enzymes, antioxidant capacity and immune indices of *Lateolabrax maculatus*[J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(2): 78-86 (in Chinese).
- [17] Li M, Lai H, Li Q, *et al.* Effects of dietary taurine on growth, immunity and hyperammonemia in juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* fed all-plant protein diets[J]. *Aquaculture*, 2016, 450: 349-355.
- [18] 李培佳, 吕旦, 李敏, 等. 高碳水化合物饲料添加牛磺酸对杂交鳢生长性能、肝脏糖代谢相关基因表达、抗氧化活性及免疫应答的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(11): 7320-7334.
- Li P J, Lv D, Li M, *et al.* Effects of taurine supplementation in high carbohydrate diet on growth performance, gene expression related to liver glucose metabolism, and antioxidant activity and immune response of hybrid snakehead[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(11): 7320-7334 (in Chinese).
- [19] Yun B, Ai Q H, Mai K S, *et al.* Synergistic effects of dietary cholesterol and taurine on growth performance and cholesterol metabolism in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) fed high plant protein diets[J]. *Aquaculture*, 2012, 324: 85-91.
- [20] Qi G, Ai Q, Mai K, *et al.* Effects of dietary taurine supplementation to a casein-based diet on growth performance and taurine distribution in two sizes of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.)[J]. *Aquaculture*, 2012, 358: 122-128.
- [21] 孙建珍, 王际英, 马晶晶, 等. 不同脂肪水平下添加胆汁酸对大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 幼鱼生长、体组成和脂肪代谢的影响[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(3): 617-625.
- Sun J Z, Wang J Y, Ma J J, *et al.* Effects of dietary bile acids on growth, body composition and lipid metabolism of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) at different lipid levels [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(3): 617-625 (in Chinese).
- [22] 徐奇友, 许红, 郑秋珊, 等. 牛磺酸对虹鳟仔鱼生长、体成分和免疫指标的影响[J]. 动物营养学报, 2007, 19(5): 544-548.
- Xu Q Y, Xu H, Zheng Q S, *et al.* Effects of taurine on growth, body composition and immunity of rainbow trout juvenile[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2007, 19(5): 544-548 (in Chinese).
- [23] 韩红丽, 张婧菲, 沈明明, 等. 牛磺酸对肉鸡生长性能、肉品质及肌肉抗氧化功能的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 17-22.
- Han H L, Zhang J F, Shen M M, *et al.* Effect of taurine on growth performance, meat quality and muscle antioxidant function in broilers[J]. *Food Science*, 2020, 41(17): 17-22 (in Chinese).
- [24] 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.
- [25] Zhang Y, Wei Z, Liu G, *et al.* Synergistic effects of dietary carbohydrate and taurine on growth performance, digestive enzyme activities and glucose metabolism in juvenile turbot *Scophthalmus maximus* L.[J]. *Aquaculture*, 2019, 499: 32-41.
- [26] 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).
- [27] Ding T, Xu N, Liu Y, *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.
- [28] Kullak-Ublick G A, Bruno S, Meier P J, 2004. Enterohepatic bile salt transporters in normal physiology and liver disease[J]. *Gastroenterology*, 2004, 126: 322-342.
- [29] Bañuelosvargas I, López L, Pérezjiménez A, *et al.* Effect of fish meal replacement by soy protein concentrate with taurine supplementation on hepatic intermediary metabolism and antioxidant status of totoaba juveniles (*Totoaba macdonaldi*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology B*, 2014, 170: 18-25.
- [30] Salze G P, Davis D A. Taurine: a critical nutrient for future fish feeds[J]. *Aquaculture*, 2015, 437: 215-229.
- [31] 吴佳瑄, 廖瑞生, 况文明, 等. 国产鸡肉粉替代鱼粉对大口黑鲈生长性能、肝脏健康及肠道屏障的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(10): 109605.
- Wu J X, Liao R S, Kuang W M, *et al.* Effects of replacing fish meal with domestic poultry by-product meal on growth, liver health and intestinal barrier of *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(10): 109605 (in Chinese).

## Synergistic effects of dietary bile acid and taurine on growth performance, liver health and intestinal barrier of *Micropterus salmoides*

HUANG Jia<sup>1</sup>, RAN Xudong<sup>1</sup>, LIU Xinping<sup>1</sup>, HU Wei<sup>2</sup>, TANG Renjun<sup>3</sup>,  
ZHENG Juan<sup>3</sup>, CHEN Yongjun<sup>1</sup>, HE Yuanfa<sup>1</sup>, LIN Shimei<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, College of Fisheries,  
Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. Changshou District Agriculture and Rural Affairs Commission, Chongqing 401220, China;

3. Liangpin District Agriculture and Rural Affairs Commission, Chongqing 400020, China)

**Abstract:** *Micropterus salmoides* is a significant species in China's aquaculture industry, offering considerable economic benefits. Diet and nutrition are crucial for addressing various issues in the aquaculture of *M. salmoides*, including growth, health and disease resistance. Bile acids and taurine are bioactive substances that participate in various biological and physiological processes in animals. To investigate the synergistic effects of bile acid and taurine in the *M. salmoides* diets, four isonitrogenous (46%) and isobaric (10%) experimental diets were designed respectively by adding 0.03% bile acid (BA), 0.5% taurine (Tau), and 0.03% bile acid + 0.5% taurine (BA + Tau) to the basal diet. *M. salmoides*, with an initial weight of (15.33±0.23) g, were reared in an indoor recirculating system for 8 weeks. The result indicated that the growth performance of *M. salmoides* significantly improved with the addition of bile acid and taurine, whether used separately or combined, while also reducing serum glucose (GLU), triglycerides (TG) and cholesterol (TC) levels, and activities of alanine aminotransferase (ALT) and aspartate aminotransferase (AST). Compared with the control group, the experimental group exhibited a significant increase in liver antioxidant enzyme activities—superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and glutathione peroxidase (GSH-Px)—and a decreased malondialdehyde (MDA) levels. Additionally, mRNA expression of lycometabolic genes (*gck*, *pkfr*, *pygl*, *pck1*) and lipid metabolism genes (*cpt1*, *acaca*) in liver was regulated. Additionally, it decreased liver lipid and glycogen content and notably enhanced the hepatic histomorphological structure. It significantly increased the activity of intestinal antioxidant enzymes (SOD, CAT, GSH-Px) and reduced the relative expression levels of intestinal pro-inflammatory cytokines (*IL-1β*, *IL-8*, and *TNF-α*). Furthermore, it elevated the relative expression level of the intestinal tight junction protein gene *zo-1*, and the bile acid and taurine combination notably upregulated *claudin-1* and *occludin-1*. Moreover, the content of *D*-lactic acid (*D*-lac) and diamine oxidase (DAO) activity in serum in the bile acid group were significantly lower than those in control group (basal diet). In conclusion, supplementing feed with bile acid and taurine, either individually or in combination, enhances liver and intestinal antioxidant capacity, modulates glycolipid metabolism, boosts immune function, and fosters the growth of *M. salmoides*. The combination of bile acids and taurine exerts a synergistic effect on *M. salmoides*.

**Key words:** *Micropterus salmoides*; bile acid; taurine; liver health; intestinal barrier

**Corresponding author:** LIN Shimei. E-mail: [linsm198@163.com](mailto:linsm198@163.com)

**Funding projects:** Chongqing Modern Agricultural Industry Technology System (CQMAITS202315); Chongqing Fishery Technology Innovation Union (CQFTIU2024)