

He B W, Zhou Y P, He Y F, *et al.* Sodium butyrate addition in high-lipid diet on growth, digestive enzymes activity, immunity, and antioxidant capacity of heterophilic silver carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(12): 122512. [何伯伍, 周钰鹏, 何远法, 等. 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫生长、消化酶活性、免疫及抗氧化能力的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(12): 122512.]

## 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫生长、消化酶活性、免疫及抗氧化能力的影响

何伯伍<sup>1</sup> 周钰鹏<sup>1</sup> 何远法<sup>1,2</sup> 朱泰德<sup>1</sup> 李迎鹏<sup>1</sup> 李宗浩<sup>1</sup>  
郝 勇<sup>1</sup> 朱成科<sup>1</sup> 向 泉<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 402460; 2. 西南大学水产动物营养与饲料实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 为研究丁酸钠对高脂饲料饲喂异育银鲫幼鱼生长性能、消化酶活性、免疫水平及抗氧化能力的作用; 以初始体质量为 $(20.41 \pm 0.44)$  g的健康异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)幼鱼共计450尾作为研究对象, 饲喂丁酸钠含量为[0 (SB0)、0.1% (SB0.1)、0.3% (SB0.3)、0.6% (SB0.6)和1.2% (SB1.2)]的5种高脂饲料(粗脂肪含量为7.31%), 养殖周期为8周。实验结果显示: (1)在生长方面, SB0.3和SB0.6组异育银鲫的增重率(WGR)和特定生长率(SGR)比其余各组显著提高( $P < 0.05$ ), 且其余各组差异不显著( $P > 0.05$ ), 异育银鲫的WGR和SGR均在SB0.3组有最大值, 120.63%和1.41%/d; 饲料系数(FCR)随丁酸钠含量的增加呈先减后升的变化趋势( $P < 0.05$ ), 当丁酸钠添加水平为0.3%时, FCR有最小值1.60; 高脂饲料中添加丁酸钠显著提升了异育银鲫蛋白质沉积率( $P < 0.05$ )。 (2)与对照组相比, SB0.1、SB0.3、SB0.6和SB1.2组的肠道脂肪酶和淀粉酶活性显著升高( $P < 0.05$ ), 但SB0.3组的蛋白酶活性比对照组显著提高( $P < 0.05$ ), 且对照组与其余丁酸钠添加组之间无明显差异。 (3)在免疫及抗氧化方面, 异育银鲫血清中谷草转氨酶(AST)和谷丙转氨酶(ALT)活性随丁酸钠含量的上升呈先降低后升高的变化趋势( $P < 0.05$ ); 异育银鲫肝胰脏抗氧化酶活性随着丁酸钠含量的上升呈先升高后降低的变化趋势( $P < 0.05$ ), 而丙二醛(MDA)与上述变化趋势相反( $P < 0.05$ )。实验表明, 在高脂饲料中添加适量的丁酸钠可显著提升异育银鲫幼鱼对饲料的消化吸收能力, 增强免疫和抗氧化能力, 对鱼类的生长起到促进作用。通过生长性能二次回归分析, 结合消化酶活性、免疫及抗氧化能力得出丁酸钠的建议添加量为0.30%—0.67%。

**关键词:** 丁酸钠; 生长; 消化酶; 免疫; 抗氧化能力; 异育银鲫

中图分类号: S965.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2025)12-122512-10

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0165 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0165



水产动物对糖类物质的利用能力较低, 机体在各种生命活动中主要使用蛋白质和脂肪产生的能量<sup>[1]</sup>。然而, 部分蛋白质作为鱼体的能量供给, 其代谢产物会以氨氮的形式直接排入水中, 从而造成蛋白质资源浪费并污染水体环境<sup>[2]</sup>。近几年, 由于全世界鱼粉产量的降低和价格的飙升, 在集约化水产养殖中, 普遍采用提高饲料脂肪水平以节约蛋白质

的策略来减少鱼粉的使用, 从而降低饲料生产成本、减少鱼类养殖过程中氨氮的排放、维持养殖水体生态系统的动态平衡<sup>[3,4]</sup>。然而, 鱼类对脂肪的需求和利用能力受到不同种类脂肪源、不同生长阶段等条件的限制, 饲料中脂肪含量过高会导致鱼体摄食量的减少、抑制鱼类的生长发育、增加鱼体的脂肪蓄积<sup>[5]</sup>。研究发现, 在日粮中添加有机

收稿日期: 2025-05-17; 修订日期: 2025-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(32202951); 重庆市水产科技创新联盟(2023)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32202951); Chongqing Aquatic Science and Technology Innovation Alliance (2023)]

作者简介: 何伯伍(2000—), 男, 硕士研究生; 主要从事水产动物营养与饲料学研究。E-mail: 18683963950@163.com

通信作者: 向泉, E-mail: xiangx@126.com

酸,如乙酸、丙酸、丁酸等及其衍生物,可以增强动物体内脂肪的分解代谢,从而起到缓解脂肪沉积的作用<sup>[6,7]</sup>。丁酸在生物体内代谢的产物没有毒害作用,还具有一些特殊的营养功能,常被制作成稳定的钠盐用于水产动物饲料中<sup>[7]</sup>。大量研究表明,丁酸钠参与鱼体蛋白质和脂质的代谢,具有促进鱼类生长、增加肠绒毛面积、增强免疫及抗氧化能力等功能<sup>[8-10]</sup>。鱼类采食丁酸钠后会在肠道中释放出丁酸,丁酸在肠道细胞的线粒体中参与鱼体的生化反应从而产生大量ATP,因此,丁酸钠常被视为一种有效的能量物质添加到饲料中<sup>[9]</sup>。已有研究发现,日粮中添加适量的丁酸钠可以改善黄鳊(*Monopterus albus*)<sup>[11]</sup>、匙吻鲟(*Polyodon spathula*)<sup>[12]</sup>和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)<sup>[13]</sup>的肠道健康,在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)<sup>[14]</sup>、大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)<sup>[15]</sup>、鲤(*Cyprinus carpio*)<sup>[16]</sup>、卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)<sup>[17]</sup>、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)<sup>[18]</sup>和凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)<sup>[19]</sup>的研究中均发现丁酸钠可以显著提升其生长性能。不过,目前丁酸钠对高脂日粮导致的鱼类生长缓慢、脂肪堆积、抗氧化能力下降等问题是否具有缓解作用还有待考究。因此,本实验参考贺锡勤等<sup>[20]</sup>和石亚庆等<sup>[21]</sup>的研究得到鲫(*Carassius auratus*)最适脂肪需求范围为4.08%—5.10%,确定高脂饲料脂肪水平为7.31%,设置了不同水平的丁酸钠,推测在某一梯度范围内可能会对高脂饲料饲养的异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)生长、消化酶活性、免疫及抗氧化能力等具有改善或提升作用。本研究旨在为筛选提升高脂饲料利用率的绿色添加剂提供理论依据,以助力水产养殖产业健康发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验饲料

实验所需原料种类及饲料营养成分含量见表1,本实验以鱼粉、豆粕和菜粕为主要蛋白质原料,为避免脂肪源种类差异对异育银鲫肌肉营养成分的影响,选取大豆油为主要脂肪原料配制高脂饲料,分别添加[0% (SB0)、0.1% (SB0.1)、0.3% (SB0.3)、0.6% (SB0.6)和1.2% (SB1.2)]的丁酸钠(腾旺生物科技有限公司,有效成分不低于98%)配制成5种等氮等能的高脂饲料<sup>[6]</sup>。所有饲料原料选购于重庆斯特佳生物科技股份有限公司,将所需饲料原料均粉碎过60目筛,依据饲料配方比例称重,通过逐级扩大法混匀,再用小型膨化饲料机(山东鑫嘉强机械设备有限公司,125型)制成沉性颗粒饲料粒径[2.0 mm,

膨化温度(80—90)℃],在60℃条件下烘干4h,为防止饲料霉变,将制备好的饲料低温保存。

### 1.2 饲养管理

实验用异育银鲫购自重庆市荣昌区淡水鱼养殖场,购回后将实验鱼先用食盐水(质量分数为3%)浸泡10—13min,再转入清洗并用高锰酸钾溶液消毒后的暂养池(位于西南大学水产学院蠡园实习基

表1 高脂饲料营养组成及原料成分

Tab. 1 Nutritional composition and raw material components of high-fat feed (%)

| 实验原料Experimental material                             | 成分含量Ingredient content |
|-------------------------------------------------------|------------------------|
| 鱼粉Fish meal                                           | 14.00                  |
| 豆粕Soybean meal                                        | 19.00                  |
| 菜粕Rapeseed meal                                       | 14.00                  |
| 棉粕Cottonseed meal                                     | 10.00                  |
| 玉米蛋白粉Corn gluten meal                                 | 8.00                   |
| 肉粉Meat meal                                           | 6.00                   |
| 面粉Wheat flour                                         | 15.00                  |
| 麸皮Wheat bran                                          | 5.00                   |
| 大豆油Soybean oil                                        | 4.00                   |
| DL-蛋氨酸DL-Met                                          | 0.50                   |
| L-赖氨酸L-Lys                                            | 0.50                   |
| 磷酸二氢钙Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> | 1.00                   |
| 氯化胆碱Choline chloride                                  | 1.00                   |
| 复合预混料Premix <sup>1</sup>                              | 2.00                   |
| 总计Total                                               | 100.00                 |
| 饲料营养成分Feed nutrient <sup>2</sup>                      |                        |
| 粗蛋白Crude protein                                      | 39.98                  |
| 粗脂肪Crude lipid                                        | 7.31                   |
| 粗灰分Crude ash                                          | 9.53                   |
| 水分Moisture                                            | 9.83                   |

注: <sup>1</sup>实验中使用的预混料包含了日粮所提供的维生素和微量元素,采购自重庆斯特佳生物科技股份有限公司,每kg饲料中含有以下各种化学物质:维生素A 3000 IU,维生素C 500 mg/kg,维生素D<sub>3</sub> 1000 IU,维生素E 100 mg/kg,维生素K<sub>3</sub> 20 mg/kg,维生素B<sub>1</sub> 10 mg/kg,维生素B<sub>2</sub> 20 mg/kg,维生素B<sub>6</sub> 20 mg/kg,维生素B<sub>12</sub> 0.05 mg/kg,肌醇 400 mg/kg,烟酸 200 mg/kg,泛酸钙 100 mg/kg,叶酸 10 mg/kg,生物素 2 mg/kg;微量元素碘化钾 0.02 mg/kg,一水硫酸锰 4 mg/kg,亚硒酸钠 0.08 mg/kg,五水硫酸铜 2 mg/kg,六水硫酸钴 0.1 mg/kg,七水硫酸锌 22 mg/kg,七水硫酸亚铁 40 mg/kg,七水硫酸镁 25 mg/kg;<sup>2</sup>饲料营养成分为实测值

Note: <sup>1</sup>The premix used in the experiment includes vitamins and trace elements provided by the diet, purchased from Chongqing Stejia Biotechnology Co., Ltd. where the content of various chemical substances per kilogram of feed is VA 3000 IU, VC 500 mg/kg, VD<sub>3</sub> 1000 IU, VE 100 mg/kg, VK<sub>3</sub> 20 mg/kg, VB<sub>1</sub> 10 mg/kg, VB<sub>2</sub> 20 mg/kg, VB<sub>6</sub> 20 mg/kg, VB<sub>12</sub> 0.05 mg/kg, inositol 400 mg/kg, nicotinic acid 200 mg/kg, calcium pantothenate 100 mg/kg, folic acid 10 mg/kg, biotin 2 mg/kg, KI 0.02 mg/kg, MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 4 mg/kg, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 0.08 mg/kg, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 2 mg/kg, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.1 mg/kg, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 22 mg/kg, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 40 mg/kg, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 25 mg/kg; <sup>2</sup>The nutritional content of feed is measured in values

地)。在暂养1周后, 异育银鲫可以稳定摄食膨化颗粒饲料, 挑选初始体质量为 $(20.41 \pm 0.44)$  g 体况良好的异育银鲫幼鱼450尾, 将其随机划分为5个实验组, 每组设3个重复, 以重复为单位将450尾实验鱼平均养殖在15个水族箱( $1.10 \text{ m} \times 0.41 \text{ m} \times 0.38 \text{ m}$ )中, 分别投喂5种不同丁酸钠含量的高脂饲料, 养殖时间为8周。实验期间, 日投饲量约为鱼体质量的3%, 分别在06:30、12:30和18:30三个时间点进行1次表观饱食投喂, 每天早上进行1次吸污和换水。在室内饲养过程中始终保持微流水养殖, 仔细观察鱼体健康状况、摄食行为, 并记录死亡数量、水温、溶氧等; 此外, 整个实验过程中水温维持在 $(20\text{—}25)^\circ\text{C}$ 、pH 7.0—7.5, 溶解氧含量高于 $6.0 \text{ mg/L}$ , 水体氨氮浓度低于 $0.20 \text{ mg/L}$ , 亚硝酸盐含量不超过 $0.10 \text{ mg/L}$ 。

### 1.3 样品采集

在暂养期间, 取6尾实验鱼保存于 $-20^\circ\text{C}$ 冰柜中, 后续用于测定初始鱼体常规营养成分。在养殖8周后, 对各组实验鱼进行24h饥饿处理, 并对所有异育银鲫进行称重和计数。每个重复共计取6尾鱼用MS-222 ( $50 \text{ mg/L}$ )麻醉处理, 待鱼体麻醉昏迷后, 取其中的3尾鱼用于鱼体终末营养成分测定。另取3尾鱼测量体长、体重后, 用 $1.5 \text{ mL}$ 注射器采集尾静脉血液样本在室温下静置2h凝结, 然后将血液样本离心 $10 \text{ min}$  ( $4^\circ\text{C}$ ,  $3600 \text{ r/min}$ ), 用滴管吸出上层液体保存在超低温冰箱( $-80^\circ\text{C}$ )中, 用于后续测定血清生化指标; 采血后, 迅速解剖分离出实验鱼的肝胰脏、肠道, 取部分组织样品称重。其中, 将取出的肝胰脏加入适量生理盐水处理, 匀浆后置于离心机( $4^\circ\text{C}$ ,  $3000 \text{ r/min}$ )中离心 $15 \text{ min}$ , 采用与血清生化指标同样的取样和保存方式, 以便测定肝脏抗氧化酶活性; 另外选取中肠样本作为肠道消化酶活性的评价指标。最后, 取实验鱼侧线以上的背部肌肉冷冻保存, 用于测定其肌肉营养成分。

### 1.4 测定指标和方法

**生长性能以及全鱼、肌肉常规营养成分** 对各实验组异育银鲫的饲料、肌肉、全鱼样品进行常规营养成分的分析, 取部分样品在 $105^\circ\text{C}$ 条件下恒温烘干, 以测定水分含量, 粗脂肪含量的测定采用索氏提取法, 粗灰分含量的测定采用马弗炉高温灼烧法, 粗蛋白含量的测定采用凯氏定氮法<sup>[22, 23]</sup>, 各项指标计算公式:

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

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

$$\text{饲料系数(FCR)} = F / (W_t - W_0)$$

$$\text{成活率(SR, \%)} = 100 \times N_t / N_0$$

$$\text{饱满度(CF, g / cm}^3\text{)} = 100 \times W_t / L^3$$

$$\text{肝胰脏指数(HSI)} = 100 \times W_h / W_t$$

$$\text{某营养物质沉积率(\%)} = 100 \times [W_t \times \text{终末全鱼某营养物质含量}(\%) - W_0 \times \text{初始全鱼某营养物质含量}(\%)] / [F \times \text{饲料中某营养物质含量}(\%)]$$

式中,  $W_0$ 为实验鱼初始体质量(g);  $W_t$ 为实验鱼终末体质量(g);  $t$ 为实验时间(d);  $F$ 为饲料摄入总质量(g);  $L$ 为鱼体长(cm);  $W_h$ 为鱼体肝胰脏质量;  $N_0$ 为实验开始时鱼的尾数(尾);  $N_t$ 为实验结束时鱼的尾数(尾)。

### 肠道消化酶、血清及抗氧化酶活性的测定

肠道消化酶活性的测定需取部分中肠加入适量生理盐水, 在离心机中离心 $10 \text{ min}$  ( $4^\circ\text{C}$ ,  $3500 \text{ r/min}$ ), 吸取上层透明液体保存于 $4^\circ\text{C}$ 条件下备用, 所有肠道消化酶样品均在 $12 \text{ h}$ 内完成测定; 需测定的血清生化及抗氧化酶活性指标均采用与肠道酶活同样的匀浆方法测定, 选取指标: 谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(ALT)、碱性磷酸酶(AKP)、超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽硫转移酶(GST)、还原型谷胱甘肽(GSH)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)等。测定所需试剂盒均为南京建成生物工程研究所生产, 严格按照使用说明进行操作。

### 1.5 数据处理

实验数据使用SPSS 26.0统计模型进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 对组间差异显著的实验组运用Duncan检验方法进行多重比较, 差异显著水平设为 $P < 0.05$ , 统计结果平均值 $\pm$ 标准差表示, 此外, 运用非线性回归分析得到的最适添加量二次函数对异育银鲫的WGR、SGR、FCR与丁酸钠添加水平的关系进行分析。

## 2 结果

### 2.1 生长性能

异育银鲫的WGR和SGR均呈先升高后降低的变化趋势, 随丁酸钠含量的增加而升高。SB0.3组的WGR和SGR分别达到 $120.63\%$ 和 $1.41\% / \text{d}$ 的最大值, 明显高于除 $0.6\%$ 丁酸钠组其他组( $P < 0.05$ ); FCR则呈相反的变化趋势, 且当丁酸钠含量为 $0.3\%$ 时有最优值 $1.60$ , 显著低于除SB0.6组外的各实验组( $P < 0.05$ ); 异育银鲫的SR、CF和HSI在各组之间差异均不显著( $P > 0.05$ )。对异育银鲫的WGR、SGR、FCR做进一步的数据分析, 通过二次回归模型构建以上三个指标与丁酸钠添加水平的关系。其中, 异育银鲫增重率( $Y_1$ )、特定生长率( $Y_2$ )与饲料丁酸钠添加水平( $X$ )的二次回归方程分别为 $Y_1 = -45.347X^2 + 59.015X + 102.06$  ( $R^2 = 0.8543$ ; 图1),  $Y_2 = -0.3655X^2 +$

$0.4788X+1.2582$  ( $R^2=0.8441$ ; 图2)。从图1和图2中可看出异育银鲫的增重率、特定生长率最佳时丁酸钠的添加水平均为0.65%; 异育银鲫饲料系数( $Y_3$ )与丁酸钠添加水平( $X$ )的二次回归方程为 $Y_3=0.5116X^2-0.6877X+1.8122$  ( $R^2=0.8558$ ; 图3), 由图3可知异育银鲫的饲料系数最小时丁酸钠的添加水平为0.67%。因此, 以生长性能差异显著的增重率、特定生长率和饲料系数二次回归分析得到的

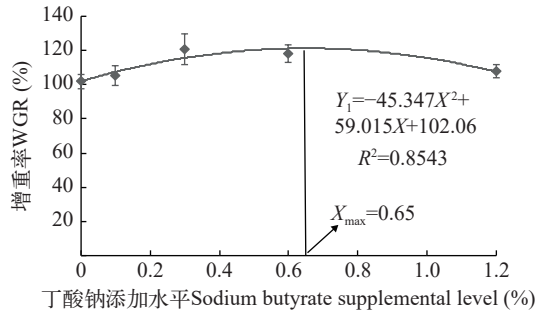


图1 丁酸钠添加水平与异育银鲫增重率的关系

Fig. 1 Relationship between the level of sodium butyrate on the weight gain rate of *C. auratus gibelio*

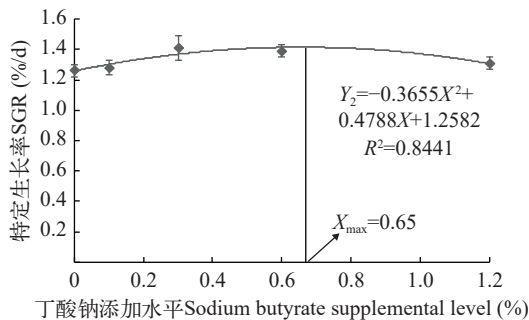


图2 丁酸钠添加水平与异育银鲫特定生长率的关系

Fig. 2 Relationship between the level of sodium butyrate to the specific growth rate of *C. auratus gibelio*

丁酸钠适宜添加量为0.65%—0.67%(表2)。

## 2.2 全鱼、肌肉营养成分含量和营养物质沉积率

随丁酸钠含量的升高, 异育银鲫幼鱼蛋白质沉积率呈先升高后降低的变化趋势, 与对照组相比, 丁酸钠添加组蛋白质沉积率均明显增大( $P<0.05$ ), 且丁酸钠添加组中的SB0.6组显著高于其他组( $P<0.05$ ); 丁酸钠含量对鱼体粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、脂肪沉积率、灰分沉积率及水分均无显著影响( $P>0.05$ ; 表3)。

## 2.3 肠道消化酶活性

异育银鲫肠道蛋白酶活性、淀粉酶活性、脂肪酶活性随丁酸钠水平的增加呈先上升后趋于稳定的变化趋势。其中SB0.3组的蛋白酶活性显著高于其余各实验组( $P<0.05$ ); 而脂肪酶和淀粉酶活性在丁酸钠含量为0.1%—1.2%时差异不显著( $P>0.05$ ), 但比对照组有明显提高( $P<0.05$ ; 表4)。

## 2.4 血清生化指标

异育银鲫血清中AST和ALT活性随丁酸钠含量升高呈先降低后升高的变化趋势, 且均在丁酸钠含量为0.6%时显著低于其他组( $P<0.05$ ); 而AKP活

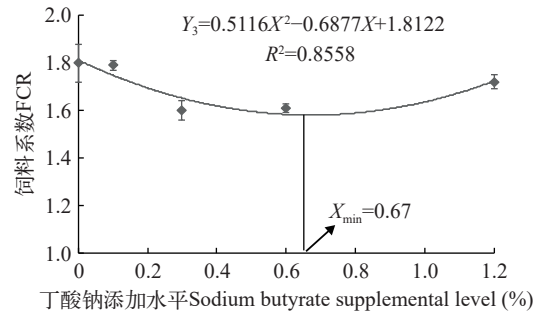


图3 丁酸钠添加水平与异育银鲫饲料系数的关系

Fig. 3 Relationship between the level of sodium butyrate to the feed conversion ratio of *C. auratus gibelio*

表2 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫生长性能的影响

Tab. 2 Effect of sodium butyrate addition in high-fat feed on growth performance of *C. auratus gibelio*

| 指标Index                    | 丁酸钠添加水平Sodium butyrate supplemental level (%) |                          |                          |                          |                          |
|----------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                            | SB0                                           | SB0.1                    | SB0.3                    | SB0.6                    | SB1.2                    |
| 初始体质量IBW (g)               | 20.72±0.58                                    | 20.45±0.56               | 20.32±0.92               | 20.57±0.33               | 20.86±0.28               |
| 终末体质量FBW (g)               | 41.82±0.38 <sup>c</sup>                       | 41.96±0.61 <sup>c</sup>  | 44.78±0.20 <sup>a</sup>  | 44.86±0.32 <sup>a</sup>  | 43.39±0.36 <sup>b</sup>  |
| 增重率WGR (%)                 | 101.96±4.12 <sup>b</sup>                      | 105.22±5.77 <sup>b</sup> | 120.63±9.00 <sup>a</sup> | 118.14±4.97 <sup>a</sup> | 108.04±3.95 <sup>b</sup> |
| 特定生长率SGR (%/d)             | 1.26±0.04 <sup>b</sup>                        | 1.28±0.05 <sup>b</sup>   | 1.41±0.08 <sup>a</sup>   | 1.39±0.04 <sup>a</sup>   | 1.31±0.04 <sup>b</sup>   |
| 饲料系数FCR                    | 1.80±0.08 <sup>a</sup>                        | 1.79±0.02 <sup>ab</sup>  | 1.60±0.04 <sup>c</sup>   | 1.61±0.02 <sup>c</sup>   | 1.72±0.03 <sup>b</sup>   |
| 成活率SR (%)                  | 84.13±5.50                                    | 92.07±2.75               | 87.30±2.75               | 88.89±7.28               | 85.71±0.00               |
| 肥满度CF (g/cm <sup>3</sup> ) | 3.49±0.26                                     | 3.65±0.13                | 3.71±0.08                | 3.70±0.18                | 3.54±0.10                |
| 肝胰脏指数HSI                   | 3.61±0.40                                     | 3.82±0.11                | 4.20±0.13                | 4.31±0.15                | 3.83±0.43                |

注: 表中不同小写字母(a、b、c)表示各组之间有显著差异( $P<0.05$ ), 各行指标中相同的字母以及未标注字母表示组间差异不显著( $P>0.05$ ); 下同

Note: Different lowercase letters (a, b, and c) in the table indicate significant differences ( $P<0.05$ ), and the same or unmarked letters indicate no significant differences ( $P>0.05$ ); the same applies below

性则随丁酸钠含量升高则呈相反的变化趋势,并在饲料中丁酸钠含量为0.6%时显著高于其余各实验组( $P<0.05$ ;表5)。

2.5 肝胰脏抗氧化指标

随着丁酸钠含量升高,异育银鲫幼鱼肝胰脏中GST、CAT、SOD和GSH-Px的活性及GSH含量均呈先上升后降低的变化趋势;其中,在SB0.6组中SOD和GSH-Px活性最高。GST和CAT活性及GSH含量则在SB0.3组最高,而丙二醛含量则随丁酸钠含量的上升呈相反的变化趋势,在SB0.6组时含量最低(表6)。

3 讨论

3.1 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫生长、体成分的影响

脂肪参与鱼体的生长、发育和正常的生理代谢,可为鱼类的生命活动提供必需的营养物质。适宜的饲料脂肪水平在一定程度上可促进鱼类生长、提高蛋白质利用率、降低饲料系数从而减少养殖成本<sup>[24—28]</sup>。石亚庆等<sup>[21]</sup>分别用饲料脂肪水平

为4.5%的低脂饲料和7.0%的高脂饲料饲喂湘云鲫(*Carassius auratus tripl*),发现高脂组会显著降低全鱼粗蛋白含量、提高全鱼粗脂肪含量。据报道,丁酸及其衍生物具有降低机体脂肪含量、加快脂肪分解代谢、缓解高脂日粮诱导的肥胖等的作用<sup>[6]</sup>。张媛媛等<sup>[29]</sup>的实验表明,丁酸钠可显著提升摄食高脂饲料的鲤的生长性能,且显著降低全鱼粗脂肪含量。Sil等<sup>[19]</sup>对凡纳滨对虾的实验发现,0.2%的丁酸盐水平可以显著提高凡纳滨对虾的成活率和增重率,降低饲料系数。丁酸钠可显著提升美洲鳗鲡(*Anguilla rostrata*)<sup>[30]</sup>、罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)<sup>[31]</sup>、湘云鲫<sup>[32]</sup>、大口黑鲈<sup>[15]</sup>的增重率和特定生长率。在本研究中,丁酸钠对异育银鲫生长性能有明显改善作用,饲料系数降低,与上述实验基本类似。分析原因,首先可能是丁酸钠在水产动物肠道中以游离丁酸的形式存在,丁酸作为一种短链脂肪酸进入肠道细胞的线粒体,在乙酰辅酶A的作用下进行 $\beta$ 氧化,参与三羧酸循环,产生的ATP为肠道细胞的增殖分化提供能量,以促进肠道上皮细胞的生长和代谢<sup>[9]</sup>。其次,Hara等<sup>[33]</sup>实验发现,GPR43和

表3 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫全鱼、肌肉组成和营养物质沉积率的影响

Tab. 3 Effect of sodium butyrate addition in high-fat feed on whole fish, muscle composition, and nutrient deposition rate of *C. auratus gibelio*

| 指标Index                         | 丁酸钠添加水平Sodium butyrate supplemental level (%) |                         |                         |                         |                         |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                 | SB0                                           | SB0.1                   | SB0.3                   | SB0.6                   | SB1.2                   |
| 全鱼Whole fish                    |                                               |                         |                         |                         |                         |
| 粗蛋白Crude protein                | 14.88±0.12                                    | 14.97±0.07              | 14.76±0.57              | 14.95±0.32              | 14.71±0.26              |
| 粗脂肪Crude lipid                  | 6.47±0.21                                     | 6.17±0.12               | 6.45±0.08               | 6.29±0.19               | 6.34±0.18               |
| 粗灰分Ash                          | 3.12±0.35                                     | 3.08±0.26               | 2.97±0.77               | 3.03±0.68               | 2.84±0.83               |
| 水分Moisture                      | 71.89±0.47                                    | 72.43±0.78              | 72.16±0.13              | 71.97±61                | 72.08±0.44              |
| 肌肉Muscle                        |                                               |                         |                         |                         |                         |
| 粗蛋白Crude protein                | 17.17±0.85                                    | 17.55±0.56              | 17.73±0.12              | 17.76±0.20              | 17.84±0.20              |
| 粗脂肪Crude lipid                  | 2.73±0.04                                     | 2.72±0.05               | 2.71±0.03               | 2.70±0.2                | 2.71±0.08               |
| 粗灰分Ash                          | 1.50±0.06                                     | 1.47±0.08               | 1.47±0.09               | 1.52±0.09               | 1.50±0.07               |
| 水分Moisture                      | 76.66±1.52                                    | 76.93±0.36              | 76.83±0.55              | 76.72±0.48              | 76.88±2.52              |
| 营养物质沉积率Nutrient deposition rate |                                               |                         |                         |                         |                         |
| 蛋白质沉积率PRE                       | 23.54±0.61 <sup>c</sup>                       | 24.53±0.50 <sup>b</sup> | 27.00±0.21 <sup>a</sup> | 28.02±0.34 <sup>a</sup> | 25.98±0.32 <sup>b</sup> |
| 脂肪沉积率LRE                        | 67.66±0.60                                    | 64.94±0.84              | 61.11±1.08              | 60.39±0.47              | 64.19±0.35              |
| 灰分沉积率ARE                        | 14.29±0.05                                    | 14.36±0.42              | 14.30±0.30              | 14.27±0.33              | 14.21±0.28              |

表4 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫肠道消化酶活性的影响

Tab. 4 Effect of sodium butyrate addition in high-fat feed on intestinal digestive enzymes activity of *C. auratus gibelio*

| 指标Index (U/mg prot)    | 丁酸钠添加水平Sodium butyrate supplemental level (%) |                            |                            |                            |                            |
|------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                        | SB0                                           | SB0.1                      | SB0.3                      | SB0.6                      | SB1.2                      |
| 蛋白酶活性Protease activity | 2489.07±166.70 <sup>b</sup>                   | 2483.52±75.84 <sup>b</sup> | 2850.19±72.29 <sup>a</sup> | 2690.93±88.95 <sup>b</sup> | 2539.07±53.38 <sup>b</sup> |
| 淀粉酶活性Amylase activity  | 114.45±9.77 <sup>b</sup>                      | 137.84±7.69 <sup>a</sup>   | 140.30±9.77 <sup>a</sup>   | 131.68±5.64 <sup>a</sup>   | 135.38±11.28 <sup>a</sup>  |
| 脂肪酶活性Lipase activity   | 421.67±38.19 <sup>b</sup>                     | 481.67±31.22 <sup>a</sup>  | 472.22±18.73 <sup>a</sup>  | 462.22±14.37 <sup>a</sup>  | 458.89±29.64 <sup>a</sup>  |

GPR41是游离短链脂肪酸的重要受体蛋白,在动物肠道及肠道以外的组织和器官中均广泛存在。丁酸通过激活GPR43从而提升机体脂肪酶 $cpt1$ 和 $cpt2$ 的mRNA水平,这两种酶都是线粒体脂肪氧化过程中的限速酶,可促进组织脂肪氧化和能量消耗从而控制机体能量的利用率,对于维持能量平衡具有重要作用<sup>[6,34]</sup>。丁酸钠调控脂肪分解代谢产生的能量增强了肠道组织细胞对各种营养物质的吸收能力<sup>[31,35]</sup>,促进鱼类的生长。然而,本实验中丁酸钠水平为1.2%时,异育银鲫的增重率和特定生长率反而下降的原因可能是高脂日粮中过量的丁酸钠增加了肠道的负担,影响其吸收利用营养物质,反而降低了饲料利用率。因此,适当地添加丁酸钠可有效促进鱼类生长,增强脂肪氧化供能。

### 3.2 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫消化酶活性的影响

鱼类肠道是消化吸收养分的重要器官,无胃鱼类的物理消化能力较差、肠道消化酶的化学性消化对饲料营养物质的消化起到了关键性作用,所以消化酶活性在一定程度上体现了机体消化利用各种营养物质的能力<sup>[9]</sup>。Gou等<sup>[23]</sup>的研究发现,高脂日粮中添加适量的丁酸钠对多鳞白甲鱼(*Onychostoma macrolepis*)肠道蛋白酶和脂肪酶活性具有显著提升作用。Tian等<sup>[14]</sup>在草鱼饲料中分别添加适量的丁酸钠,其肠道消化酶活性显著提高。本实验发现,异育银鲫随着丁酸钠的添加水平上升,肠道消化酶活性呈先升后降的趋势,与上述实验结果类似。这表明丁酸钠可直接作用于鱼类肠道、提高消化酶活性,加强对饲料脂肪的分解代谢,减少脂

肪沉积。孙浪等<sup>[31]</sup>和Nakanishi等<sup>[36]</sup>对鲫的研究发现,丁酸钠可显著提升肠道 $APN$ 和 $GDH$ 基因的相对表达量,这两种酶可间接反映鱼类对蛋白质的消化吸收能力。其中, $APN$ 在鱼类肠道中参与多肽链N端的水解,可释放大游离的氨基酸, $GDH$ 将水解后的氨基酸进行脱氨作用重新合成机体需要的肽链和多肽类物质。Liu等<sup>[37]</sup>和Shimakura等<sup>[38]</sup>发现, $PepTI$ 基因在鲫肠绒毛中大量表达,丁酸钠通过上调 $PepTI$ 基因的表达进而加快小肽分子转运吸收到肠道细胞中,与 $APN$ 及 $GDH$ 基因共同调控机体蛋白质和氨基酸代谢,加强鱼类肠道对蛋白质的吸收和利用。同时,高脂饲料为鱼类提供了充足的脂肪酸原料,可减少作为能源物质的蛋白质消耗,进一步说明丁酸钠促进肠道细胞的生长发育,增强了肠道细胞对饲料蛋白质的吸收,显示脂肪节约蛋白质的作用<sup>[4]</sup>。

### 3.3 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫非特异性免疫力的影响

在鱼类免疫系统中,非特异性免疫具有重要作用,而肝脏作为鱼类的免疫器官调控着机体营养物质的代谢<sup>[39]</sup>。AST和ALT活性间接反映了鱼体肝脏的损伤情况,当肝脏细胞受到损伤时,它们被大量释放进入血液中<sup>[9]</sup>;血清AKP可破坏活性清除侵入机体的异物,是衡量机体免疫力的一项重要指标<sup>[40]</sup>。Shalata等<sup>[41]</sup>发现,用添加丁酸钠的饲料喂尼罗罗非鱼后,使其血清AST活性显著降低。徐凯慧等<sup>[9]</sup>研究表明,饲料中添加(1—2) g/kg的丁酸钠显著降低了草鱼血清中AST和ALT活性,提高AKP的活性。在本实验中,添加丁酸钠能使异育银鲫血清中

表5 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫血清生化指标的影响

Tab. 5 Effect of sodium butyrate addition in high-fat feed on serum biochemical indicators of *C. auratus gibelio*

| 指标Index (U/L) | 丁酸钠添加水平Sodium butyrate supplemental level (%) |                          |                          |                           |                          |
|---------------|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|               | SB0                                           | SB0.1                    | SB0.3                    | SB0.6                     | SB1.2                    |
| 谷草转氨酶AST      | 575.80±11.09 <sup>a</sup>                     | 551.63±6.58 <sup>b</sup> | 534.20±8.76 <sup>b</sup> | 503.27±16.98 <sup>c</sup> | 537.11±7.31 <sup>b</sup> |
| 谷丙转氨酶ALT      | 15.14±0.73 <sup>a</sup>                       | 14.41±0.38 <sup>ab</sup> | 13.26±0.87 <sup>b</sup>  | 10.56±0.98 <sup>c</sup>   | 14.49±0.65 <sup>ab</sup> |
| 碱性磷酸酶AKP      | 1.79±0.06 <sup>a</sup>                        | 1.81±0.12 <sup>a</sup>   | 1.92±0.12 <sup>a</sup>   | 2.24±0.11 <sup>b</sup>    | 1.87±0.09 <sup>a</sup>   |

表6 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫肝胰脏抗氧化指标的影响

Tab. 6 Effect of sodium butyrate addition in high-fat feed on hepatopancreas antioxidant indicators of *C. auratus gibelio*

| 指标Index                     | 丁酸钠添加水平Sodium butyrate supplemental level (%) |                            |                            |                            |                           |
|-----------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                             | SB0                                           | SB0.1                      | SB0.3                      | SB0.6                      | SB1.2                     |
| 过氧化氢酶CAT (U/mg prot)        | 8.3±0.72 <sup>c</sup>                         | 10.02±0.83 <sup>b</sup>    | 11.02±0.07 <sup>a</sup>    | 10.47±0.27 <sup>ab</sup>   | 10.02±0.31 <sup>b</sup>   |
| 超氧化物歧化酶SOD (U/mg prot)      | 91.79±3.15 <sup>d</sup>                       | 120.35±9.99 <sup>c</sup>   | 144.97±11.29 <sup>b</sup>  | 162.83±5.35 <sup>a</sup>   | 154.2±7.05 <sup>ab</sup>  |
| 谷胱甘肽过氧化物酶GSH-Px (U/mg prot) | 255.75±63.54 <sup>d</sup>                     | 537.36±123.83 <sup>c</sup> | 612.07±68.97 <sup>bc</sup> | 810.34±461.27 <sup>a</sup> | 632.18±55.42 <sup>b</sup> |
| 谷胱甘肽硫转移酶GST (U/mg prot)     | 0.41±0.12 <sup>d</sup>                        | 0.79±0.04 <sup>bc</sup>    | 1.09±0.12 <sup>a</sup>     | 0.68±0.08 <sup>c</sup>     | 0.53±0.08 <sup>cd</sup>   |
| 谷胱甘肽GSH (μmol/g prot)       | 14.05±1.17 <sup>d</sup>                       | 18.23±2.18 <sup>b</sup>    | 33.17±2.86 <sup>a</sup>    | 16.48±0.47 <sup>c</sup>    | 15.8±4.71 <sup>cd</sup>   |
| 丙二醛MDA (nmol/mL prot)       | 169.89±6.71 <sup>a</sup>                      | 136.56±4.93 <sup>b</sup>   | 123.65±11.33 <sup>cd</sup> | 108.6±15.25 <sup>d</sup>   | 129.03±17.96 <sup>c</sup> |

的AST和ALT活性明显降低, 提升AKP活性, 与上述研究结果类似。分析原因, 一方面饲料中较高的脂肪水平引起了鱼类的应激, 机体通过调节代谢途径来缓解这种应激状态, 从而导致鱼体血清中AST和ALT活性增加, 而丁酸钠提高了鱼体内的能量利用效率, 通过促进脂肪酸氧化和代谢减轻肝脏的负担, 降低AST和ALT的活性<sup>[15]</sup>。另一方面, 可能是丁酸钠抑制NF- $\kappa$ B的释放并阻断其在细胞质和细胞核中的转移, 降低了TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\beta$ 和IL-8等炎症因子的相对表达量, 而机体非特异性免疫系统通过提升AKP活性来减轻高脂饲料引起的炎症反应, 从而减少肝脏以及其他组织器官的损伤<sup>[42]</sup>。这说明适宜的丁酸钠有利于增强肝脏的解毒功能, 提高其非特异性免疫力。

### 3.4 高脂饲料中添加丁酸钠对异育银鲫抗氧化能力的影响

细胞的氧化损伤与鱼体产生过量的羟自由基、超氧根离子等活性氧有关, 这些物质会导致机体蛋白质、脂质及细胞遗传物质的氧化性损伤, 鱼类主要通过提高抗氧化酶的活性或产生抗氧化物质来缓解这种损伤<sup>[43, 44]</sup>。生物抗氧化防御系统中的关键物质包括SOD、CAT、GST、GSH-Px和GSH等, 它是考核鱼类抗氧化能力的一个重要指标。同时, MDA是自由基参与脂质发生过氧化反应的最终产物, 其含量大小与肝脏细胞脂质氧化损伤成正相关性<sup>[40]</sup>。张媛媛等<sup>[29]</sup>发现, 当饲料脂肪含量过高时, 肝脏抗氧化能力不足, 脂肪细胞被氧化使得鲤肝脏产生大量MDA, 在丁酸钠添加组中这种现象得到改善, 同时, 血清CAT、SOD活性均有显著增加。Gou等<sup>[23]</sup>研究发现高脂饲料中添加0.2%—0.4%的丁酸钠显著提升了多鳞白甲鱼肠道SOD的活性, 降低了MDA含量。对鳗(*Anguilla anguilla*)<sup>[30]</sup>、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[43]</sup>、黄鳝<sup>[11]</sup>、斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)<sup>[44]</sup>的实验均表明丁酸钠具有提高鱼类抗氧化酶活性、增强其抗氧化能力的积极作用。本研究发现, 高脂饲料中添加适量的丁酸钠能显著提升异育银鲫肝脏抗氧化酶活性, 这与上述实验结果基本一致。分析原因: 其一, 可能是丁酸钠通过降低内源性活性氧(ROS)和蛋白质羟基的含量来减少体内的自由基, 缓解高脂产生的氧化应激, 同时, 增加抗超氧阴离子及抗羟基自由基来提高CAT、SOD、GSH-Px等抗氧化酶活力<sup>[44]</sup>, 从而减轻脂质的过氧化损伤。其二, 高水平脂肪饲料能够抑制与GST相关基因如GSTO-1、GSTO-2、GSTR等的表达来降低其活性<sup>[10, 45]</sup>, 而丁酸钠可激活H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>诱导IPEC-J2细胞中的AMPK/线粒体自噬途

径提高GST等酶的mRNA表达水平, 减少MDA的产生; 鱼体通过减少线粒体细胞色素C的释放以提高组织的抗氧化能力<sup>[32]</sup>。此外, GSH可在电子和质子的传递作用下实现清除氧自由基、增强免疫和解毒等功能<sup>[46]</sup>。添加丁酸钠后GSH含量显著提高可能是因为丁酸钠可以激活Nrf2基因, 而Nrf2基因可在应激条件下来调节解毒基因表达, 从而增强GSH的抗氧化作用<sup>[47, 48]</sup>。综上所述, 在饲料中添加丁酸钠, 能有效缓解异育银鲫在高脂压力下受到的氧化损害, 以维持肝脏的氧化还原稳态。

## 4 结论

在本实验条件下, 适宜的丁酸钠水平能显著提高异育银鲫消化酶活性、增强免疫及抗氧化能力、加强饲料脂肪的氧化供能从而促进生长。通过生长性能指标增重率、特定生长率、饲料系数二次回归分析并结合消化酶活性、免疫及抗氧化指标得到丁酸钠的适宜添加量为0.3%—0.67%。若要进一步得到丁酸钠的最佳添加量, 未来可在这一梯度范围开展更多实验, 本研究结果可为筛选提升高脂饲料利用率的绿色添加剂提供理论依据。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

## 参考文献:

- [1] Chou B S, Shiau S Y. Optimal dietary lipid level for growth of juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus*  $\times$  *Oreochromis aureus* [J]. *Aquaculture*, 1996, **143**(2): 185-195.
- [2] Xiang X, Zeng B H, Yang L X, et al. Effects of high-lipid diet supplemented with bile acid on growth performance, muscle nutritional component contents, digestive enzyme activities and serum biochemical indices of juvenile *Schizothorax prenanti* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, **31**(11): 5089-5099. [向泉, 曾本和, 杨理想, 等. 高脂饲料中添加胆汁酸对齐口裂腹鱼幼鱼生长性能、肌肉营养成分含量、消化酶活性及血清生化指标的影响 [J]. *动物营养学报*, 2019, **31**(11): 5089-5099.]
- [3] De Silva S S, Gunasekera R M, Shim K F. Interactions of varying dietary protein and lipid levels in young red *Tilapia*: Evidence of protein sparing [J]. *Aquaculture*, 1991, **95**(3/4): 305-318.
- [4] Xiang X, Zeng B H, Wang R, et al. Effects of dietary bile acid on lipid deposition, lipid metabolism enzyme activities and related gene expression to juvenile *Schizothorax prenanti* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, **46**(6): 1045-1052. [向泉, 曾本和, 王睿, 等. 胆汁酸对齐口裂腹鱼幼鱼脂肪沉积、脂肪代谢酶活性及相关基因表达的影响 [J]. *水产学报*, 2022, **46**(6): 1045-1052.]
- [5] Ling S C, Wu K, Zhang D G, et al. Endoplasmic reticulum stress-mediated autophagy and apoptosis alleviate dietary fat-induced triglyceride accumulation in the intes-

- tine and in isolated intestinal epithelial cells of yellow catfish [J]. *The Journal of Nutrition*, 2019, **149**(10): 1732-1741.
- [6] Lu Y, Fan C, Li P, *et al.* Short chain fatty acids prevent high-fat-diet-induced obesity in mice by regulating G protein-coupled receptors and gut microbiota [J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 37589.
- [7] Tang X, Tang J, Zhou Y, *et al.* Effects of sodium butyrate stimulation on immune-related mRNA-miRNA network in intestine of grass carp [J]. *Aquaculture Research*, 2021, **52**(1): 309-322.
- [8] Yamamoto F Y, Older C E, Hume M E, *et al.* Effects of butyrate, propionate, and their combination *in vitro*, and the impacts of their supplementation in high-plant-protein diets to the production performance, innate immune responses, and intestinal microbiota of red drum (*Sciaenops ocellatus*) [J]. *Aquaculture*, 2021(545): 737225.
- [9] Xu K H, Chen Y F, Zhang Y G, *et al.* Effects of sodium butyrate on growth, digestive enzyme activity, serum biochemical indices and intestinal histology of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, **47**(10): 25-34. [徐凯慧, 陈云峰, 章玉贵, 等. 饲料中添加丁酸钠对草鱼生长、消化酶活性、血清生化指标和肠道组织学的影响 [J]. 水产学报, 2023, **47**(10): 25-34.]
- [10] Bedford A, Gong J. Implications of butyrate and its derivatives for gut health and animal production [J]. *Animal Nutrition*, 2018, **4**(2): 151-159.
- [11] 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: 30-32. [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: 30-32.]
- [12] Wang F R, Sun L, He C X, *et al.* Effects of sodium butyrate on growth performance and intestinal mucosa morphology in paddlefish (*Polyodon spathula*) [J]. *China Feed*, 2017(13): 39-41. [汪富荣, 孙浪, 何纯希, 等. 丁酸钠对匙吻鲟生长和肠道黏膜形态的影响 [J]. 中国饲料, 2017(13): 39-41.]
- [13] Alves Jesus G F, Owatari M S, Pereira S A, *et al.* Effects of sodium butyrate and *Lippia organoides* essential oil blend on growth, intestinal microbiota, histology, and haemato-immunological response of Nile tilapia [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2021(117): 62-69.
- [14] Tian L, Zhou X Q, Jiang W D, *et al.* Sodium butyrate improved intestinal immune function associated with NF- $\kappa$ B and p38MAPK signalling pathways in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017(66): 548-563.
- [15] Hou D Q, Li M, Li P J, *et al.* Effects of dietary supplementation of *Clostridium butyricum* or sodium butyrate on growth performance, serum biochemical indexes, liver immune and antioxidant capacity of largemouth bass [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, **36**(4): 2572-2585. [侯冬强, 李敏, 李培佳, 等. 饲料中添加丁酸梭菌或丁酸钠对大口黑鲈生长性能、血清生化指标、肝脏免疫和抗氧化能力的影响 [J]. 动物营养学报, 2024, **36**(4): 2572-2585.]
- [16] Liu W, Yang Y, Zhang J, *et al.* Effects of dietary microencapsulated sodium butyrate on growth, intestinal mucosal morphology, immune response and adhesive bacteria in juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) pre-fed with or without oxidised oil [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2014, **112**(1): 15-29.
- [17] Zhou C, Lin H, Huang Z, *et al.* Effect of dietary sodium butyrate on growth performance, enzyme activities and intestinal proliferation-related gene expression of juvenile golden pompano *Trachinotus ovatus* [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, **25**(6): 1261-1271.
- [18] Liu Y, Chen Z, Dai J, *et al.* Sodium butyrate supplementation in high-soybean meal diets for turbot (*Scophthalmus maximus* L.): Effects on inflammatory status, mucosal barriers and microbiota in the intestine [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019(88): 65-75.
- [19] da Silva B C, do Nascimento Vieira F, Mourinho J L P, *et al.* Butyrate and propionate improve the growth performance of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquaculture Research*, 2016, **47**(2): 612-623.
- [20] Mai K S. Aquatic Animal Nutrition and Feed Science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011: 46-53. [麦康森. 水产动物营养与饲料学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 46-53.]
- [21] Shi Y Q. Study on the appropriate addition of calcium dihydrogen phosphate in *Carassius auratus tripl* feed under two lipid levels [D]. Chongqing: Southwest University, 2016: 8-45. [石亚庆. 两种脂肪水平下湘云鲫饲料中磷酸二氢钙适宜添加量研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2016: 8-45.]
- [22] Tang J Z, Cao S P, Qu F F, *et al.* Effects of sustained release nanosphere sodium butyrate on the growth performance, serum biochemical indices, intestinal mucosal morphology and *pept1* mrnaexpression in intestinal of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(4): 764-773. [唐建洲, 曹申平, 瞿符发, 等. 纳米缓释丁酸钠对草鱼生长性能、血清生化指标、肠道黏膜形态及 *PepT1* 基因表达的影响 [J]. 水生生物学报, 2021, **45**(4): 764-773.]
- [23] Gou N, Jin T, Yang B, *et al.* Influences of dietary sodium butyrate on growth, digestion, antioxidant capacity and health in juvenile *Onychostoma macrolepis* fed on high-fat diet [J]. *Aquaculture Reports*, 2023(33): 101808.
- [24] Cen H, Wan Y, Han D, *et al.* Dietary supplementation with zinc sulfate heptahydrate on growth performance, muscle quality, and lipid metabolism of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, **49**(7): 91-101. [岑昊, 万莹, 韩冬, 等. 饲料中添加七水硫酸锌对草鱼生长性能、肌肉品质和脂肪代谢的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, **49**(7): 91-101.]

- [25] Chen W, Gao S, Chang K, *et al.* Dietary sodium butyrate supplementation improves fish growth, intestinal microbiota composition, and liver health in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed high-fat diets [J]. *Aquaculture*, 2023(564): 739040.
- [26] Nanton D A, Lall S P, McNiven M A. Effects of dietary lipid level on liver and muscle lipid deposition in juvenile haddock, *Melanogrammus aeglefinus* L [J]. *Aquaculture Research*, 2001, **32**(s1): 225-234.
- [27] Wang J T, Liu Y J, Tian L X, *et al.* Effect of dietary lipid level on growth performance, lipid deposition, hepatic lipogenesis in juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. *Aquaculture*, 2005, **249**(1/2/3/4): 439-447.
- [28] Xiang X, Zhou X H, Chen J, *et al.* Effects of dietary lipid level on growth performance, body composition and serum biochemical indices of juvenile *Onychostoma sima* [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, **25**(8): 1805-1816. [向泉, 周兴华, 陈建, 等. 饲料脂肪水平对白甲鱼幼鱼生长性能、体组成和血清生化指标的影响 [J]. *动物营养学报*, 2013, **25**(8): 1805-1816.]
- [29] Zhang Y Y, Lü S, Lu Z Y, *et al.* Effects of sodium butyrate on growth, physico-chemical indices and intestinal structure of common carp *Cyprinus carpio* fed high dietary levels of carbohydrate or lipid [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2022, **37**(5): 747-755. [张媛媛, 吕硕, 卢正义, 等. 高糖、高脂饲料中添加丁酸钠对鲤生长、生化指标和肠道结构的影响 [J]. *大连海洋大学学报*, 2022, **37**(5): 747-755.]
- [30] Zhang S L, Chang J B, Ye J D, *et al.* Effects of sodium butyrate on feeding, growth performance and antioxidant capacity of *Anguilla rostrata* [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, **26**(4): 549-551. [张淞琳, 常建波, 叶继丹, 等. 丁酸钠对美洲鳗鲡摄食、生长性能和抗氧化能力的影响 [J]. *福建农业学报*, 2011, **26**(4): 549-551.]
- [31] Zheng R G. The effect of sodium butyrate on the growth performance a intestinal mucous structure of freshwater fish [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2008: 17-25. [郑瑞耕. 丁酸钠对淡水鱼类生长性能及肠粘膜结构的影响 [D]. 福州: 福建农林大学, 2008: 17-25.]
- [32] Sun L, Liu Z, Hao G, *et al.* Effects of sodium butyrate on protein metabolism and its related gene expression of triploid crucian carp (*Carassius auratus* Tripl) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, **25**(11): 2775-2782. [孙浪, 刘臻, 郝光, 等. 丁酸钠对湘云鲫蛋白质代谢及其相关基因表达的影响 [J]. *动物营养学报*, 2013, **25**(11): 2775-2782.]
- [33] Hara T, Kashihara D, Ichimura A, *et al.* Role of free fatty acid receptors in the regulation of energy metabolism [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular and Cell Biology of Lipids*, 2014, **1841**(9): 1292-1300.
- [34] Krishnan J, Danzer C, Simka T, *et al.* Dietary obesity-associated Hif1 $\alpha$  activation in adipocytes restricts fatty acid oxidation and energy expenditure via suppression of the Sirt2-NAD<sup>+</sup> system [J]. *Genes & Development*, 2012, **26**(3): 259-270.
- [35] Hou Y, Gao X, Shi X, *et al.* Dietary supplementation of *Sophora flavescens* root extract improved the growth performance, antioxidant capacity, innate immunity, and disease resistance against *Edwardsiella tarda* challenge in turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Antioxidants*, 2023, **12**(1): 69.
- [36] Nakanishi K, Yaoi K, Nagino Y, *et al.* Aminopeptidase N isoforms from the midgut of *Bombyx mori* and *Plutella xylostella*—their classification and the factors that determine their binding specificity to *Bacillus thuringiensis* Cry1A toxin [J]. *FEBS Letters*, 2002, **519**(1/2/3): 215-220.
- [37] Liu Z, Zhou Y, Feng J, *et al.* Characterization of oligopeptide transporter (PepT1) in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2013, **164**(3): 194-200.
- [38] Shimakura J, Terada T, Shimada Y, *et al.* The transcription factor Cdx2 regulates the intestine-specific expression of human peptide transporter 1 through functional interaction with Sp1 [J]. *Biochemical Pharmacology*, 2006, **71**(11): 1581-1588.
- [39] Luo L, Yi D W, Yang K M, *et al.* Effects of microencapsulated sodium butyrate on growth performance, nonspecific immunity and hepatic function of blunt snout bream under high density culture condition [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, **30**(7): 2865-2871. [罗玲, 易德玮, 杨坤明, 等. 饲料中添加微囊丁酸钠对高密度养殖条件下团头鲂生长性能、非特异性免疫力及肝功能的影响 [J]. *动物营养学报*, 2018, **30**(7): 2865-2871.]
- [40] Xiang X, Zeng B H, Zhou X H, *et al.* Effect of taurine supplementation at different dietary lipid levels on growth performance, body composition, hepatopancreas biochemical index and antioxidant capacity of juvenile common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(12): 1927-1939. [向泉, 曾本和, 周兴华, 等. 不同脂肪条件下添加牛磺酸对鲤生长性能、体成分、肝胰脏生化指标及抗氧化能力的影响 [J]. *水产学报*, 2018, **42**(12): 1927-1939.]
- [41] Shalata H A, Bahattab O, Zayed M M, *et al.* Synergistic effects of dietary sodium butyrate and *Spirulina platensis* on growth performance, carcass composition, blood health, and intestinal histomorphology of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(19): 100637.
- [42] Wang T, Secombes C J. The cytokine networks of adaptive immunity in fish [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2013, **35**(6): 1703-1718.
- [43] Wang H R, Hu J R, Zhao H X, *et al.* Effects of dietary sodium butyrate on non-specific immune, antioxidant indices and intestinal mucosal morphology of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, **33**(9): 5379-5390. [王海瑞, 胡俊茹, 赵红霞, 等. 饲料中添加丁酸钠对黄颡鱼

- 幼鱼非特异性免疫、抗氧化指标及肠道黏膜形态的影响 [J]. 动物营养学报, 2021, 33(9): 5379-5390.]
- [44] Qin Y M. Effects of the sodium butyrate or lactoferrin addition in high soybean meal diets on the growth performance and intestinal health of *Epinephelus coioides* [D]. Xiamen: Jimei University, 2021: 56-59. [覃应梅. 高豆粕饲料中添加丁酸钠、乳铁蛋白对斜带石斑鱼生长性能和肠道健康的影响 [D]. 厦门: 集美大学, 2021: 56-59.]
- [45] Ni P J. Effects of dietary lipids on the growth performance, intestine, systemic and gill health and flesh quality as well as its potential mechanisms in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016: 47-58. [倪培珺. 脂肪对生长中期草鱼生长性能、肠道、机体和鳃健康及肌肉品质的作用及其作用机制 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2016: 47-58.]
- [46] Liu S. Effect of nano-selenium on muscle quality of *Ctenopharyngodon idellus* fed with high-fat diet and the influence of overwintering on the health of liver and intestine [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022: 27-37. [刘莎. 硒对饲喂高脂饲料草鱼肌肉品质及其越冬后肝肠健康的影响研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022: 27-37.]
- [47] Ahmed H A, Sadek K M. Impact of dietary supplementation of sodium butyrate and/or protexin on the growth performance, some blood parameters, and immune response of *Oreochromis niloticus* [J]. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 2015, 3(4): 985-991.
- [48] Ma S. Progress on GSH-px and GST [J]. *Progress in Veterinary Medicine*, 2008, 29(10): 53-56. [马森. 谷胱甘肽过氧化物酶和谷胱甘肽转硫酶研究进展 [J]. 动物医学进展, 2008, 29(10): 53-56.]

## SODIUM BUTYRATE ADDITION IN HIGH-LIPID DIET ON GROWTH, DIGESTIVE ENZYMES ACTIVITY, IMMUNITY, AND ANTIOXIDANT CAPACITY OF HETEROPHILIC SILVER CARP (*CARASSIUS AURATUS GIBELIO*)

HE Bo-Wu<sup>1</sup>, ZHOU Yu-Peng<sup>1</sup>, HE Yuan-Fa<sup>1,2</sup>, ZHU Tai-De<sup>1</sup>, LI Ying-Peng<sup>1</sup>, LI Zong-Hao<sup>1</sup>, HAO Yong<sup>1</sup>, ZHU Cheng-Ke<sup>1</sup> and XIANG Xiao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Freshwater Fish Resources and Reproductive Development, College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 402460, China; 2. Laboratory of Aquatic Animal Nutrition and Feed, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of adding sodium butyrate to high-lipid diet on growth, digestive enzymes activity, immunity, and antioxidant capacity of juvenile *Carassius auratus gibelio*, this experiment selected 450 healthy juvenile *C. auratus gibelio* with an initial body weight of (20.41±0.44) g as the research subjects. The high-lipid diet (crude lipid content of 7.31%) with different sodium butyrate supplemental levels [0 (SB0), 0.1% (SB0.1), 0.3% (SB0.3), 0.6% (SB0.6), and 1.2% (SB1.2)] were fed to *C. auratus gibelio* for 8 weeks. The results showed that: (1) In terms of growth, the weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR) of the SB0.3 and SB0.6 groups were significantly higher than those of the other groups ( $P<0.05$ ), with SB0.3 group showing the highest values (120.63% and 1.41%/d, respectively). The feed conversion ratio (FCR) decreased first and then increased with sodium butyrate addition ( $P<0.05$ ), reaching a minimum of 1.60 at 0.3% supplementation. The addition of sodium butyrate to high-lipid diet significantly increased the protein deposition rate ( $P<0.05$ ); (2) Compared with the control group, intestinal lipase and amylase activities in SB0.1, SB0.3, SB0.6, and SB1.2 groups were significantly increased ( $P<0.05$ ), while protease activity was significantly higher in the SB0.3 group ( $P<0.05$ ), and there was no significant difference between the control group and the other sodium butyrate addition groups ( $P>0.05$ ); (3) In terms of immunity and antioxidant status, serum aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotransferase (ALT) activities exhibited a trend of first decreasing then increasing with the increase of sodium butyrate supplemental level ( $P<0.05$ ); The hepatopancreas antioxidant enzyme activity increased first and then decreased ( $P<0.05$ ), while malondialdehyde (MDA) content showed the opposite trend ( $P<0.05$ ). This experiment confirms that adding an appropriate amount of sodium butyrate to high-lipid diet can significantly improve the digestive capacity, enhance immunity and antioxidant functions, and promote growth in juvenile *C. auratus gibelio*. Quadratic regression analysis of growth performance combined with the activity of digestive enzymes, immunity and antioxidant capacity, suggests an optimal sodium butyrate dosage range of 0.3%—0.67%.

**Key words:** Sodium butyrate; Growth; Digestive enzymes; Immunity; Antioxidant capacity; *Carassius auratus gibelio*