

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

徐凯慧^{1,2,3}, 陈云峰^{1,2,3}, 章玉贵^{1,2,3}, 李小勤^{1,2,3}, 冷向军^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306)

摘要: 为了探究饲料中补充不同水平丁酸钠对草鱼生长性能、肠道消化酶活性、血清生化指标和肠道组织形态的影响, 分别添加 0 mg/kg (SB0)、1 000 mg/kg (SB1)、2 000 mg/kg (SB2) 和 3 000 mg/kg (SB3) 的微囊丁酸钠 (含 50% 丁酸钠) 至基础饲料中, 设计 4 组等氮等脂的实验饲料。选取 300 尾体质健康的草鱼 (10.0±0.1) g, 分成 4 组, 每组 3 个重复, 每个重复 25 尾鱼, 放置在水泥池中养殖 8 周。结果显示, 各组草鱼增重率为 273.7%~279.9%, 饲料系数为 1.55~1.60, 饲料中补充丁酸钠对草鱼生长性能和体成分无显著影响。与对照组相比, 添加不同水平的丁酸钠均显著提高了肠道蛋白酶活性和血清超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 降低了血清谷草转氨酶 (AST) 活性, SB1 组血清碱性磷酸酶 (AKP) 活性显著升高, 而 SB2 和 SB3 组血清谷丙转氨酶 (ALT) 活性显著降低。各组肠道淀粉酶活性、血清酸性磷酸酶 (ACP)、甘油三酯 (TG)、葡萄糖 (GLU)、总蛋白 (TP) 和 *D*-乳酸 (*D*-LA) 无显著差异。在肠道组织学方面, 各丁酸钠补充组肠道绒毛高度和 SB1、SB2 组肌层厚度显著高于对照组, 而各组间肠道绒毛宽度没有显著差异; 在肝脏组织学方面, 各组间无明显可见差异。研究表明, 在饲料中添加不同水平的丁酸钠, 对草鱼增重率和饲料利用无显著促进作用, 但可提高肠道消化酶活性, 改善肠道组织形态。本研究可为水产饲料中合理利用丁酸钠提供理论依据。

关键词: 草鱼; 丁酸钠; 生长; 消化酶; 血清生化指标; 肠道组织学

中图分类号: S 963.73+3

文献标志码: A

随着集约化养殖的增加, 养殖水产动物出现抗病能力下降, 病害频发等一系列问题^[1], 这导致了抗生素的频繁使用。尽管抗生素在治疗动物疾病、改善动物生长性能等方面具有突出效果, 但滥用抗生素所带来的耐药性、体内菌群失衡、药物残留^[2] 以及由此引发的食品安全等问题日益

受到人们的重视。因此, 应用新型绿色添加剂和寻找抗生素替代品, 增强水生动物健康, 是当前水产养殖重点关注的问题。

丁酸是一种短链脂肪酸, 是动物肠道中细菌厌氧发酵碳水化合物化合物的主要终产物。游离的丁酸具有特殊的气味, 通常将其制成相对稳定的钠盐

收稿日期: 2023-08-24 修回日期: 2023-10-06

资助项目: 上海市科技兴农技术创新项目 [沪农科创字 (2021) 第 3-1 号]

第一作者: 徐凯慧 (照片), 从事水产动物营养与饲料学研究, E-mail: x19990707kh@163.com

通信作者: 冷向军, 从事水产动物营养与饲料学研究, E-mail: xjleng@shou.edu.cn



来加以利用。研究表明, 丁酸是动物肠道上皮细胞的能量来源^[3], 具有改善肠道形态, 促进肠道细胞增殖和成熟, 维持肠黏膜上皮细胞的正常形态, 促进小肠消化吸收的作用^[4]。在肠道细胞中, 丁酸进入线粒体, 通过乙酰辅酶 A 进行 β -氧化, 进入三羧酸循环, 最终产生 ATP^[5]。有报道称, 在饲料中添加丁酸钠可以改善大菱鲂 (*Scophthalmus maximus*)^[6]、巨骨舌鱼 (*Arapaima gigas*)^[7] 和黄姑鱼 (*Nibea albiflora*)^[8] 的肠道功能。

对尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)^[9]、舌齿鲈 (*Dicentrarchus labrax*)^[10]、鲤 (*Cyprinus carpio*)^[11]、金头鲷 (*Sparus aurata*)^[12]、尖吻鲈 (*Lates calcarifer*)^[13] 和鲫 (*Carassius auratus*)^[14] 的研究均表明, 丁酸钠有显著的促生长作用。但也有实验表明, 饲料中添加丁酸钠对养殖鱼类生长无显著改善效果。如在舌齿鲈^[15] 饲料中添加 0.2% 的丁酸钠, 在虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)^[16] 饲料中添加 1 和 2 g/kg 的包膜丁酸钠, 对其生长性能均无显著影响。

草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 是我国养殖产量最高的鱼类, 2022 年产量达 5 904 805 t^[17]。Liu 等^[18] 的研究发现, 在饲料中添加 2 000 mg/kg 丁酸钠可以显著提高草鱼幼鱼的生长、抗氧化能力和肠道吸收能力。但晏显芳等^[19] 的研究表明, 饲料中添加 0.5 和 1.0 g/kg 丁酸钠对草鱼的生长并无显著影响。为了探究饲料中添加丁酸钠是否可以改善草鱼的生长性能和肠道健康, 以草鱼为研究对象, 在饲料中添加不同水平的微囊丁酸钠, 通过 8 周的养殖实验, 探究丁酸钠对草鱼生长性能、营养物质利用、血清生化指标和肠道组织形态的影响, 为水产饲料中合理利用丁酸钠提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计与饲料配方

以豆粕、菜籽粕、棉籽粕为主要蛋白质原料, 配制粗蛋白质水平为 28% 的基础饲料, 分别补充 0 mg/kg (SB0)、1 000 mg/kg (SB1)、2 000 mg/kg (SB2) 和 3 000 mg/kg (SB3) 的微囊丁酸钠 (驻马店华中正大有限公司提供, 丁酸钠含量 50%) 至基础饲料中, 并相应减少小麦麸用量, 制成 4 种等氮等脂的实验饲料。

饲料原料经粉碎机粉碎后, 过 40 目筛, 逐级混匀后, 用单螺杆挤压机 (LX-75 型水产饲料膨化机, 河北省隆尧县龙翔食品机械厂) 制成沉性颗粒

饲料 (直径 2 mm, 制粒温度 90~95 °C), 风干后封存备用。表 1 为实验饲料组成及营养水平。

1.2 实验用鱼及饲养管理

草鱼苗购买于广州众汇水产养殖有限公司, 在上海海洋大学滨海基地水泥池中暂养 1 月, 期间喂食商品饲料 (粗蛋白含量 $\geq 30\%$)。正式实验时, 挑选 300 尾体质健壮的草鱼 (10.0 \pm 0.1) g, 分到 12 个网箱 (1.5 m \times 1.0 m \times 1.2 m) 中, 每个网箱 25 尾, 共 4 个处理组, 每组 3 个重复, 置于室内水泥池中养殖 8 周。每天投喂 3 次 (7:30、11:30、16:30), 日投喂量约为草鱼体重的 3%~5%, 依照采食情况适时调整, 按投喂 10 min 内无残料为宜, 各组保持基本一致的投喂量。水体 24 h 充气, 每隔 5 天吸污换水 1 次, 换水量约为总水量的 1/3, 水温 25~30 °C, 溶解氧含量 > 5 mg/L, pH 7.5~8.0, 氨氮含量 < 0.2 mg/L, 亚硝酸盐浓度 < 0.1 mg/L。

1.3 样品采集

样品采集过程经上海海洋大学动物伦理委员会动物实验委员会批准, 严格按照中国实验动物学会制订的实验动物福利条例执行, 尊重动物福利与道德规范。

实验开始前, 取 6 尾鱼在 -20 °C 冰箱保存, 用于测定初始全鱼常规营养成分。实验结束后, 各组鱼饥饿 24 h, 对各网箱称重计数, 计算增重率 (WGR)、特定生长率 (SGR)、饲料系数 (FCR) 和存活率 (SR)。每网箱随机取 3 尾鱼, -20 °C 冷冻保存, 用于测定终末全鱼常规营养成分。每网箱另取 3 尾鱼测定体重、体长, 静脉采血, 4 °C 冰箱静置 24 h, 离心 (4 °C, 3 000 r/min, 10 min), 取血清于 -80 °C 冷冻, 用于血清抗氧化指标的测定。采血后, 立即解剖, 称量内脏重和肝脏重, 计算肥满度 (CF)、脏体比 (VSI) 和肝体比 (HSI)。取前肠和肝脏, 用生理盐水清洗, Bouin 氏液固定, 用于制作肠道组织切片和肝脏组织切片。每个网箱再取 3 尾鱼, 抽血后解剖, 分离出肠道, 剥离肠脂, 排出食糜, 取完整的前肠, -80 °C 保存, 用于测定肠道消化酶活性。

1.4 测定指标和方法

生长性能与形体指标 增重率 (weight gain rate, WGR, %) = [终末体重 (g) - 初始体重 (g)] / 初始体重 (g) $\times 100\%$;

表 1 实验饲料组成及营养水平 (风干基础)

Tab. 1 Ingredients and proximate composition of experimental diets (air-dry basis)		%			
原料 ingredients ¹⁾	SB0	SB1	SB2	SB3	
豆粕 soybean meal	27.00	27.00	27.00	27.00	
玉米蛋白粉 corn gluten meal	3.50	3.50	3.50	3.50	
棉粕 cottonseed meal	9.00	9.00	9.00	9.00	
菜粕 rapeseed meal	19.00	19.00	19.00	19.00	
小麦麸 wheat bran	10.50	10.40	10.30	10.20	
面粉 wheat flour	25.00	25.00	25.00	25.00	
豆油 soybean oil	3.00	3.00	3.00	3.00	
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	2.00	2.00	2.00	2.00	
多维多矿 ²⁾ vitamin and mineral premix ²⁾	1.00	1.00	1.00	1.00	
丁酸钠 sodium butyrate	0.00	0.10	0.20	0.30	
总计 total	100.00	100.00	100.00	100.00	
营养水平 nutrient levels³⁾					
粗蛋白 crude protein	28.37	28.31	28.12	27.83	
粗脂肪 crude lipid	4.42	4.65	4.38	4.57	
粗灰分 crude ash	6.45	6.31	6.55	6.38	
水分 moisture	10.20	10.02	10.01	10.54	

注: SB0、SB1、SB2和SB3微囊丁酸钠添加量分别为0、1 000、2 000和3 000 mg/kg。1) 主要原料粗蛋白含量为豆粕44.20%，棉粕50.00%，菜粕38.50%，小麦麸15.00%，面粉14.41%，玉米蛋白粉57.02%。2) 多维多矿(mg或IU/kg饲料)为VA, 3 000 IU; VD3, 1 500 IU; VE, 40 mg; VK₃, 4.5 mg; VB₁, 8 mg; VB₂, 8.5 mg; VB₆, 6 mg; VB₁₂, 0.015 mg; VC, 110 mg; 生物素, 0.15 mg; 肌醇, 40 mg; 叶酸, 1.30 mg; D-泛酸钙, 17.00 mg; 碘, 1.20 mg; 锰, 8.50 mg; 钴, 1.00 mg; 铜, 6.50 mg; 锌, 53.00 mg; 硒, 0.35 mg; 铁, 45.00 mg。3) 营养水平为实测值。

Notes: SB0、SB1、SB2 and SB3 microencapsulated sodium butyrate additive amount were 0, 1 000, 2 000 and 3 000 mg/kg, respectively. 1) the crude protein content of main ingredients was as follows: soybean meal 44.20%, cottonseed meal 50.00%, rapeseed meal 38.50%, wheat bran 15.00%, flour 14.41%, corn gluten meal 57.02%. 2) vitamin and mineral premix (mg or IU/kg diet): VA, 3 000 IU; VD3, 1 500 IU; VE, 40 mg; VK₃, 4.5 mg; VB₁, 8 mg; VB₂, 8.5 mg; VB₆, 6 mg; VB₁₂, 0.015 mg; VC, 110 mg; biotin, 0.15 mg; inositol, 40 mg; and folic acid, 1.30 mg; D-calcium pantothenate, 17.00 mg; I, 1.20 mg; Mn, 8.50 mg; Co, 1.00 mg; Cu, 6.50 mg; Zn, 53.00 mg; Se, 0.35 mg; Fe, 45.00 mg. 3) nutrient levels were measured value.

特定生长率 (specific growth rate, SGR, %/d) = $\{\ln[\text{终末体重 (g)}] - \ln[\text{初始体重 (g)}]\} / \text{养殖天数 (d)} \times 100\%$;

饲料系数 (feed conversion ratio, FCR) = 总投喂量 (g) / $[\text{终末体重 (g)} - \text{初始体重 (g)}]$;

肥满度 (condition factor, CF, g/cm³) = 鱼体重 (g) / $[\text{鱼体长 (cm)}]^3 \times 100$;

脏体比 (viscerosomatic index, VSI, %) = 鱼内脏重 (g) / 鱼体重 (g) × 100%;

肝体比 (hepatosomatic index, HSI, %) = 鱼肝脏重 (g) / 鱼体重 (g) × 100%;

存活率 (survival rate, SR, %) = 终末尾数 (尾) / 初始尾数 (尾) × 100%。

饲料、全鱼常规营养成分含量和营养物质沉积率 用 105 °C 烘干法测定水分含量。用凯氏定氮法测定粗蛋白含量。用氯仿-甲醇抽提法测定粗脂肪含量。用马弗炉灰化法测定粗灰分含量。根据上述测定值计算营养物质沉积率:

某营养物质沉积率 (%) = $[\text{终末均重 (g)} \times \text{终末全鱼该营养物质含量 (\%)} - \text{初始均重 (g)} \times \text{初始全鱼该营养物质含量 (\%)}] / [\text{投喂量 (g)} \times \text{饲料中该营养物质含量 (\%)}] \times 100\%$

肠道消化酶活性 制备前肠粗酶液: 将前肠样品称重后加入 9 倍体积的生理盐水, 匀浆后于 4 °C 离心 10 min (2 500 r/min), 取上清液, 4 °C 保存, 24 h 内测定蛋白酶和淀粉酶活性。

淀粉酶活性、蛋白酶活性和蛋白定量均使用试剂盒测定 (试剂盒均购自南京建成生物工程研究所)。

血清生化指标和肠道肝脏组织切片 血清指标包括超氧化物歧化酶 (SOD)、酸性磷酸酶 (ACP)、碱性磷酸酶 (AKP)、谷丙转氨酶 (ALT)、谷草转氨酶 (AST)、总蛋白 (TP)、葡萄糖 (Glu)、甘油三酯 (TG) 和 D-乳酸 (D-LA)。血清样本委托上海顺实生物科技有限公司检测。

肠道和肝脏组织经乙醇脱水, 二甲苯透明,

石蜡包埋, 切片, 再经苏木精-伊红 (H.E) 染色, 封片, 切片。在光学显微镜下观察肠组织和肝脏组织的形态并拍照, 测量绒毛高度 (villus height, VH)、绒毛宽度 (villus width, VW) 和肌层厚度 (muscular thickness, MT)。

1.5 数据分析

实验数据用平均值±标准差 (mean±SD) 表示, 采用 SPSS 27.0 统计软件进行单因素方差分析, 差异显著者进行 Tukey 氏法进行多重比较, $P<0.05$ 为显著差异。

2 结果

2.1 生长性能和形体指标

草鱼生长良好, 各组存活率均为 100%。各组草鱼 FBW (37.2~37.8 g)、FCR (1.55~1.60)、WGR (273.7%~279.9%) 和 SGR (2.33~2.38) 无显著差异 ($P>0.05$)。与对照组相比, SB1 和 SB2 组 CF 显著提高 ($P<0.05$), 各丁酸钠添加组的脏体比和 SB2、SB3 组的肝体比显著降低 ($P<0.05$) (表 2)。

表 2 丁酸钠对草鱼生长性能和形体指标的影响

Tab. 2 Effects of dietary sodium butyrate on growth performance and body indices of *C. idella*

项目 items	SB0	SB1	SB2	SB3
初始均重/g IBW	10.0±0.1	10.0±0.1	10.0±0.1	10.0±0.1
终末均重/g FBW	37.8±0.1	37.6±2.1	37.2±1.0	37.5±0.1
饲料系数 FCR	1.55±0.02	1.58±0.12	1.60±0.06	1.59±0.01
增重率/% WGR	279.9±1.3	275.1±21.2	279.5±2.1	273.7±2.7
特定增长率/(%/d) SGR	2.38±0.01	2.36±0.10	2.35±0.06	2.33±0.04
存活率/% SR	100	100	100	100
肥满度/(g/cm ³) CF	1.84±0.10 ^b	2.01±0.08 ^a	2.01±0.10 ^a	2.00±0.08 ^{ab}
脏体比/% VSI	11.06±1.16 ^a	9.24±1.03 ^b	9.43±0.49 ^b	9.20±0.10 ^b
肝体比/% HSI	2.04±0.34 ^a	1.74±0.20 ^{ab}	1.55±0.14 ^b	1.48±0.25 ^b

注: 同一行不同小写字母表示二者有显著差异 ($P<0.05$), 下同。

Notes: Values in the same row with different superscripts alphabets indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

表 3 丁酸钠对草鱼全鱼组成 (湿重) 和营养物质沉积率的影响

Tab. 3 Effects of dietary sodium butyrate on whole body composition (wet weight) and nutrient retention of *C. idella* %

项目 items	SB0	SB1	SB2	SB3
水分 moisture	71.41±0.80	71.53±0.97	71.98±0.28	71.59±0.31
粗蛋白 crude protein	15.06±0.63	15.08±0.12	14.84±0.20	15.15±0.75
粗脂肪 crude lipid	5.84±0.45	5.58±0.19	5.14±0.27	5.30±0.27
粗灰分 crude ash	2.97±0.10	2.91±0.13	2.86±0.19	2.92±0.11
蛋白质沉积率 protein retention	35.00±1.94	34.79±0.36	34.58±0.60	35.55±2.34
脂肪沉积率 lipid retention	99.81±9.04	89.39±3.52	88.39±0.57	96.33±10.14

2.2 全鱼营养成分含量和营养物质沉积率

各组全鱼水分、粗蛋白、粗脂肪、粗灰分含量、蛋白质沉积率以及脂肪沉积率均无显著差异 ($P>0.05$) (表 3)。

2.3 肠道消化酶活性

随丁酸钠添加量增加, 肠道蛋白酶活性呈先上升后下降趋势, 均显著高于对照组, 其中以 SB1 组蛋白酶活性最高 ($P<0.05$); 肠道淀粉酶活性在各组间无显著差异 ($P>0.05$) (表 4)。

2.4 血清生化指标

与对照组相比, 各丁酸钠添加组的血清 SOD 活性和 SB1 组血清 AKP 活性显著升高 ($P<0.05$), 各丁酸钠添加组的 AST 活性和 SB2、SB3 组血清 ALT 活性显著降低 ($P<0.05$)。各组血清 ACP 活性和 TG、GLU、TP、D-LA 含量均无显著差异 ($P>0.05$) (表 5)。

2.5 肠道组织形态

各实验组草鱼肠道结构完整, 肠绒毛排列整

表 4 丁酸钠对草鱼肠道消化酶活性的影响

项目 items	SB0	SB1	SB2	SB3
蛋白酶活性 protease activity	229.75±35.94 ^a	386.39±23.32 ^a	383.87±22.36 ^a	290.51±9.28 ^b
淀粉酶活性 amylase activity	23.90±2.44	21.47±1.50	23.24±2.96	20.73±0.23

表 5 丁酸钠对草鱼血清生化指标的影响

项目 items	SB0	SB1	SB2	SB3
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	95.83±0.98 ^c	104.80±0.01 ^b	105.02±0.98 ^b	116.29±2.60 ^a
碱性磷酸酶/(金氏单位/100 mL) AKP	7.11±0.52 ^b	8.20±0.10 ^a	7.03±0.25 ^b	7.36±0.27 ^b
酸性磷酸酶/(U/mL) ACP	14.58±1.21	14.93±1.23	13.90±0.74	13.32±0.33
谷丙转氨酶/(U/mL) ALT	2.11±0.05 ^a	2.03±0.02 ^a	1.63±0.01 ^c	1.84±0.03 ^b
谷草转氨酶/(U/mL) AST	3.70±0.27 ^b	2.90±0.16 ^b	2.50±0.08 ^{bc}	2.37±0.10 ^c
甘油三酯/(mmol/L) TG	1.98±0.19	1.98±0.21	1.78±0.17	1.64±0.15
葡萄糖/(g/L) GLU	1.33±0.09	1.19±0.04	1.16±0.11	1.17±0.06
蛋白定量/(g prot/L) TP	34.43±1.52	31.76±2.96	31.89±0.72	33.03±3.75
D-乳酸/(μmol/L) D-LA	7.49±0.27	8.09±0.98	5.56±0.02	6.62±0.34

齐(图版 I)。在表 6 中,各丁酸钠添加组的肠道绒毛高度均显著高于对照组 ($P<0.05$),SB1 和 SB2 组肌层厚度也显著高于对照组 ($P<0.05$),各组肠道绒毛宽度没有显著差异 ($P>0.05$)。

2.6 肝脏组织形态

各组肝脏细胞结构基本正常,肝脏组织形态结构无明显差异(图版 II)。

3 讨论

3.1 丁酸钠对草鱼生长性能的影响

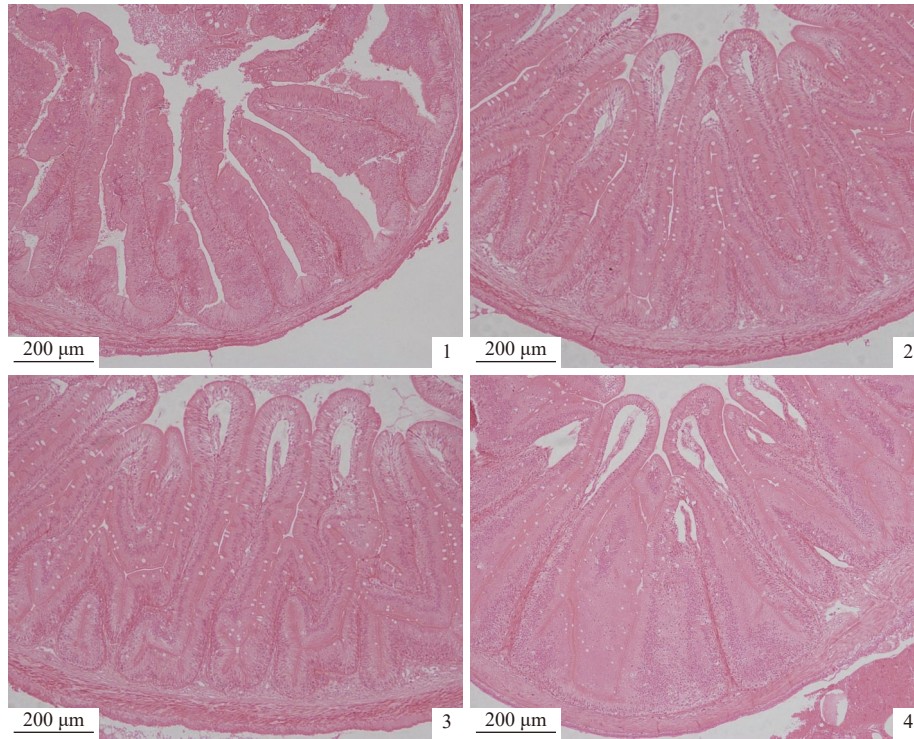
Dawood 等^[9]发现,在饲料中添加 1 g/kg 丁酸钠饲喂尼罗罗非鱼 8 周,鱼体 WGR 显著提升,FCR 显著降低,同时提高了热应激下的成活率。在卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)^[20]、美洲鳗鲡(*Anguilla rostrata*)^[21]和黄鳍(*Monopterus albus*)^[22]饲料中添加丁酸钠,均提高了鱼体增重率,降低了 FCR。唐建洲等^[23]在饲料中添加 0.6% 纳米缓释丁酸钠,显著提高了草鱼增重率、特定生长率和肥满度。然而,晏显芳等^[19]在饲料中添加 0.5 和 1.0 g/kg 丁酸钠,对草鱼饲料系数、形体指标和增重率均无显著影响。Zhou 等^[24]在饲料中添加 3 种包被形式的丁酸钠(0.5 g/kg,无脂包被、半脂包被和 2/3 脂包被),对草鱼生长性能也无显著影响,但显著降

低了 VSI、腹腔内脂肪指数和肠道指数。

在本实验中,饲料中添加不同水平丁酸钠对草鱼的 WGR、FCR 均无显著影响,显著降低了 VSI 和 HSI(除 SB1 组)。本实验结果与唐建洲等^[23]和 Liu 等^[18]在草鱼中的研究结果不一致,原因可能是这两项研究使用了较高的丁酸钠添加量(0.4% 和 0.6%)和更高的丁酸钠有效含量(99.8%)。此外,饲料组成、所使用丁酸钠的剂型(包补与否,及不同包被材料)等都有可能影响丁酸钠对鱼类生长的作用效果。因此,对草鱼而言,可能需要采用更高丁酸钠添加水平及不同包被材料的丁酸钠开展进一步实验。

3.2 丁酸钠对草鱼肠道消化酶活性的影响

鱼类肠道是消化吸收的重要部位,肠道健康对于鱼类的健康意义重大^[25]。消化酶活性影响鱼类对饲料营养成分的消化、吸收和利用,是评价鱼类肠道健康的重要指标之一。研究表明,饲料中添加丁酸钠显著提高了草鱼肠道蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶活性^[26]。Zhou 等^[20]在卵形鲳鲹饲料中分别添加 2.0 和 4.0 g/kg 丁酸钠,显著提高了肠道蛋白酶和淀粉酶活性。本实验在饲料中添加不同水平丁酸钠,均显著增加了草鱼肠道蛋白酶活性。丁酸钠对肠道消化酶的提升作用可能与丁酸钠促进肠道细胞生长发育和改善肠道组织结构有关。



图版 I 草鱼肠道组织切片

图中 1~4 分别表示饲料中添加 0、1 000、2 000 和 3 000 mg/kg 的微囊丁酸钠, 下同。

Plate I Intestinal tissue sections of *C. idella*

Figure 1-4 represent the four groups with microencapsulated sodium butyrate addition of 0, 1 000, 2 000 and 3 000 mg/kg, the same below.

表 6 丁酸钠对草鱼肠道组织形态的影响

Tab. 6 Effects of dietary sodium butyrate on intestinal tissue morphology of <i>C. idella</i>						μm
项目 items		SB0	SB1	SB2	SB3	
绒毛高度 villus height		583.86±40.26 ^b	766.64±28.24 ^a	776.85±16.22 ^a	711.72±35.11 ^a	
绒毛宽度 villus width		142.87±7.07	137.75±12.81	142.46±11.02	129.54±1.40	
肌层厚度 muscular thickness		46.68±5.67 ^b	77.72±4.60 ^a	71.58±3.64 ^a	53.69±1.11 ^b	

3.3 丁酸钠对草鱼血清生化指标的影响

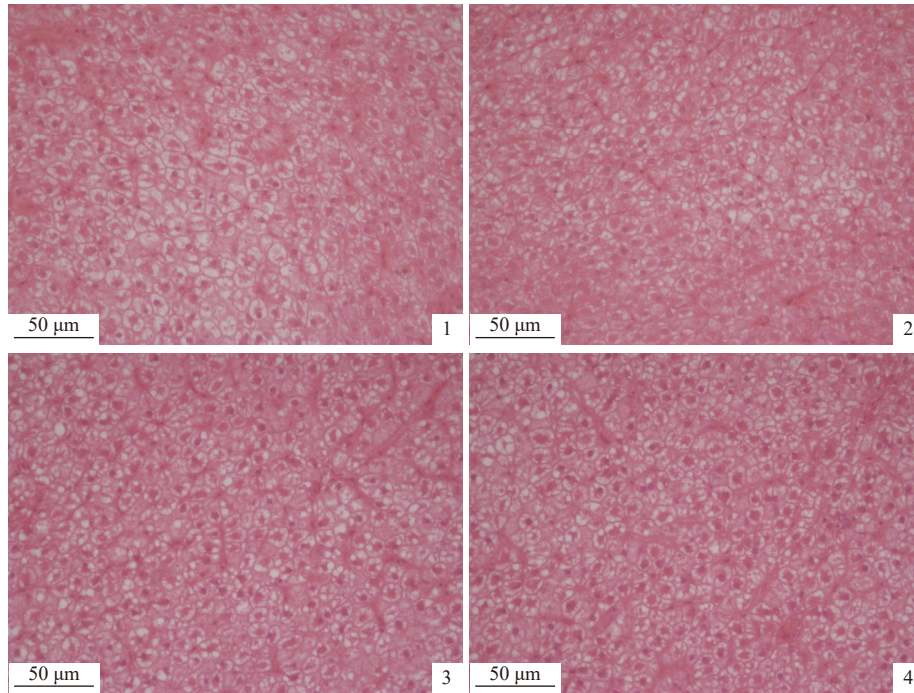
鱼体功能和健康状况可以通过血清生化指标反映。血清 AST 和 ALT 活性与肝损伤相关, 当肝脏受到损伤时, AST 和 ALT 被释放进入血液, 导致血清中含量升高。SOD 是反映机体抗氧化能力的指标, 是细胞抗氧化酶系统中必不可少的组分, 其活性越高, 清除自由基的能力就越强, 从而可以预防氧化应激和相关疾病。王海瑞等^[27]发现, 在黄颡鱼 (*Tachysurus fulvidraco*) 饲料中添加 1 g/kg 丁酸钠, 显著提高了血清 SOD 活性。Shalata 等^[28]在尼罗罗非鱼饲料中添加 0.35 g/kg 丁酸钠, 显著降低了血清 AST 活性。本实验中, 各丁酸钠组血清 SOD 活性均显著提高, SB2 和 SB3 组血清 ALT 与 SB1、SB2 和 SB3 组血清 AST 活性

均显著降低, 表明草鱼的抗氧化能力和肝脏健康可能得到了改善。其作用机制可能是丁酸能够促进机体蛋白质、脂质代谢, 提高了机体清除氧自由基的能力^[29]。

AKP 能破坏并清除侵入机体内的异物, 对机体的免疫系统起重要作用。本实验中, SB1 组血清 AKP 显著高于对照组, 表明草鱼的免疫功能得到了改善。这可能是因为丁酸可以抑制致病菌的生长, 促进生产丁酸细菌的繁殖, 缓解有害物质的产生^[30]。

3.4 丁酸钠对草鱼肠道组织形态的影响

肠道是鱼类主要的消化和吸收器官, 肠道上皮细胞和肠道组织学在消化和吸收营养方面发挥着重要作用^[31]。肠道绒毛高度和形态结构可以反



图版 II 草鱼肝脏组织切片

Plate II Liver tissue section of *C. idella*

映鱼类肠道消化能力^[32]。丁酸钠是肠上皮细胞的直接能量来源,可以促进肠上皮细胞的增殖、发育和修复黏膜损伤。丁酸盐还可以刺激结肠对水和钠离子的吸收,诱导细胞内 mRNA 和蛋白质的合成,并加速肠道绒毛的增殖^[33]。Zhou 等^[24]研究发现,饲料中添加丁酸钠能够增加草鱼的肠道绒毛高度。饲料中补充 0.2% 微囊丁酸钠也显著增加了舌齿鲈肠道的肌层厚度、杯状细胞数量以及绒毛长度和宽度^[10]。本研究表明,添加不同水平丁酸钠,草鱼肠道绒毛高度均显著升高,SB1 和 SB2 组草鱼肠道肌层厚度也显著增加,说明饲料中添加丁酸钠能改善草鱼肠道组织结构。丁酸钠能抑制肠道细胞凋亡,改善肠道细胞的完整性^[18,34],促进营养物质的吸收利用^[12,35]。此外,由于丁酸钠具有抗氧化功能^[18],可用于预防肠道损伤^[11],促进肠道健康,从而增强对疾病的抵抗力^[10]。

4 结论

综上所述,本实验条件下,在饲料中添加 1 000~3 000 mg/kg 微囊丁酸钠(含 50% 丁酸钠),对草鱼生长性能和饲料利用无显著促进作用,但可提高肠道消化酶活性和改善肠道组织形态。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Mougin J, Roquigny R, Flahaut C, *et al.* Abundance and spatial patterns over time of Vibrionaceae and *Vibrio harveyi* in water and biofilm from a seabass aquaculture facility[J]. *Aquaculture*, 2021, 542: 736862.
- [2] Singh A, Gautam P K, Verma A, *et al.* Green synthesis of metallic nanoparticles as effective alternatives to treat antibiotics resistant bacterial infections: a review[J]. *Bio-technology Reports*, 2020, 25: e00427.
- [3] Chapman M A S, Grahn M F, Hutton M, *et al.* Butyrate metabolism in the terminal ileal mucosa of patients with ulcerative colitis[J]. *British Journal of Surgery*, 1995, 82(1): 36-38.
- [4] Galfi P, Bokori J. Feeding trial in pigs with a diet containing sodium *n*-butyrate[J]. *Acta Veterinaria Hungarica*, 1990, 38(1-2): 3-17.
- [5] Donohoe D R, Garge N, Zhang X X, *et al.* The microbiome and butyrate regulate energy metabolism and autophagy in the mammalian colon[J]. *Cell Metabolism*, 2011, 13(5): 517-526.
- [6] Liu Y, Chen Z C, Dai J H, *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.
- [7] Luz J R, Souza Ramos A P, Bibiano Melo J F, *et al.* Use of sodium butyrate in the feeding of *Arapaima gigas* (Schinz, 1822) juvenile[J]. *Aquaculture*, 2019, 510: 248-255.
- [8] Wu X, Wang L G, Xie Q P, *et al.* Effects of dietary sodium butyrate on growth, diet conversion, body chemical compositions and distal intestinal health in yellow drum (*Nibea albiflora*, Richardson)[J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51(1): 69-79.
- [9] Dawood M A O, Eweedah N M, Elbially Z I, *et al.* Dietary sodium butyrate ameliorated the blood stress biomarkers, heat shock proteins, and immune response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to heat stress[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2020, 88: 102500.
- [10] Abdel-Mohsen H H, Wassef E A, El-Bermawy N M, *et al.* Advantageous effects of dietary butyrate on growth, immunity response, intestinal microbiota and histomorphology of European Seabass (*Dicentrarchus labrax*) fry[J]. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 2018, 22(4): 93-110.
- [11] Liu W S, Yang Y O, Zhang J L, *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]. *British Journal of Nutrition*, 2014, 112(1): 15-29.
- [12] Robles R, Lozano A B, Sevilla A, *et al.* Effect of partially protected butyrate used as feed additive on growth and intestinal metabolism in sea bream (*Sparus aurata*)[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2013, 39(6): 1567-1580.
- [13] Aalamifar H, Soltanian S, Vazirzadeh A, *et al.* Dietary butyric acid improved growth, digestive enzyme activities and humoral immune parameters in Barramundi (*Lates calcarifer*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 26(1): 156-164.
- [14] 孙浪, 刘臻, 郝光, 等. 丁酸钠对鲫鱼生长和肠细胞增殖的影响[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(4): 893-901.
- Sun L, Liu Z, Hao G, *et al.* Effects of sodium butyrate on growth and intestinal cell proliferation of *Carassius auratus*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(4): 893-901 (in Chinese).
- [15] Rimoldi S, Finzi G, Ceccotti C, *et al.* Butyrate and taurine exert a mitigating effect on the inflamed distal intestine of European sea bass fed with a high percentage of soybean meal[J]. *Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, 19(4): 40.
- [16] Lin X, Zhang C Y, Cao K L, *et al.* Dietary sodium butyrate changed intestinal histology and microbiota of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), but did not promote growth and nutrient utilization[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2023, 2023: 3706109.
- [17] 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. 2023 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2023 China Fishery Statistical Yearbook 2023[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023 (in Chinese).
- [18] Liu M M, Guo W, Wu F, *et al.* Dietary supplementation of sodium butyrate may benefit growth performance and intestinal function in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(8): 4102-4111.
- [19] 晏显芳, 张明, 郭盼, 等. 饲料中丁酸钠添加水平对草鱼生长、脂代谢及健康的影响[J]. *畜牧兽医杂志*, 2021, 40(6): 1-10,13.
- Yan X F, Zhang M, Guo P, *et al.* Effects of dietary sodium butyrate supplemental level on growth, lipid metabolism and health of *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2021, 40(6): 1-10,13 (in Chinese).
- [20] Zhou C P, Lin H Z, 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.
- [21] 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.
- 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 (in Chinese).
- [22] Zhang J Z, Zhong L, Chi S Y, *et al.* Sodium butyrate

- supplementation in high-soybean meal diets for juvenile rice field eel (*Monopterus albus*): effects on growth, immune response and intestinal health[J]. *Aquaculture*, 2020, 520: 734952.
- [23] 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. 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* mRNA expression in intestinal of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(4): 764-773 (in Chinese).
- [24] Zhou J S, Guo P, Yu H B, *et al.* Growth performance, lipid metabolism, and health status of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fed three different forms of sodium butyrate[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2019, 45(1): 287-298.
- [25] 张美玲, 单承杰, 杜震宇. 益生菌与鱼类肠道健康研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(1): 147-157. Zhang M L, Shan C J, Du Z Y. Research advances on probiotics and fish gut health[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(1): 147-157 (in Chinese).
- [26] Tian L, Zhou X Q, Jiang W D, *et al.* Sodium butyrate improved intestinal immune function associated with NF- κ B and p38MAPK signalling pathways in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 66: 548-563.
- [27] 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. 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 (in Chinese).
- [28] 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.
- [29] 张晓晓, 汪多, 田相利, 等. 包膜丁酸钠对凡纳滨对虾生长和血清非特异性免疫酶活性的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(S1): 27-34. Zhang X X, Wang D, Tian X L, *et al.* Effects of coated sodium butyrate on growth performance and serum non-specific immunity enzymes of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(S1): 27-34 (in Chinese).
- [30] Carla Piazzon M, Alvar Calduch-Giner J, Fouz B, *et al.* Under control: how a dietary additive can restore the gut microbiome and proteomic profile, and improve disease resilience in a marine teleostean fish fed vegetable diets[J]. *Microbiome*, 2017, 5(1): 164.
- [31] Ray A K, Ghosh K, Ringø E. Enzyme-producing bacteria isolated from fish gut: a review[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(5): 465-492.
- [32] Cao K L, Wang Y Y, Li M L, *et al.* Supplementation of a multienzyme complex, an organic acid-essential oil complex, and prebiotic alone or in combination affects growth, nutrient utilization, and immune function of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2022, 2022: 1068537.
- [33] Canani R B, Di Costanzo M, Leone L. The epigenetic effects of butyrate: potential therapeutic implications for clinical practice[J]. *Clinical Epigenetics*, 2012, 4(1): 4.
- [34] Wu P, Tian L, Zhou X Q, *et al.* Sodium butyrate enhanced physical barrier function referring to Nrf2, JNK and MLCK signaling pathways in the intestine of young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 73: 121-132.
- [35] Omosowone O O, Dada A A, Adeparusi E O. Comparison of dietary butyric acid supplementation effect on growth performance and body composition of *Clarias gariepinus* and *Oreochromis niloticus* fingerlings[J]. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2018, 17(2): 403-412.

Effects of sodium butyrate on growth, digestive enzyme activity, serum biochemical indices and intestinal histology of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)

XU Kaihui^{1,2,3}, CHEN Yunfeng^{1,2,3}, ZHANG Yugui^{1,2,3}, LI Xiaoqin^{1,2,3}, LENG Xiangjun^{1,2,3*}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education,

College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding,

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The study investigated the effects of dietary supplementation of sodium butyrate on growth performance, intestinal digestive enzyme activity, serum biochemical indices and intestinal morphology of *Ctenopharyngodon idella*. Based on the control diet (SB0), microencapsulated sodium butyrate (containing 50% sodium butyrate) was added at the levels of 0 mg/kg (SB0), 1 000 mg/kg (SB1), 2 000 mg/kg (SB2) and 3 000 mg/kg (SB3) to form four iso-nitrogenous and iso-lipidic diets, respectively. A total of 300 *C. idella* juvenile (10.0±0.1) g were randomly divided into 4 groups with 3 replicates (cages) and 25 fish per replicate. The fish were fed the four diets in indoor cement ponds for 8 weeks. The results showed that the weight gain and feed conversion ratio of all groups were 273.7%-279.9%, 1.55-1.60, and dietary sodium butyrate did not significantly affect the growth performance and body composition of *C. idella* ($P>0.05$). Compared to the control group (SB0), dietary sodium butyrate significantly increased intestinal protease activity and serum superoxide dismutase (SOD) activity ($P<0.05$), and decreased serum aspartate aminotransferase (AST) activity ($P<0.05$). In addition, serum alkaline phosphatase (AKP) activity was increased significantly in SB1 group ($P<0.05$), while serum alanine aminotransferase (ALT) activity was decreased significantly in SB2 and SB3 groups ($P<0.05$). There was no significant difference in intestinal amylase activity, serum acid phosphatase (ACP), triglyceride (TG), glucose (GLU), total protein (TP) and *D*-lactic acid (*D*-LA) among the four groups ($P>0.05$). In intestinal and hepatic histology, the supplementation of sodium butyrate significantly increased the height of intestinal villi ($P<0.05$), and the thickness of muscle layer in SB1 and SB2 groups was significantly higher than that in the control group ($P<0.05$), but no significant differences in intestinal villus width and hepatic histology were observed among the four groups ($P>0.05$). In conclusion, dietary supplementation of sodium butyrate did not significantly promote the growth performance of *C. idella*, but increased the activity of intestinal digestive enzymes and improved the morphology of intestinal tissue.

Key words: *Ctenopharyngodon idella*; sodium butyrate; growth; digestive enzyme; serum biochemical indices; intestinal histology

Corresponding author: LENG Xiangjun. E-mail: xjleng@shou.edu.cn

Funding projects: Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program (X20210301)