

DOI: 10.11964/jfc.20240514549

# 牛磺酸对大口黑鲈生长、糖脂代谢和抗氧化能力的影响



边延欣<sup>1</sup>, 谢凯<sup>1</sup>, 蔡明浪<sup>1</sup>, 朱波<sup>1</sup>, 周锡勋<sup>2</sup>, 胡毅<sup>1\*</sup>,  
张俊智<sup>1\*</sup>

1. 湖南农业大学水产学院, 湖南长沙 410128; 2. 岳阳渔美康生物科技有限公司, 湖南岳阳 414100

## 摘要:

**【目的】**为了研究牛磺酸对大口黑鲈生长性能、肝脏糖脂代谢和抗氧化能力的影响。

**【方法】**实验设置 18% 木薯淀粉水平为高淀粉对照组 (CON), 在对照组基础上添加 0.05%、0.10% 牛磺酸 (T0.05、T0.1), 对初始体重为 (19.00±0.20) g 的大口黑鲈进行为期 8 周的网箱 (120 cm×80 cm×150 cm) 养殖实验, 每组 3 个重复, 每个重复 50 尾。

**【结果】**高淀粉饲料中添加牛磺酸后增重率和特定生长率显著上升, 肝脏粗脂肪和肝糖原含量显著下降, 且肠道淀粉酶活性显著升高。肝脏 H.E 染色、PAS 染色和油红 O 染色切片发现, 相比于 CON, 0.10% 牛磺酸组肝细胞结构完整, 糖原、脂肪滴减少。添加牛磺酸后大口黑鲈的血清葡萄糖、低密度脂蛋白、谷草转氨酶、谷丙转氨酶水平均显著降低, 而碱性磷酸酶与高密度脂蛋白显著升高。与 CON 相比, 牛磺酸组肝脏 G6Pase 活性显著下降, 而 GK、PK 活性显著升高, 同时 *pfk*、*gk*、*glut2* 表达上调。添加牛磺酸后肝脏脂质合成相关基因 *dgat1*、*lcr-1*、*srebp1*、*acc1a*、*fasn* 和 *gpat4* 表达下调, 同时脂肪分解相关基因 *hsl*、*mgl*、*ppara*、*lpl*、*atgl*、*acadm* 表达上调。与 CON 相比, 牛磺酸组的 *cat*、*sod*、*il-10* 和 *tgf-β* 基因表达上调, *nf-κb*、*il-8* 基因表达下调。

**【结论】**在高淀粉饲料中加入牛磺酸可以改善大口黑鲈的生长, 调节肝脏糖脂代谢, 提高碳水化合物利用, 减少肝脏糖原沉积和脂质积累, 提高抗氧化能力, 在本实验条件下推荐牛磺酸添加量为 0.10%。本研究可为牛磺酸在调控糖脂代谢方面提供理论依据, 同时为提高水产动物对碳水化合物的利用提供技术支撑。

**关键词:** 大口黑鲈; 牛磺酸; 高淀粉; 糖脂代谢; 抗氧化

大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 又称加州鲈, 是一种广温、肉食性淡水鱼类, 其生长快, 肉质鲜美, 经济价值高<sup>[1]</sup>。据渔业年鉴统计<sup>[2]</sup>, 2023 年我国鲈类产量达 88.80 万 t, 同比增长 10.66%。淀粉是水产动物碳水化合物主要来源, 也是饲料制作中关键的黏合剂和膨化剂。饲料中过低的淀粉会给浮性饲料的加工和饲料产品的质量带来极大挑

第一作者: 边延欣, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail :  
2639384809@qq.com



通信作者: 胡毅, 教授, 博士研究生导师, 湖南农业大学水产学院副院长、学术委员会主任, 水产学科带头人, 湖南水产体系池塘健康养殖岗位专家, 湖南省特色水产资源利用工程技术研究中心主任, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail : huyi740322@163.com:



张俊智, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: zhjun123@hunau.edu.cn

资助项目: 国家自然科学基金 (2019YFD0900200)

收稿日期: 2024-05-31

修回日期: 2024-09-25

文章编号:

1000-0615(2025)05-059613-14

中图分类号: S 965.199

文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)  
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



战<sup>[3]</sup>。而饲料中过高的淀粉会导致鱼类的生长下降, 并诱发肝脏氧化损伤以及炎症等问题, 损害鱼体健康<sup>[4-7]</sup>。大量研究表明大口黑鲈对碳水化合物耐受性差。饲料中可消化淀粉水平达到 15% 时会损害大口黑鲈的肠道健康, 降低免疫和抗氧化能力, 以及生长速率<sup>[8]</sup>, 当饲料中  $\alpha$ -淀粉达到 20% 时大口黑鲈的生长将受到抑制<sup>[9]</sup>。如何提高大口黑鲈对碳水化合物的利用, 降低其带来的负面影响是目前研究的热点。

牛磺酸 (taurine, 2-氨基乙基磺酸) 是一种条件必需氨基酸, 于 1827 年被德国科学家 Tiedemann 从牛胆汁中发现并分离出来<sup>[10]</sup>。牛磺酸具有胰岛素样结构, 能增强胰岛素敏感性, 降低胰岛素抵抗, 在哺乳动物中可用于治疗糖尿病, 另外还具有缓解炎症和细胞凋亡作用<sup>[11-12]</sup>。在水产动物的研究中发现, 饲料中添加牛磺酸可以提高高体鲮 (*Seriola dorsalis*)<sup>[13]</sup>、杂交条纹鲈 (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*)<sup>[14]</sup>、军曹鱼 (*Rachycentron canadum*)<sup>[15]</sup> 和塞内加尔鲷 (*Solea senegalensis*)<sup>[16]</sup> 的生长性能并增强其抗氧化能力。本实验室前期研究表明, 在低鱼粉饲料中添加牛磺酸可以促进青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)<sup>[17]</sup>、黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[18]</sup> 和黄鳝 (*Monopterus albus*)<sup>[19]</sup> 的生长, 增强其免疫和提高抗应激能力。然而, 在水产动物中关于牛磺酸调控糖脂代谢的报道较少。本研究以大口黑鲈为对象, 参照 Wu<sup>[20]</sup> 和 Zhang<sup>[17]</sup> 的研究, 设置 0.05% 和 0.10% 两个添加水平为实验组, 研究在高淀粉饲料中添加牛磺酸对大口黑鲈幼鱼的生长性能、糖脂代谢和抗氧化能力的影响, 以期牛磺酸在调控糖脂代谢方面提供理论依据, 同时为提高水产动物对碳水化合物的利用提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

本实验配制了 3 种等氮 (48.85% 粗蛋白) 等脂 (9.68% 粗脂肪) 的实验饲料, 以鱼粉、酶解鸡肉粉、大豆浓缩蛋白为主要蛋白源, 豆油为主要脂肪源。根据 Zhou 等<sup>[9]</sup> 和高彬等<sup>[21]</sup> 的研究结果, 设置添加 18% 木薯淀粉的实验饲料作为高淀粉组 (对照组 CON), 在高淀粉组基础上分别添加 0.05%、0.10% 的牛磺酸 (T0.05、T0.1),

饲料配方见表 1。实验原料经粉碎处理后过 60 目筛, 准确称重, 采用逐级稀释方法进行混合, 采用膨化制粒机 2.00 mm 模具制成浮水性膨化饲料, 膨化系数 1.5。自然风干至水分低于 8% 后喷油装袋, 置于 -20 °C 条件下保存直至使用。

### 1.2 饲养与管理

实验鱼苗购自广东省佛山市九江镇苗种厂, 养殖试验在湖南省常德市鼎城区网箱实验基地的池塘网箱 (120 cm × 80 cm × 150 cm) 中进行。正式实验开始前, 将鱼苗驯化 2 周, 每日用商品饲料投喂 2 次 (粗蛋白 ≥ 47%, 粗脂肪 ≥ 5%), 正式养殖实验开始前, 禁饲 24 h, 挑选健康、规格均匀的鱼苗 450 条 [初始体重为 (19.00 ± 0.20) g], 用 0.3% 食盐溶液浸泡 15 min 消毒后, 随机分为 3 个处理组, 每组 3 个重复, 每个重复 50 尾, 共 9 个实验网箱。每日 7:20、18:00 各投喂 1 次, 日投喂量为鱼体重的 3%~5%, 每 6 天重新估算 1 次鱼体增重量以调整日粮投喂量, 投喂周期为 8 周。实验期间, 水温维持在 26.5~29.5 °C, 溶解氧含量大于 6.8 mg/L, 亚硝酸盐小于 0.01 mg/L, 氨氮含量小于 0.45 mg/L, 养殖水 pH 为 7.1 左右。本实验获得湖南农业大学生物医学研究伦理委员会批准 (2024156), 实验参与人员严格遵守湖南农业大学伦理规范, 并按照湖南农业大学生物医学研究伦理委员会制定的规章制度执行。

### 1.3 样品采集

养殖实验结束后, 禁食 24 h, 对每个网箱大口黑鲈进行计数和称总重, 计算生长指标。每个网箱随机选取 3 条鱼冰冻保存, 用于常规体成分 (水分、粗蛋白、粗脂肪以及灰分) 的分析。每个网箱随机取 3 条鱼, 采用一次性注射器尾静脉取血, 分别装入 2 mL 无酶离心管中, 静止 4 h 后离心 (4 °C, 3 000 r/min, 10 min), 吸取上层血清, -80 °C 保存, 用于测定血清生理生化指标。同时记录大口黑鲈体长、体重, 解剖并分离内脏团和肝脏, 记录肝脏重、空壳重并计算形体指标。随机取 6 条鱼, 解剖分离肝脏置于 1.5 mL 无酶离心管中, -80 °C 保存, 用于抗氧化、炎症因子及糖脂代谢相关基因表达和酶活性的测定。最后每个网箱取 3 条鱼的肝脏组织 (约 1 cm<sup>3</sup>) 固定于 4% 甲醛中, 用于切

表 1 实验饲料配方及营养水平 (风干基础)

Tab. 1 Composition and nutrient levels of basic diet (air-dry basis)

%

项目 item	对照组(CON) control group	0.05%牛磺酸组(T0.05) 0.05% taurine group	0.10%牛磺酸组(T0.1) 0.10% taurine group
<b>原料 ingredient</b>			
鱼粉 fish meal	45.00	45.00	45.00
酶解鸡肉粉 enzymatic hydrolysis of chicken meal <sup>1)</sup>	10.00	10.00	10.00
大豆浓缩蛋白 soy protein concentrate	14.00	14.00	14.00
豆粕 soybean meal	4.00	4.00	4.00
木薯淀粉 tapioca starch <sup>2)</sup>	18.00	18.00	18.00
豆油 soybean oil	5.50	5.50	5.50
微晶纤维素 microcrystalline fiber	0.44	0.39	0.34
磷酸二氢钙 Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	1.50	1.50	1.50
氯化胆碱 choline chloride	0.50	0.50	0.50
抗氧化剂 antioxidant <sup>3)</sup>	0.05	0.05	0.05
维生素预混料 vitamin premix <sup>4)</sup>	0.15	0.15	0.15
矿物质预混料 mineral premix <sup>5)</sup>	0.50	0.50	0.50
VC vitamin C	0.05	0.05	0.05
膨润土 bentonite	0.30	0.30	0.30
防霉剂 mould inhibitor <sup>6)</sup>	0.01	0.01	0.01
牛磺酸 taurine <sup>7)</sup>	0.00	0.05	0.10
合计 total	100.00	100.00	100.00
<b>营养物质 proximate composition</b>			
粗蛋白 crude protein	47.30	47.47	47.85
粗脂肪 crude lipid	10.39	9.90	9.95
淀粉 starch	15.62	15.62	15.62
灰分 ash	11.38	11.51	11.58
牛磺酸 taurine	0.23	0.29	0.33

注: 1)系广州市信豚水产技术有限公司提供, 蛋白含量 $\geq 80\%$ ; 2)淀粉含量 $\geq 85\%$ ; 3)主要成分为乙氧基喹啉; 4)每千克含有维生素A 350 万 IU, 维生素D<sub>3</sub> 100 万IU, 维生素E 40 g, 维生素K<sub>3</sub> 4 g, 维生素B<sub>1</sub> 8 g, 维生素B<sub>2</sub> 8 g, 维生素B<sub>6</sub> 8 g, 维生素B<sub>12</sub> 15 mg, D-生物素 80 mg, 烟酰胺 30 g, D-泛酸钙 15 g, 叶酸 2.5 g, 肌醇 80 g, 维生素C 150 g; 5)每千克含有钾 42 g, 镁 8.3 g, 铁 15~30 g, 锌 3.5~7.0 g, 锰 2.3~4.6 g, 铜 0.81~1.62 g, 钴 0.21~0.42 g, 碘 0.11~0.22 g, 硒 0.02~0.04 g; 6)主要成分为丙酸钙; 7)纯度 $\geq 98\%$ , 购于上海源叶生物科技有限公司。

Notes: 1) launched by Guangzhou Sintun Aqua-Tech Co., Ltd., protein content $\geq 80\%$ ; 2) starch content $\geq 85\%$ ; 3) main component is ethoxyquinoline; 4) per kg contains VA 3.5 million IU, VD<sub>3</sub> 1 million IU, VE 40 g, VK<sub>3</sub> 4 g, VB<sub>1</sub> 8 g, VB<sub>2</sub> 8 g, VB<sub>6</sub> 8 g, VB<sub>12</sub> 15 mg, D-biotin 80 mg, niacinamide 30 g, D-calcium pantothenate 15 g, folic acid 2.5 g, inositol 80 g, VC 150 g; 5) per kg contains: K 42 g, Mg 8.3 g, Fe 15-30 g, Zn 3.5-7.0 g, Mn 2.3-4.6 g, Cu 0.81-1.62 g, Co 0.21-0.42 g, I<sub>2</sub> 0.11-0.22 g, Se 0.02-0.04 g; 6) main component is calcium propionate; 7) purity $\geq 98\%$ , purchased by Shanghai Yuanye Bio-Technology Co., Ltd. (Shanghai, China).

片制作和苏木精&伊红 (H.E) 染色、过碘酸雪夫氏 (PAS) 染色和油红 O 染色, 观察肝脏组织形态、糖原和脂滴蓄积程度。

#### 1.4 生长性能检测指标与方法

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

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

饲料转化率 (FCR)= $F/(W_t - W_0)$ ;

脏器比 (VSI, %)= $W_n/W \times 100\%$ ;

肝体比 (HSI, %)= $W_h/W \times 100\%$ ;

肥满度 (CF, g/cm<sup>3</sup>)= $W/L^3 \times 100$ ;

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

式中,  $W_0$  和  $W_t$  分别为单个网箱初始鱼体重和终末鱼体重 (g);  $t$  为养殖实验天数 (d);  $F$  为摄食量 (g);  $W$  为单个鱼体重 (g);  $W_n$  为单个鱼内脏团重 (g);  $W_h$  为单个鱼肝脏重 (g);  $L$  为单个鱼体长 (cm);  $N_0$  和  $N_t$  分别为单个网箱初始尾数和终末尾数 (尾)。



### 1.5 全鱼和肝脏营养成分测定

水分含量采用 105 °C 烘箱烘干至恒重的方法 (GB/T 6435—2014) 测定, 粗蛋白质含量采用凯氏定氮法 (GB/T 6432—2018) 测定, 粗脂肪含量采用石油醚进行索氏抽提法 (GB/T 5009.6—1985) 测定, 灰分含量采用 550 °C 灼烧至恒重的方法 (GB/T 6433—2006) 测定。

### 1.6 生化指标的测定

生化指标包括血清甘油三酯 (TG)、总胆固醇 (TC)、葡萄糖 (GLU)、谷草转氨酶 (GOT)、谷丙转氨酶 (GPT)、高密度脂蛋白 (HDL-C)、低密度脂蛋白 (LDL-C)、游离脂肪酸 (NEFA) 和碱性磷酸酶 (AKP), 以及肝脏总蛋白 (TP)、甘油三酯 (TG)、总胆固醇 (TC)、肝糖原 (HG)、丙酮酸激酶 (PK), 试剂盒均购自南京建成生物工程研究所, 此外葡萄糖-6-磷酸酶 (G6Pase) 与葡萄糖激酶 (GK) 购自上海酶联生物技术有限公司, 所有指标测定步骤和计算公式均严格按照说明书进行, 所用酶标仪为 SpectraMax ABS 全波长酶标仪。

### 1.7 肠道消化酶活性测定

肠道组织总蛋白 (TP)、胰蛋白酶 (TPS)、脂肪酶 (LPS)、淀粉酶 (AMS) 按照相应的说明书进行检测, 均购自南京建成生物工程研究所, 所用酶标仪为 SpectraMax ABS 全波长酶标仪 [美谷分子仪器 (上海) 有限公司]。

### 1.8 肝脏组织切片的制备与观察

肝脏组织用 4% 甲醛固定, 经乙醇梯度脱水后用石蜡包埋, 通过包埋机横向切片制作成厚度 6 μm 的切片, 对肝脏组织切片进行 H.E 染色、油红 O 染色和 PAS 染色, 切片制作完成后委托武汉塞维尔生物技术有限公司进行白光扫描, 使用 CaseViewer 2.4.0 软件进行捕获拍照。

### 1.9 RNA 提取、反转录及 mRNA 定量分析

用 Trizol 试剂 (翌圣生物科技上海股份有限公司) 从大口黑鲈肝脏中提取总 RNA, 用 1.0% 变性琼脂糖凝胶电泳检测其完整性, Nano-Drop2000 (ThermoFisher Scientific, 美国) 测定 RNA 的纯度和浓度。将提取合格的 RNA 用 Hifair® III 1<sub>st</sub> Strand cDNA Synthesis Kit (gDNA digester plus) (翌圣生物科技上海股份有限公司)

试剂反转录成 cDNA。通过 National Center for Biotechnology Information 查找大口黑鲈目的基因的 cDNA 序列, 使用 Primer 5.0 软件设计特异性引物序列, 由北京擎科生物科技有限公司 (长沙) 进行合成, qPCR 引物序列见表 2。β-actin 作为内参基因, 采用 0.5 μL cDNA 与各 0.5 μL 上、下游引物, 6 μL Hifair® qPCR SYBR Green Master Mix (No Rox) 和 5 μL 无酶水混合, 总体积为 12.5 μL。实时荧光定量 PCR 程序设定为 95 °C 30 s; 40 个循环 (95 °C, 3~10 s; 60 °C, 10~30 s); 95 °C 15 s, 60 °C 60 s, 95 °C 15 s。每个样本 3 个重复, 根据  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  方法计算目的基因相对表达量<sup>[22]</sup>。

### 1.10 数据分析

采用 SPSS 26 软件进行统计学分析, 将数据进行方差齐性检验, 满足方差齐性条件则进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 当差异显著时 ( $P < 0.05$ ), 采用 Duncan 氏进行事后多重比较, 方差齐性条件不满足, 则用 Dunnett 氏 T3 检验法进行多重比较。结果用平均值±标准误差 (mean±SE) 表示。

## 2 结果

### 2.1 生长性能及形体指标

添加牛磺酸后大口黑鲈的 FBW、WGR、SGR 均显著上升 (表 3)。与对照组相比, 0.05% 牛磺酸组的 FCR、HSI、VSI 显著下降 ( $P < 0.05$ ), 0.1% 牛磺酸组的 FCR、HSI、VSI 则呈下降趋势, 其他无显著差异。

### 2.2 鱼体及肝脏成分

大口黑鲈鱼体的水分、粗蛋白、粗脂肪以及灰分各组间无显著差异 (表 4), 但添加牛磺酸后肝脏粗脂肪含量显著下降 ( $P < 0.05$ ), 其中 T0.05 组和 T0.1 组的肝脏粗脂肪含量分别下降了 22.28% 和 20.73%。

### 2.3 肝脏组织形态

添加牛磺酸后肝脏糖原含量显著下降 ( $P < 0.05$ ) (图 1-c), 且 0.1% 牛磺酸组肝脏 TG 水平显著低于 CON 组 ( $P < 0.05$ ) (图 1-b), 肝脏 TC 水平各组之间无显著差异 (图 1-a), 因此实验选择对照组与 0.10% 牛磺酸组进行肝脏组织形态

表 2 引物序列

Tab. 2 Primer sequences

基因 gene	上游引物 forward sequence (5'-3')	下游引物 reverse sequence (5'-3')	登录号 GenBank no.
<i>il-8</i>	CGTTGAACAGACTGGGAGAGATG	AGTGGGATGGCTTCATTATCTTGT	XM_038713528.1
<i>il-10</i>	CGGCACAGAAATCCCAGAGC	CAGCAGGCTCACAAAATAAACATCT	XM_038696252.1
<i>tnf-α</i>	CTTCGTCTACAGCCAGGCATCG	TTTGGCACACCGACCTCACC	XM_038710731.1
<i>tgf-β</i>	GCTCAAAGAGAGCGAGGATG	TCCTCTACCATTTCGCAATCC	XM_038693206.1
<i>nf-κb</i>	AGAAGACGACTCGGGGATGA	GCTTCTGCAGGTTCTGGTCT	XM_038699793.1
<i>sod</i>	CCACCAGAGGTCTCACAGCA	CCACTGAACCGAAGAAGGACT	XM_038713339.1
<i>cat</i>	TGGTGTTACGGATGAGATGG	GGAGAAGCGACAGCAATAGG	XM_038704976.1
<i>pepck</i>	TGCGTGATGAAGTTCGACA	GGGGTTGGTCTTGCTGAGG	XM_038696647.1
<i>G6pase</i>	GCCTACTGCGTAACATGGGT	ATCCTGCCTTGAACTGGCA	XM_038735544.1
<i>pfk</i>	GTGGACGGTGGAGACAACAT	GTGATACTGCGCTGCACAAG	XM_038724196.1
<i>pk</i>	CTCTTTCATCCGCAAAGC	AATCCCAGGTCACCACG	XM_038700627.1
<i>glut2</i>	GAGCCCACGGTACCTTTACA	ACAGAGGAGCGGATCAAAGA	XM_038728861.1
<i>gk</i>	GGGGATGGAAAGCAAATCTACAAT	CACACATACGAGCAGAGCGAGT	XM_038703173.1
<i>gs</i>	TCACAGCCATTGAGGCAGAG	GTAAAAGTGCCCCCTGACGA	XM_038697432.1
<i>fbpase</i>	CTTCACCTCCTGTGTGCTTG	CAGCTGGCTCACCATCTGTA	XM_038733827.1
<i>acc1α</i>	ATCCCTCTTTGCCACTGTTG	GAGGTGATGTTGCTCGCATA	XM_038709737.1
<i>fasn</i>	TGTGGTGCTGAACTCTCTGG	CATGCCTAGTGGGAGTTGT	XM_038735140.1
<i>atgl</i>	CCATGATGCTCCCCTACACT	GGCAGATACACTTCGGGAAA	XM_038705351.1
<i>hsl</i>	ATCAGAGCTGGAGCACCCCTA	GCAGAGGAGAGCAGAAAGGA	XM_038710965.1
<i>mgl</i>	AAGGTTTTTCTGGCGAAGGT	CGTGGAAGTTCAGCTCATCA	XM_038723003.1
<i>ppara</i>	CCACCGCAATGGTCGATATG	TGCTGTTGATGGACTGGGAAA	XM_038705497.1
<i>srebp1</i>	TTCCTCTCCCTCAACCCTC	AACCCAGAAAACCAGAATACC	XM_038699585.1
<i>lxr-1</i>	CTCCCACCCAATGACTTCC	GCAGGCCCTTCTTCTCTT	XM_038700506.1
<i>lpl</i>	AACCGCAATCCCTCGCC	AAGGTCTGTGTTTCTGAGTTGA	XM_038705351.1
<i>gpat4</i>	GTGTAAAGGCAGCCATAGCC	GTGCCACCAGCATTITACT	XM_038704699.1
<i>dgat1</i>	CACGCTCTTCTTGGAGAAC	AATGGTACCCACAGCCAGAC	XM_038724648.1
<i>acadm</i>	TGGCTGAGATGGCAATGAAGG	TTGCGATGGAGCGTAGTA	XM_038717481.1
<i>β-actin</i>	AAAGGGAAATCGTGCCTGAC	AAGGAAGGCTGGAAGAGGG	XM_038695351.1

注: *il-8*. 白细胞介素-8, *il-10*. 白细胞介素-10, *tnf-α*. 肿瘤坏死因子α, *tgf-β*. 转化生长因子β, *nf-κb*. 核因子 kappa B, *cat*. 过氧化氢酶, *sod*. 超氧化物歧化酶, *pepck*. 磷酸烯醇式丙酮酸羧化激酶, *G6pase*. 葡萄糖-6-磷酸酶, *pfk*. 磷酸果糖激酶, *pk*. 丙酮酸激酶, *gk*. 葡萄糖激酶, *gs*. 糖原合成酶, *glut2*. 葡萄糖转运蛋白-2, *fbpase*. 果糖-1,6-二磷酸酶, *acc1α*. 乙酰辅酶A羧化酶, *fasn*. 脂肪酸合成酶, *atgl*. 脂肪甘油三酯脂酶, *hsl*. 激素敏感脂肪酶, *mgl*. 单酰甘油脂肪酶, *ppara*. 过氧化物酶体增殖物激活受体α, *srebp1*. 固醇调控元件结合蛋白1, *lxr-1*. 肝X受体, *lpl*. 脂蛋白脂肪酶, *gpat4*. 甘油-3-磷酸盐酰基转移酶4, *dgat1*. 二酰甘油O-酰基转移酶1, *acadm*. 中长链酰基辅酶A脱氢酶, *β-actin*. β-肌动蛋白。

Notes: *il-8*. interleukin-8, *il-10*. interleukin-10, *tnf-α*. tumor necrosis factor α, *tgf-β*. transforming growth factor β, *nf-κb*. nuclear factor kappa B, *cat*. catalase, *sod*. superoxide dismutase, *pepck*. phosphoenolpyruvate carboxykinase, *G6pase*. glucose-6-phosphatase, *pfk*. phosphofructokinase, *pk*. pyruvate kinase, *gk*. glucokinase, *gs*. glycogen synthase, *glut2*. glucose transporter-2, *fbpase*. fructose-1,6-bisphosphatase, *acc1*. acetyl-coa carboxylase, *fasn*. fatty acid synthase, *atgl*. adipose triglyceride lipase, *hsl*. hormone-sensitive lipase, *mgl*. monoacylglycerol lipase, *ppara*. peroxisome proliferator-activated receptor α, *srebp1*. sterol regulatory element binding protein-1, *lxr-1*. liver x receptor, *lpl*. lipoprotein lipase, *gpat4*. glycerol-3-phosphate acyltransferase 4, *dgat1*. diacylglycerol o-acyltransferase 1, *acadm*. acyl-coa dehydrogenase medium chain, *β-actin*. β-actin.

分析。H.E 染色结果显示 (图版-1~2), CON 肝血窦出现频率高, 而 0.10% 牛磺酸组肝血窦减少, 细胞结构完整, 细胞界限明显且排列整齐。

结合油红 O 染色与 PAS 染色发现 (图版-3~6), 与 CON 相比, 添加牛磺酸后肝脏糖原明显减少, 且橘红色脂肪滴面积和数量减少。

表 3 牛磺酸对大口黑鲈生长性能和形体指标的影响

**Tab. 3 Effects of dietary taurine on growth performance and morphological measurements of *M. salmoides***

项目 item	对照组(CON) control group	0.05%牛磺酸组(T0.05) 0.05% taurine group	0.10%牛磺酸组(T0.1) 0.10% taurine group
初均重/g IBW	19.40±0.20	19.27±0.15	19.20±0.21
末均重/g FBW	82.17±0.51 <sup>a</sup>	88.41±1.36 <sup>b</sup>	87.00±1.15 <sup>b</sup>
增重率/% WGR	323.67±6.11 <sup>a</sup>	358.84±4.15 <sup>b</sup>	353.26±8.04 <sup>b</sup>
特定生长率/(%/d) SGR	2.58±0.03 <sup>a</sup>	2.72±0.02 <sup>b</sup>	2.70±0.03 <sup>b</sup>
饲料系数 FCR	1.16±0.02 <sup>b</sup>	1.08±0.02 <sup>a</sup>	1.13±0.01 <sup>ab</sup>
成活率/% SR	88.00±4.62	80.00±5.29	92.67±2.40
肥满度/(g/cm <sup>3</sup> ) CF	2.73±0.19	2.62±0.08	2.64±0.08
肝体比/% HSI	2.85±0.09 <sup>b</sup>	2.21±0.26 <sup>a</sup>	2.73±0.18 <sup>ab</sup>
脏体比/% VSI	15.32±0.24 <sup>bc</sup>	14.19±0.07 <sup>a</sup>	15.09±0.17 <sup>b</sup>

注: 同行内不同字母表示两组间有显著差异(P<0.05), 下同。

Notes: The values within the same row with different letters are significantly different (P<0.05), the same below.

表 4 牛磺酸对大口黑鲈鱼体成分及肝脏成分的影响 (湿重)

**Tab. 4 Effects of dietary taurine on body composition and liver composition of *M. salmoides* (wet weight basis) %**

项目 item	对照组(CON) control group	0.05%牛磺酸组(T0.05) 0.05% taurine group	0.10%牛磺酸组(T0.1) 0.10% taurine group
<b>全鱼 whole fish</b>			
水分 moisture	74.13±0.47	73.85±0.66	74.37±0.48
粗蛋白 crude protein	14.69±0.34	14.67±0.39	14.51±0.44
粗脂肪 crude lipid	6.09±0.58	6.03±0.27	6.03±0.07
灰分 ash	3.56±0.10	3.52±0.12	3.43±0.12
<b>肝脏 liver</b>			
水分 moisture	81.21±0.50	81.29±0.48	80.12±0.59
粗脂肪 crude lipid	3.86±0.05 <sup>a</sup>	3.00±0.09 <sup>b</sup>	3.06±0.08 <sup>b</sup>

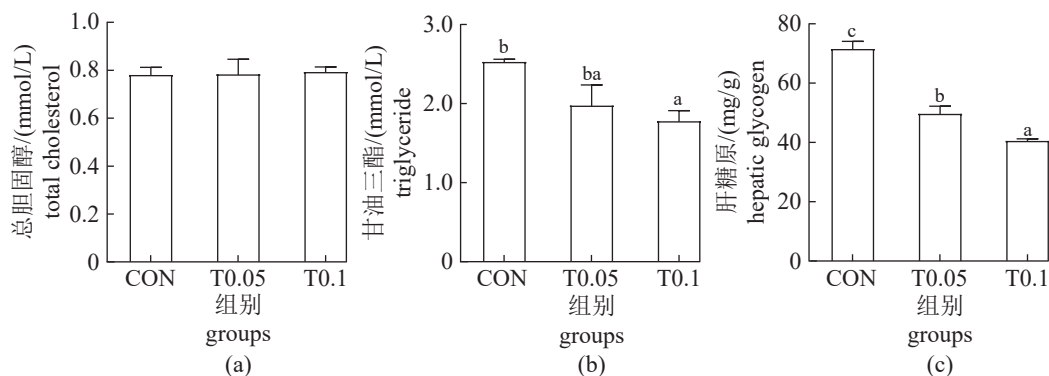


图 1 牛磺酸对大口黑鲈肝脏糖脂代谢相关生化指标的影响

图中字母不同表示差异显著 (P<0.05), 下同。

Fig. 1 Effects of dietary taurine on liver carbohydrate metabolism and lipid related biochemical indexes of *M. salmoides*

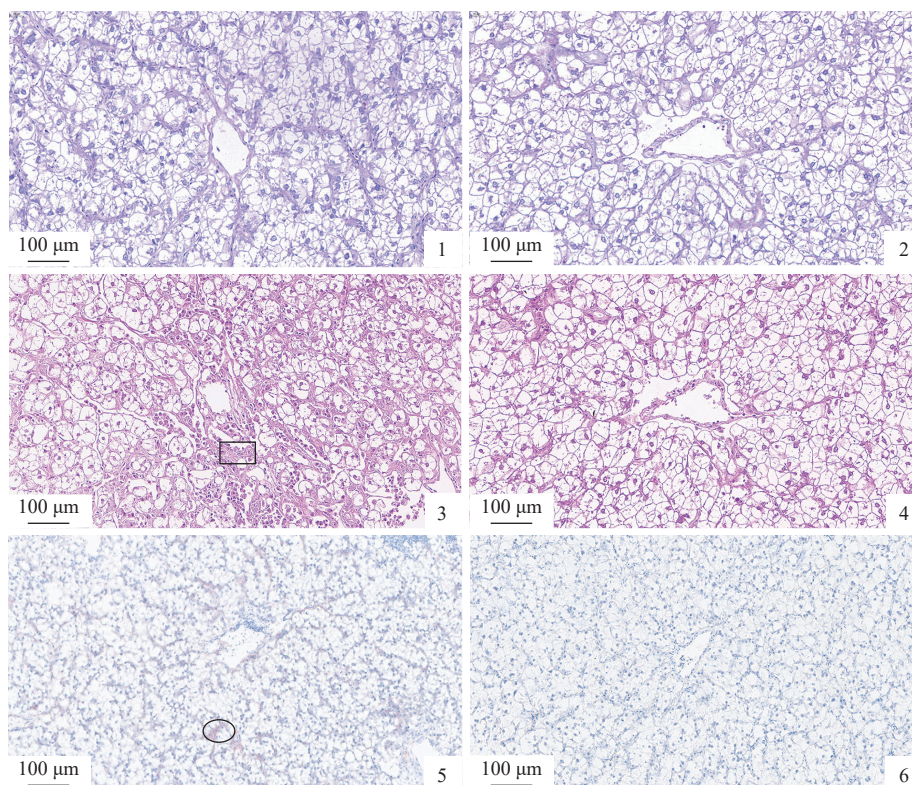
Different letters in the figure indicate significant differences (P<0.05), the same below.

### 2.4 血清生化指标

各组间血清总胆固醇 TC 水平无显著差异, 与 CON 相比, 添加牛磺酸后大口黑鲈的血清

GLU、LDL-C、GPT、GOT 水平均显著降低, 而 AKP 与 HDL-C 则显著升高 (P<0.05) (表 5)。此外, 0.05% 牛磺酸组的血清 TG、NEFA 含量





图版 牛磺酸对大口黑鲈肝脏组织形态的影响

1~2. CON、T0.1 组的肝脏 H.E 染色 (400×); 3~4. CON、T0.1 组的肝脏 PAS 染色 (400×), 黑框为糖原颗粒; 5~6. CON、T0.1 组的油红 O 染色 (400×); 黑圆圈为脂肪滴。

Plate Effects of dietary taurine on liver histology of *M. salmoides*

1-2. H.E staining in the liver of CON and T0.1 groups (400×); 3-4. PAS staining in the liver of CON and T0.1 groups (400×), the black squares are glycogen granules; 5-6. Oil-Red-O staining in the liver of CON and T0.1 groups (400×), the black circle are fat droplets.

表 5 牛磺酸对大口黑鲈血清生化指标的影响

Tab. 5 Effects of dietary taurine on serum biochemical indexes of *M. salmoides*

项目 item	对照组(CON) control group	0.05%牛磺酸组(T0.05) 0.05% taurine group	0.10%牛磺酸组(T0.1) 0.10% taurine group
葡萄糖/(mmol/L) GLU	11.82±0.27 <sup>b</sup>	10.15±0.40 <sup>a</sup>	9.77±0.28 <sup>a</sup>
总胆固醇/(mmol/L) TC	5.53±0.19	5.12±0.05	5.87±0.13
甘油三酯/(mmol/L) TG	20.98±0.68 <sup>b</sup>	18.56±0.97 <sup>a</sup>	21.01±0.81 <sup>b</sup>
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL-C	1.84±0.03 <sup>a</sup>	3.62±0.10 <sup>b</sup>	2.15±0.09 <sup>a</sup>
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL-C	5.48±0.17 <sup>c</sup>	4.26±0.05 <sup>a</sup>	5.04±0.01 <sup>b</sup>
游离脂肪酸/(mmol/L) NEFA	0.26±0.02 <sup>b</sup>	0.16±0.01 <sup>a</sup>	0.28±0.01 <sup>b</sup>
谷草转氨酶/(U/L) GOT	48.37±1.20 <sup>c</sup>	34.61±0.71 <sup>b</sup>	23.41±0.87 <sup>a</sup>
谷丙转氨酶/(U/L) GPT	77.30±9.13 <sup>c</sup>	41.81±6.04 <sup>b</sup>	23.56±2.84 <sup>a</sup>
碱性磷酸酶/(U/L) AKP	7.40±0.13 <sup>a</sup>	9.69±0.15 <sup>c</sup>	8.70±0.12 <sup>b</sup>

显著低于 CON ( $P<0.05$ )。

### 2.5 肠道消化酶活性

脂肪酶、胰蛋白酶活性各组之间没有显著差异, 但添加牛磺酸后胰蛋白酶活性呈上升趋势, 且牛磺酸组淀粉酶活性均显著高于 CON ( $P<0.05$ ) (表 6)。

### 2.6 肝脏糖代谢相关酶活性及基因表达

牛磺酸组肝脏 G6Pase 活性显著低于 CON, 而 GK、PK 活性显著高于 CON ( $P<0.05$ ) (表 7)。基因表达方面, 与 CON 组相比, 牛磺酸组的 *pfk*、*gk*、*glut2* 的表达显著上调, 而 *fbp* 表达呈下调趋势, 在牛磺酸添加水平为 0.10% 时 *fbp*

表 6 牛磺酸对大口黑鲈肠道消化酶活性的影响

**Tab. 6 Effects of dietary taurine on intestinal digestive enzyme activities of *M. salmoides***

项目 item	对照组(CON) control group	0.05%牛磺酸组(T0.05) 0.05% taurine group	0.10%牛磺酸组(T0.1) 0.10% taurine group
脂肪酶/(U/g prot) lipase	2.02±0.08	2.16±0.06	1.95±0.12
淀粉酶/(U/g prot) amylase	0.26±0.01 <sup>a</sup>	0.34±0.01 <sup>b</sup>	0.33±0.02 <sup>b</sup>
胰蛋白酶/(U/mg prot) trypsin	46.61±2.63	47.80±2.35	48.84±2.02

表 7 牛磺酸对大口黑鲈肝脏糖代谢相关酶活性的影响

**Tab. 7 Effects of dietary taurine on liver carbohydrate metabolism enzyme activities of *M. salmoides***

项目 item	对照组(CON) control group	0.05%牛磺酸组(T0.05) 0.05% taurine group	0.10%牛磺酸组(T0.1) 0.10% taurine group
葡萄糖-6-磷酸酶/(ng/mg prot) G6Pase	1.16±0.03 <sup>b</sup>	0.98±0.04 <sup>a</sup>	1.05±0.04 <sup>a</sup>
葡萄糖激酶/(ng/mg prot) GK	1.20±0.01 <sup>a</sup>	1.47±0.02 <sup>b</sup>	1.49±0.02 <sup>b</sup>
丙酮酸激酶/(U/g prot) PK	22.96±0.94 <sup>a</sup>	29.64±1.30 <sup>b</sup>	27.40±1.21 <sup>b</sup>

表达显著下调 ( $P<0.05$ ) (图 2)。

### 2.7 肝脏脂代谢相关基因表达

与 CON 相比, 牛磺酸组显著下调了脂肪酸从头合成相关基因 *lxr-1* 和甘油三酯合成相关基因 *dgat1* 的表达, 且 0.05% 牛磺酸组的 *srebp1*、*acc1a* 表达显著下调, 0.10% 牛磺酸组的 *fasn*、*gpat4* 表达显著下调; 同时, 牛磺酸组的脂肪水解相关基因 *hsl*、*mgl*、*lpl*、*atgl* 和脂肪酸氧化相关基因 *acadm*、*ppara* 的表达呈上调趋势, 其中 0.05% 牛磺酸组在 *mgl*、*lpl* 基因的表达上与 CON 有显著差异, 0.10% 牛磺酸组在 *hsl*、*lpl*、*atgl*、*acadm*、*ppara* 基因的表达上与 CON 有显著差异 ( $P<0.05$ ) (图 3)。

### 2.8 肝脏炎症、抗氧化相关基因表达

与 CON 相比, 牛磺酸组的肝脏抗氧化相关基因 *cat*、*sod* 和抗炎因子 *il-10*、*tgf-β* 表达显

著上调 ( $P<0.05$ ), 而促炎因子 *nf-κb* 和 *il-8* 的表达则显著下调 ( $P<0.05$ )。 *tnf-α* 的相对表达量各组间无显著差异 (图 4)。

## 3 讨论

本研究结果显示, 饲料中添加牛磺酸后大口黑鲈的增重率、特定生长率显著上升, 饲料系数下降, 表明在高淀粉饲料中添加牛磺酸可以提高大口黑鲈的生长性能。在红鳍东方鲀 (*Takifugu rubripes*)<sup>[23]</sup>、黄鳍<sup>[24]</sup>、杂交石斑鱼 [*Epinephelus fuscoguttatus* (♀)×*E. lanceolatus* (♂)]<sup>[25]</sup>、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)<sup>[26]</sup> 的研究中也发现, 高淀粉饲料中补充牛磺酸促进其生长。肠道消化酶活性能够反映鱼类对饲料中营养物质的消化状态<sup>[27]</sup>, 添加牛磺酸后大口黑鲈的肠道淀粉酶活性显著升高, 说明牛磺酸的添加可以提高大口黑鲈对淀粉的利用率, 推测这可能是

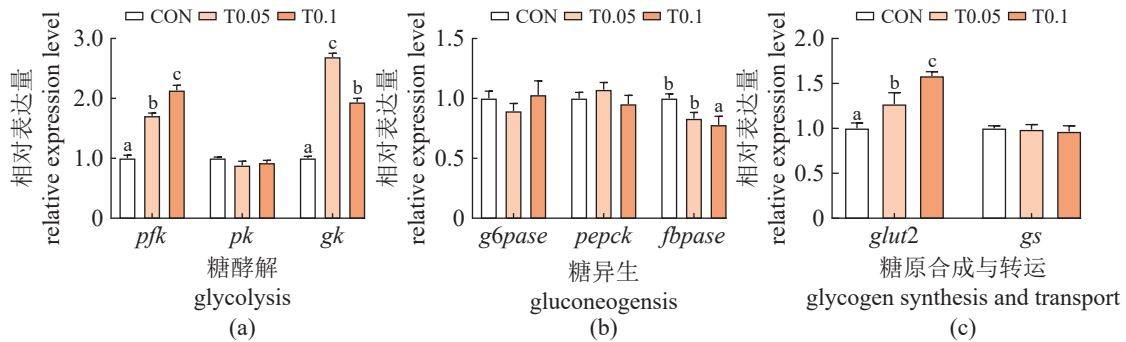


图 2 牛磺酸对大口黑鲈肝脏糖代谢相关基因表达的影响

Fig. 2 Effects of dietary taurine on liver carbohydrate metabolism related genes expression of *M. salmoides*



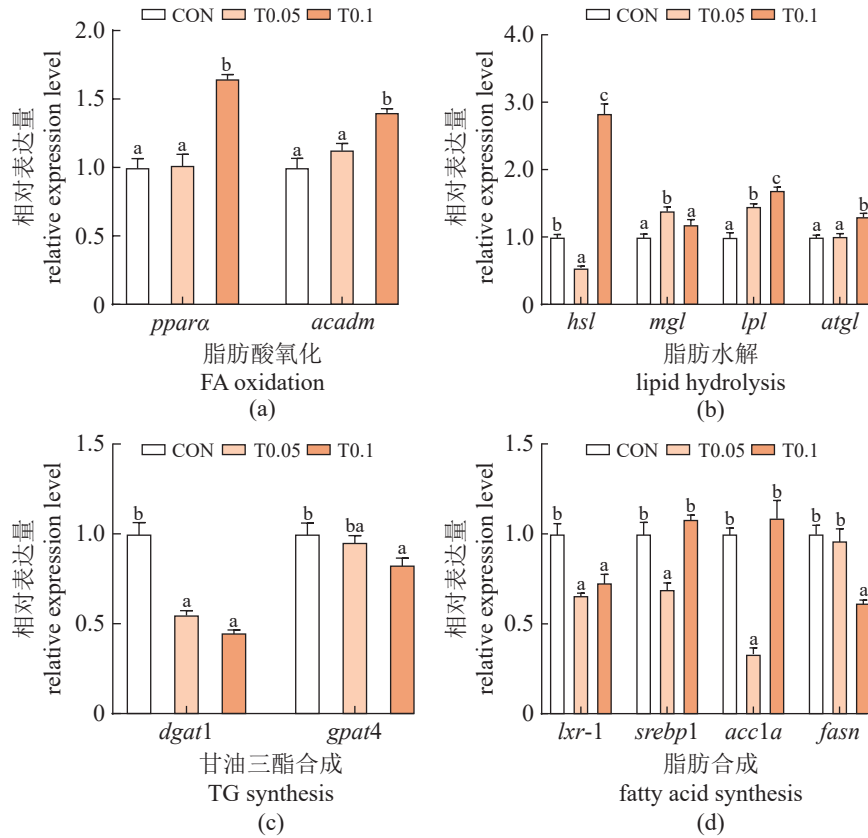


图 3 牛磺酸对大口黑鲈肝脏脂代谢相关基因表达的影响

Fig. 3 Effects of dietary taurine on liver lipid metabolism related genes expression of *M. salmoides*

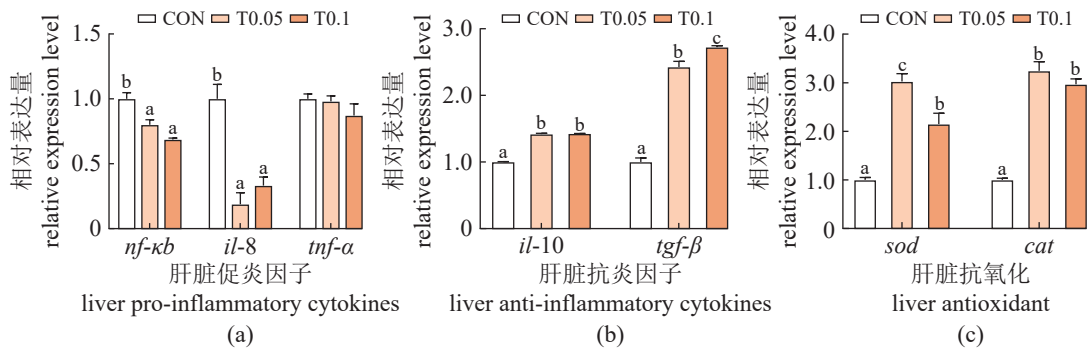


图 4 牛磺酸对大口黑鲈肝脏炎症、抗氧化相关基因表达的影响

Fig. 4 Effects of dietary taurine on liver inflammation and antioxidant related genes expression of *M. salmoides*

促进生长的原因之一。另外，牛磺酸对大口黑鲈的促生长作用可能归因于牛磺酸可以缓解高淀粉带来的糖脂代谢紊乱和肝脏损伤<sup>[24]</sup>。

摄食高碳水化合物饲料会诱导鱼类长期高血糖和糖原沉积<sup>[28]</sup>。许多研究报道，高糖饲料中添加牛磺酸可降低黄鳝<sup>[24]</sup>、尼罗罗非鱼 (*Oreochromis nilotica*)<sup>[29]</sup>、杂交石斑鱼<sup>[25]</sup> 的糖原积累。本研究中，牛磺酸的添加显著降低了大口黑鲈血清 GLU 水平和肝糖原含量，其中 T0.1 组的

效果更佳。结合肝脏组织 PAS 染色和 H.E 染色观察发现，添加牛磺酸可以降低肝脏中糖原含量和维持肝细胞的正常形态，可能是由于鱼类牛磺酸合成途径的酶活性普遍较低<sup>[30]</sup>，难以满足自身需求，需要通过外界摄入补充。在黄鳝的研究中发现，高碳水化合物饲料中添加 0.2% 和 0.5% 的牛磺酸可以缓解肝糖原过高的现象<sup>[24]</sup>，且存在一定的剂量效应，与本实验结果类似。葡萄糖利用和储存之间的平衡对于维持葡萄糖

稳态至关重要, 这取决于参与糖酵解和糖异生的关键酶的活性和基因表达<sup>[31]</sup>。糖酵解和糖异生是糖代谢的两个重要途径, 糖酵解的关键酶包括 PK、GK 和 PFK, 而糖异生的关键酶包括 PEPCK、G6Pase 和 FBPase。本研究发现, 补充牛磺酸后肝脏的糖异生关键酶 G6pase 活性显著降低, 而糖酵解的关键酶 GK、PK 活性显著升高, 在基因表达上牛磺酸组的 *pfk*、*gk* 表达显著上调, 而 *fbpase* 表达下调。此外, GLUT2 介导血液和肝细胞之间的葡萄糖转运, 这是糖代谢的第一步<sup>[32]</sup>。Legate 等<sup>[33]</sup> 研究发现, 葡萄糖转运体数量的增加意味着机体对葡萄糖吸收能力增强。本研究发现, 添加牛磺酸显著上调了 *glut2* 的基因表达。上述结果表明, 高淀粉饲料中添加牛磺酸可以促进肝脏糖酵解, 抑制糖异生, 加速葡萄糖转运, 从而调节机体的葡萄糖代谢, 降低血清葡萄糖含量和肝糖原积累。

长期饲喂高糖饲料或肝细胞长期暴露于高糖环境中, 可导致肝脏脂质沉积和脂质代谢紊乱<sup>[34-35]</sup>, 以往的研究证实这或与饲喂高糖饲料增加血糖水平有关, 认为该过程受哺乳动物雷帕霉素靶蛋白 (mammalian target of rapamycin, mtor) 调控下的 *acc* 和 *fas* 表达的影响<sup>[36]</sup>。也有报道认为抑制沉默信息调节因子 1 (silent information regulator factor, SIRT1) 在其中发挥了重要的作用, 受其调控的 *ppara* 会抑制脂肪酸氧化<sup>[37]</sup>。而牛磺酸已被证实具有降血脂作用<sup>[38]</sup>, 在水生动物上已发现牛磺酸可以促进白鲷 (*Diplodus sargus*)<sup>[39]</sup>、波斯鲟 (*Acipenser persicus*)<sup>[40]</sup>、杂交石斑鱼<sup>[25]</sup>、尼罗罗非鱼<sup>[41]</sup>、舌齿鲈 (*Dicentrarchus labrax*)<sup>[42]</sup> 的脂质分解。本研究中, 添加牛磺酸可显著降低大口黑鲈的 HSI、肝脏 TG 水平和肝脏粗脂肪含量, 而血清 TG、LDL-C 与 NEFA 水平呈先降后升的趋势, HDL-C 水平则呈先升后降的变化趋势, 这可能是由于添加牛磺酸后, 肠道组织对外源性 TG 的吸收增强, 以及肝脏内源性合成增强<sup>[25]</sup>。结合油红染色发现, 添加牛磺酸组大口黑鲈的肝脏脂肪滴数量与面积减少。进一步通过定量实验发现, 添加牛磺酸可以显著下调肝脏脂肪酸从头合成相关基因 *acc1a*、*fasn*、*lxr-1*、*sreb1* 和甘油三酯合成基因 *gpat4*、*dgat1* 的表达, 同时上调脂肪酸氧化相关基因 *ppara*、*acadm* 和脂滴水解相关基因 *atgl*、*lpl*、*mgl*、*hsl* 的表达, 这与赵宸葆<sup>[43]</sup> 和 Shi<sup>[24]</sup> 等的研究结果

一致, 表明牛磺酸可通过降低脂质合成, 促进脂肪水解与氧化过程, 减少高淀粉饲料造成的肝脏脂质积累。

鱼类体内肝糖原和脂质沉积过多会导致肝脏损伤<sup>[44]</sup>。机体的血清生化指标是评价健康水平和营养状况的重要指标之一<sup>[45]</sup>。当肝脏功能受损时会释放大量谷丙转氨酶和谷草转氨酶至血清<sup>[46]</sup>。本研究表明, 在高淀粉饲料中添加牛磺酸显著降低了血清中谷丙转氨酶和谷草转氨酶的活性, 表明补充牛磺酸可以降低大口黑鲈的肝损伤。在黄鳝<sup>[24]</sup>、尼罗罗非鱼<sup>[47]</sup> 的研究中也有类似的结果。此外, 多项研究表明饲料中淀粉过多会降低肉食性鱼类的先天免疫力<sup>[48]</sup>。碱性磷酸酶参与免疫防御机制, 并与免疫能力相关<sup>[49]</sup>。本研究中, 添加牛磺酸后碱性磷酸酶显著升高, 表明在摄食高淀粉饲料条件下添加牛磺酸可以提高大口黑鲈免疫力。当抗氧化能力不足, 脂质过氧化压力和胰岛素抵抗就会加重, 这也被认为是鱼类碳水化合物不耐受和脂质代谢紊乱的机制之一<sup>[25]</sup>。在本研究中, 高淀粉饲料中添加牛磺酸可显著提高大口黑鲈抗氧化相关基因 *sod* 和 *cat* 的表达, 说明牛磺酸提高了大口黑鲈肝脏抗氧化能力, 其也可能是介导牛磺酸改善糖脂代谢的原因。高碳水化合物引起的氧化应激会进一步促进超氧阴离子自由基的产生<sup>[50]</sup>, 继而会激活如 *nf- $\kappa$ b*、*tnf- $\alpha$*  和 *il-8* 等多种促炎因子, 导致炎症的产生<sup>[51]</sup>, 在黄鳝<sup>[24]</sup>、尼罗罗非鱼<sup>[52]</sup> 中, 已证实高淀粉会导致其炎症因子表达上调。本研究结果显示, 高淀粉饲料中添加牛磺酸会显著上调大口黑鲈抗炎因子 *il-10*、*tgf- $\beta$*  的表达, 显著下调促炎因子 *nf- $\kappa$ b* 和 *il-8* 的表达, 证实牛磺酸可以缓解高淀粉饲料引起的炎症反应。在黄颡鱼<sup>[18]</sup>、黄鳝<sup>[24]</sup>、牙鲈 (*Paralichthys olivaceus*)<sup>[53]</sup> 中, 也发现饲料中添加牛磺酸可降低炎症因子的表达。

#### 4 结论

综上所述, 在本实验条件下, 高淀粉饲料中添加适量牛磺酸可促进肝脏糖脂代谢, 减少肝脏糖原和脂肪沉积, 提高淀粉利用, 其中牛磺酸推荐添加量为 0.10%。另外, 添加牛磺酸可增强肝脏抗氧化和免疫能力, 减少肝脏损伤, 最终改善大口黑鲈的生长。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 李素芳, 程明珠. 河南大口黑鲈养殖模式现状及探讨 [J]. 中国水产, 2024(1): 83-85.  
Li S F, Cheng M Z. Current situation and discussion of *Micropterus salmoides* farming mode in Henan[J]. China Fisheries, 2024(1): 83-85 (in Chinese).
- [ 2 ] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会, 2024 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Aquatic Technology Extension Station, China Fisheries Society. China fisheries statistical year-book 2024[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2024 (in Chinese).
- [ 3 ] 陈沛. FoxO1 在大口黑鲈糖脂代谢中的机制研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.  
Chen P. Mechanism of FoxO1 on glucose and lipid metabolism in *Micropterus salmoides*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022 (in Chinese).
- [ 4 ] Zhao L L, Liang J, Chen F K, *et al.* High carbohydrate diet induced endoplasmic reticulum stress and oxidative stress, promoted inflammation and apoptosis, impaired intestinal barrier of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2021, 119: 308-317.
- [ 5 ] Wu H X, Li W J, Shan C J, *et al.* Oligosaccharides improve the flesh quality and nutrition value of Nile tilapia fed with high carbohydrate diet[J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2021, 3: 100040.
- [ 6 ] Deng K Y, Pan M Z, Liu J H, *et al.* Chronic stress of high dietary carbohydrate level causes inflammation and influences glucose transport through *SOCS3* in Japanese flounder *Paralichthys olivaceus*[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 7415.
- [ 7 ] Li S L, Wang A, Li Z Q, *et al.* Antioxidant defenses and non-specific immunity at enzymatic and transcriptional levels in response to dietary carbohydrate in a typical carnivorous fish, hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 100: 109-116.
- [ 8 ] 苟仕潘, 陈乃松, 徐祥泰, 等. 饲料中可消化淀粉对大口黑鲈生长、体组成和非特异性免疫指标的影响 [J]. 水产学报, 2015, 39(10): 1499-1510.  
Gou S P, Chen N S, Xu X T, *et al.* Effects of dietary digestible starch levels on growth performance, body composition, and non-specific immunological index of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(10): 1499-1510 (in Chinese).
- [ 9 ] Zhou Y L, He G L, Jin T, *et al.* High dietary starch impairs intestinal health and microbiota of largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. Aquaculture, 2021, 534: 736261.
- [ 10 ] Tiedemann F, Gmelin L. Einige neue bestandtheile der galle des oechsen[J]. Annalen der Physik, 1827, 85(2): 326-337.
- [ 11 ] Matsunari H, Hamada K, Mushiaki K, *et al.* Effects of taurine levels in broodstock diet on reproductive performance of yellowtail *Seriola quinqueradiata*[J]. Fisheries Science, 2006, 72(5): 955-960.
- [ 12 ] Takagi S, Murata H, Goto T, *et al.* Efficacy of taurine supplementation for preventing green liver syndrome and improving growth performance in yearling red sea bream *Pagrus major* fed low-fishmeal diet[J]. Fisheries Science, 2006, 72(6): 1191-1199.
- [ 13 ] Garcia-Organista A A, Mata-Sotres J A, Viana M T, *et al.* The effects of high dietary methionine and taurine are not equal in terms of growth and lipid metabolism of juvenile California yellowtail (*Seriola dorsalis*)[J]. Aquaculture, 2019, 512: 734304.
- [ 14 ] Suehs B, Gatlin III D M. Evaluating the dietary taurine requirement of hybrid striped bass, (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*)[J]. Aquaculture, 2021, 536: 736473.
- [ 15 ] Lunger A N, Mclean E, Gaylord T G, *et al.* Taurine supplementation to alternative dietary proteins used in fish meal replacement enhances growth of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J]. Aquaculture, 2007, 271(1-4): 401-410.
- [ 16 ] Pinto W, Figueira L, Ribeiro L, *et al.* Dietary taurine supplementation enhances metamorphosis and growth potential of *Solea senegalensis* larvae[J]. Aquaculture, 2010, 309(1-4): 159-164.
- [ 17 ] Zhang J Z, Hu Y, Ai Q H, *et al.* Effect of dietary taurine supplementation on growth performance, digestive enzyme activities and antioxidant status of juvenile black carp (*Mylopharyngodon piceus*) fed with low fish meal diet[J]. Aquaculture Research, 2018, 49(9): 3187-3195.
- [ 18 ] Zhang M Z, Li M, Wang R X, *et al.* Effects of acute ammonia toxicity on oxidative stress, immune response and apoptosis of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* and the mitigation of exogenous taurine[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2018, 79: 313-320.
- [ 19 ] Hu Y, Yang G, Li Z L, *et al.* Effect of dietary taurine supplementation on growth, digestive enzyme, immunity and resistant

- to dry stress of rice field eel (*Monopterus albus*) fed low fish meal diets[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(6): 2108-2118.
- [20] 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(3): 691-699.
- [21] 高彬. 饲料中  $\alpha$ -淀粉水平对大口黑鲈生长、抗氧化能力、糖代谢及代谢组的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- Gao B. Effects of dietary  $\alpha$ -starch level on growth, antioxidant capacity, glycometabolism and metabolome of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022 (in Chinese).
- [22] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  method[J]. *Methods*, 2001, 25(4): 402-408.
- [23] Wei Y L, Zhang Q G, Xu H G, *et al.* Taurine requirement and metabolism response of tiger puffer *Takifugu rubripes* to graded taurine supplementation[J]. *Aquaculture*, 2020, 524: 735237.
- [24] Shi Y, Zhong L, Zhong H, *et al.* Taurine supplements in high-carbohydrate diets increase growth performance of *Monopterus albus* by improving carbohydrate and lipid metabolism, reducing liver damage, and regulating intestinal microbiota[J]. *Aquaculture*, 2022, 554: 738150.
- [25] Qian J B, Yin B, Liu H Y, *et al.* Effects of taurine supplementation in a high-carbohydrate diet on growth performance, plasma biochemical, digestive and glucose metabolism enzymes in hybrid grouper ( $\text{♀}$  *Epinephelus fuscoguttatus*  $\times$   $\text{♂}$  *E. lanceolatus*)[J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 21: 100820.
- [26] Pan L, Qian J H, Liu H Y, *et al.* Implications on growth performance, glucose metabolism, PI<sub>3</sub>K/AKT pathway, intestinal flora induced by dietary taurine in a high-carbohydrate diet for grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *British Journal of Nutrition*, 2024, 131(1): 27-40.
- [27] 杨琳霖, 胡毅, 朱波, 等. 金针菇菇头对草鱼生长、消化酶活性、肠道组织结构、肌肉品质及血清生化指标的影响 [J]. *动物营养学报*, 2021, 33(8): 4569-4579.
- Yang L L, Hu Y, Zhu B, *et al.* Effects of *Flammulina velutipes* stembase on growth, digestive enzyme activities, intestinal tissue structure, muscle quality and serum biochemical parameters of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(8): 4569-4579 (in Chinese).
- [28] Zhang W, Liu K, Tan B P, *et al.* Transcriptome, enzyme activity and histopathology analysis reveal the effects of dietary carbohydrate on glycometabolism in juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. *Aquaculture*, 2019, 504: 39-51.
- [29] Xu R, Li M, Wang T, *et al.* *Bacillus amyloliquefaciens* ameliorates high-carbohydrate diet-induced metabolic phenotypes by restoration of intestinal acetate-producing bacteria in Nile tilapia[J]. *British Journal of Nutrition*, 2022, 127(5): 653-665.
- [30] Kuzmina V V, Gavrovskaya L K, Ryzhova O V. Taurine. Effect on exotrophia and metabolism in mammals and fish[J]. *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*, 2010, 46(1): 19-27.
- [31] Polakof S, Panserat S, Soengas J L, *et al.* Glucose metabolism in fish: a review[J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2012, 182(8): 1015-1045.
- [32] Röder P V, Geillinger K E, Zietek T S, *et al.* The role of SGLT1 and GLUT2 in intestinal glucose transport and sensing[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e89977.
- [33] Legate N J, Bonen A, Moon T W. Glucose tolerance and peripheral glucose utilization in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), American eel (*Anguilla rostrata*), and black bullhead catfish (*Ameiurus melas*)[J]. *General and Comparative Endocrinology*, 2001, 122(1): 48-59.
- [34] 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, Lyu 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 [*Channa maculata* ( $\text{♀}$ )  $\times$  *C. argus* ( $\text{♂}$ )][J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(11): 7320-7334 (in Chinese).
- [35] Prisingkorn W, Prathomya P, Jakovlić I, *et al.* Transcriptomics, metabolomics and histology indicate that high-carbohydrate diet negatively affects the liver health of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. *BMC Genomics*, 2017, 18(1): 856.
- [36] Seilliez I, Panserat S, Lansard M, *et al.* Dietary carbohydrate-to-protein ratio affects TOR signaling and metabolism-related gene expression in the liver and muscle of rainbow trout after a single meal[J]. *American Journal of Physiology Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2011, 300(3): R733-R743.
- [37] Rodgers J T, Lerin C, Haas W, *et al.* Nutrient control of glucose homeostasis through a complex of PGC-1 $\alpha$  and SIRT1[J]. *Nature*, 2005, 434(7029): 113-118.



- [38] 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.
- [39] Magalhães R, Martins N, Martins S, *et al.* Is dietary taurine required for white seabream (*Diplodus sargus*) juveniles?[J]. *Aquaculture*, 2019, 502: 296-302.
- [40] Hoseini S M, Hosseini S A, Eskandari S, *et al.* Effect of dietary taurine and methionine supplementation on growth performance, body composition, taurine retention and lipid status of Persian sturgeon, *Acipenser persicus* (Borodin, 1897), fed with plant-based diet[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, 24(1): 324-331.
- [41] Wang T, Wu H X, Li W J, *et al.* Effects of dietary mannan oligosaccharides (MOS) supplementation on metabolism, inflammatory response and gut microbiota of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed with high carbohydrate diet[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022, 130: 550-559.
- [42] Martins N, Diógenes A F, Magalhães R, *et al.* Dietary taurine supplementation affects lipid metabolism and improves the oxidative status of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles[J]. *Aquaculture*, 2021, 531: 735820.
- [43] 赵宸葆. 牛磺酸对脂肪变性肝细胞糖脂代谢的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.  
Zhao C B. Effects of taurine on glucose and lipid metabolism in steatotic hepatocytes[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [44] Jin M, Pan T T, Cheng X, *et al.* Effects of supplemental dietary l-carnitine and bile acids on growth performance, antioxidant and immune ability, histopathological changes and inflammatory response in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) fed high-fat diet[J]. *Aquaculture*, 2019, 504: 199-209.
- [45] Yu W, Wen G L, Lin H Z, *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 & Shellfish Immunology*, 2018, 74: 649-655.
- [46] 胡亚军, 胡毅, 石勇, 等. 不同形式蛋氨酸对黄鳝生长、血清生化、血清游离氨基酸含量及肌肉品质的影响 [J]. *水生生物学报*, 2019, 43(6): 1155-1163.
- Hu Y J, Hu Y, Shi Y, *et al.* Effects of dietary methionine on growth, serum biochemical indexes, serum free amino acid and muscle texture of rice field eel (*Monopterus albus*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, 43(6): 1155-1163 (in Chinese).
- [47] Luo Y, Hu C T, Qiao F, *et al.* Gemfibrozil improves lipid metabolism in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fed a high-carbohydrate diet through peroxisome proliferator activated receptor- $\alpha$  activation[J]. *General and Comparative Endocrinology*, 2020, 296: 113537.
- [48] Zhou C P, Ge X P, Lin H Z, *et al.* Effect of dietary carbohydrate on non-specific immune response, hepatic antioxidative abilities and disease resistance of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, 41(2): 183-190.
- [49] Yan F J, Tian X L, Dong S L, *et al.* Growth performance, immune response, and disease resistance against *Vibrio splendidus* infection in juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus* fed a supplementary diet of the potential probiotic *Paracoccus marcusii* DB 11[J]. *Aquaculture*, 2014, 420-421: 105-111.
- [50] Mkhwanazi B N, Serumula M R, Myburg R B, *et al.* Antioxidant effects of maslinic acid in livers, hearts and kidneys of streptozotocin-induced diabetic rats: effects on kidney function[J]. *Renal Failure*, 2014, 36(3): 419-431.
- [51] Laubertová L, Koňariková K, Gbelcová H, *et al.* Effect of walnut oil on hyperglycemia-induced oxidative stress and pro-inflammatory cytokines production[J]. *European Journal of Nutrition*, 2015, 54(2): 291-299.
- [52] Li M, Hu F C, Qiao F, *et al.* Sodium acetate alleviated high-carbohydrate induced intestinal inflammation by suppressing MAPK and NF- $\kappa$ B signaling pathways in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020, 98: 758-765.
- [53] Liu J H, Pan M Z, Liu Y, *et al.* Taurine alleviates endoplasmic reticulum stress, inflammatory cytokine expression and mitochondrial oxidative stress induced by high glucose in the muscle cells of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022, 123: 358-368.

## Effects of taurine on growth, glucolipids metabolism and hepatic antioxidant of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

BIAN Yanxin<sup>1</sup>, XIE Kai<sup>1</sup>, CAI Minglang<sup>1</sup>, ZHU Bo<sup>1</sup>, ZHOU Xixun<sup>2</sup>,  
HU Yi<sup>1\*</sup>, ZHANG Junzhi<sup>1\*</sup>

1. Fisheries College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Yueyang Yumeikang Biotechnology Co., Ltd., Yueyang 414100, China

**Abstract:** To evaluate the effects of taurine on the growth performance, hepatic glucolipids metabolism, and hepatic antioxidant capacities of largemouth bass (*Micropterus salmoides*), with an initial weight of (19.00±0.20) g were reared in cages (120 cm × 80 cm × 150 cm) for 8 weeks. The high starch control group (CON) was set at an 18% tapioca starch level, and 0.05% and 0.10% taurine (T0.05 and T0.1) were added based on this control group. The experiment consisted of three treatments, each with three replicates of 50 fish per replicate. Results indicated that taurine addition to high-starch diets significantly increased weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR), while significantly decreasing liver crude fat and hepatic glycogen content. Intestinal amylase activity was also significantly elevated. Histological staining with H.E, PAS, and oil red O revealed that hepatocytes in the 0.1% taurine group were structurally intact, with reduced glycogen and fat droplets compared to the CON group. Serum glucose, low-density lipoprotein cholesterol, glutamic oxalacetic transaminase (GOT), and glutamate pyruvic transaminase (GPT) levels were significantly decreased after taurine addition, whereas alkaline phosphatase (ALP) and high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) levels were significantly increased. Hepatic G6Pase activity was significantly decreased in the taurine groups, while GK and PK activities were significantly elevated. The expression of genes related to glycolysis (*pfk*, *gk* and *glut2*) was up-regulated, while the expression of hepatic lipid synthesis-related genes (*dgat1*, *lxr-1*, *srebp1*, *acc1a*, *fasn* and *gpat4*) was down-regulated. In contrast, the expression of lipolysis-related genes (*hsl*, *mgl*, *ppara*, *lpl*, *atgl* and *acadm*) was up-regulated. Compared to the CON group, the expression of antioxidant-related genes (*cat*, *sod*, *il-10* and *tgf-β*) was up-regulated in the taurine groups, while *nf-κb* and *il-8* expression was down-regulated. In summary, adding taurine to high-starch feeds can improve growth, regulate hepatic glucose-lipid metabolism, increase carbohydrate utilization, reduce hepatic glycogen deposition and lipid accumulation, and enhance the antioxidant capacity of *M. salmoides*. Under the experimental conditions, the recommended taurine addition in *M. salmoides* feed was 0.10%. This study provides a theoretical basis for taurine's role in regulating glucose and lipid metabolism and offers technical support for improving carbohydrate utilization in aquatic animals.

**Key words:** *Micropterus salmoides*; taurine; high-starch; glucolipid metabolism; antioxidant

**Corresponding authors:** HU Yi. E-mail: [huyi740322@163.com](mailto:huyi740322@163.com);

ZHANG Junzhi. E-mail: [zhjun123@hunau.edu.cn](mailto:zhjun123@hunau.edu.cn)

**Funding projects:** National Nature Science Foundation of China (2019YFD0900200)