

DOI: 10.11964/jfc.20221213858

饲料添加 γ -氨基丁酸对黄颡鱼幼鱼生长、消化酶活性、*lpl* 和 *tor* 基因表达的影响

侯冬强^{1,2}, 李敏^{1,2}, 赵红霞^{1*}, 李培佳^{1,2}, 黄文¹, 曹俊明¹

1. 广东省农业科学院动物科学研究所, 广东省农业科学院水产研究中心, 广东省畜禽育种与营养重点实验室, 广东广州 510640; 2. 广东海洋大学水产学院, 广东湛江 524088

摘要:

【目的】为研究饲料中添加 γ -氨基丁酸 (GABA) 对黄颡鱼生长性能、血清生化、体组成、消化酶活性、脂蛋白脂肪酶 (*lpl*) 和雷帕霉素靶蛋白 (*tor*) 基因表达的影响。

【方法】实验以初始体重为 (1.26±0.01) g 的黄颡鱼幼鱼为研究对象, 共选取 480 尾, 随机分为 4 组, 每组 3 个重复, 分别投喂添加 0 (对照组)、50、100、200 mg/kg γ -氨基丁酸的 4 种等氮等脂饲料, 实验周期为 56 d。

【结果】① 100 mg/kg 组终末体重、增重率、特定生长率显著高于对照组和 200 mg/kg 组。100 mg/kg 组的蛋白沉积率、脂肪沉积率、钙沉积率、磷沉积率显著高于对照组, 饲料系数显著低于对照组。② 50 mg/kg 组和 100 mg/kg 组肝体比显著高于对照组。200 mg/kg 组灰分显著高于对照组。③ 各组间的血清总蛋白、甘油三酯、胆固醇、葡萄糖、尿素、谷草转氨酶、谷丙转氨酶无显著差异。④ 100 mg/kg 组胃中脂肪酶显著高于其他组。100 mg/kg 组肝胰腺中胰蛋白酶显著高于对照组。100 mg/kg 组肠道中脂肪酶显著高于对照组和 50 mg/kg 组。⑤ 100 mg/kg 组肝胰腺中 *tor* 基因表达量显著高于其他组。200 mg/kg 组肠道中 *tor* 基因表达量显著高于其他组。100 mg/kg 组肠道中 *lpl* 基因表达量显著高于其他组。

【结论】饲料中添加 50~100 mg/kg γ -氨基丁酸显著提高了黄颡鱼的生长性能、营养沉积, 添加 100 mg/kg 显著提高了消化酶活性、*lpl* 和 *tor* 基因表达水平, 结合生长、体组成、消化酶活性、*lpl* 和 *tor* 基因表达水平综合评价, 黄颡鱼饲料中 GABA 的适宜添加量为 100 mg/kg。综上所述, 饲料添加 GABA 改善了黄颡鱼生长性能、消化酶活性、体组成和营养保留, 对黄颡鱼生长起到积极作用。

关键词: 黄颡鱼; γ -氨基丁酸; 生长性能; 消化; 营养代谢基因

第一作者: 侯冬强, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: 739769016@qq.com;



李敏, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: limin1632022@163.com

通信作者: 赵红霞, 博士研究生导师, 从事水产动物营养与饲料研究, 主持国家自然科学基金等多项课题, 取得省部级科研成果6项, 发表论文132篇, 授权发明专利21件, E-mail: zhaohongxia8866@163.com



资助项目: 国家自然科学基金 (31402307, 31902388); 广东省自然科学基金 (2021A1515010850)

收稿日期: 2022-12-28
修回日期: 2023-03-22

文章编号:
1000-0615(2025)02-029613-11
中图分类号: S 963.73.1
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)

γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA) 也称为 3 羧基丙胺、4-氨基丁酸或哌啶酸, 是一种非蛋白氨基酸, 乳酸菌和酵母是 GABA 最重要的生产者^[1]。GABA 在单细胞生物到人类的所有生命领域发挥着许



多重要的生化功能^[2-4]。GABA由谷氨酸通过谷氨酸脱羧酶与维生素B₆以5'-磷酸形式作为辅酶脱羧合成,是动物中枢神经系统中的主要抑制性神经递质,在促进鱼类生长、免疫反应和饲料效率方面发挥重要作用^[5-6]。GABA已作为一种新型、高效、安全的饲料添加剂,被广泛应用于水产和畜禽生产。

黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)分布于中国的河流、湖泊、沟渠和其他水域,是一种具有较高经济价值和优良肉质的淡水鱼^[7]。随着水产养殖业迅速发展,大规模、高密度养殖易受到病毒、细菌和寄生虫感染的影响,导致黄颡鱼免疫力下降、生长性能降低,其健康状况和病害防治逐渐引起人们的重视^[8-9]。研究表明,饲料中添加不同水平(0%~1.0%) γ -氨基丁酸能够减少麦瑞加拉鲮(*Cirrhinus mrigala*)缺氧诱导的类固醇激素增加^[10]。草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)幼鱼饲料中添加50~100 mg/kg的 γ -氨基丁酸可提高生长性能和抗氧化状态,最佳添加水平为87.5 mg/kg^[11]。饲料补充0~100 mg/kg GABA增强了罗氏沼虾(*Macrobrachium resenbergi*)幼虾的生长性能、血液免疫反应、抗氧化酶活性,过量的GABA对罗氏沼虾的生长性能无积极影响,在饲料中添加68 mg/kg GABA可最大限度提高生长^[12]。GABA对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)^[4, 13]、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[6]、虎斑乌贼(*Sepia pharaonis*)^[14]等水产动物的生长性能、消化酶活性和营养代谢影响显著。综上所述,饲料中补充50~100 mg/kg GABA可以提高水产动物的生长性能、消化功能和抗氧化能力。然而,目前尚未见GABA在黄颡鱼中应用的相关报道。因此,本实验通过在饲料中添加不同剂量(0~200 mg/kg)的GABA,研究其对黄颡鱼生长、体组成、消化酶活性、*lpl*和*tor*基因表达的影响,评估GABA在饲料中的适宜添加水平,旨在为GABA在黄颡鱼的配合饲料中应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 实验设计

基础饲料中分别补充3种不同剂量(50、100、200 mg/kg)的 γ -氨基丁酸替代等量的面粉,

分别记为50、100和200 mg/kg组;不补充 γ -氨基丁酸的基础饲料为对照组,记为0 mg/kg组,配制成4种等氮(42%)等脂(9%)饲料, γ -氨基丁酸(GABA,纯度>98%,取自广州飞禧特生物科技有限公司)。基础饲料原料组成和营养水平见表1。饲料制作过程参照本实验室前期研究^[15]。

表1 实验饲料配方及营养组成(风干重)

Tab. 1 Formulation and nutrient composition of experimental diets (air-dried matter) %

原料 ingredients	含量 content
鱼粉 fish meal	25.00
豆粕 soybean meal	30.00
菜粕 rapeseed meal	9.00
玉米蛋白粉 corn gluten meal	6.00
面粉 wheat flour	22.30
鱼油 fish oil	2.50
豆油 soybean oil	2.50
维生素预混料 ¹⁾ vitamin premix	0.10
矿物质预混料 ²⁾ mineral premix	0.50
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.50
VC酯 vitamin C ester	0.10
氯化胆碱 choline chloride	0.30
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	0.20
合计 total	100.00
营养水平³⁾ nutrient levels	
粗蛋白 crude protein	42.60
粗脂肪 crude lipid	9.00
粗灰分 crude ash	8.30
水分 moisture	7.80

注: 1)每千克维生素预混料含有VA 3 200 000 IU, VB₁ 4 g, VB₂ 8 g, VB₆ 4.8 g, VB₁₂ 16 mg, VD₃ 1 600 000 IU, VE 16 g, VK 4 g, 泛酸钙16 g, 叶酸1.28 g, 烟酸28 g, 肌醇40 g, 生物素64 mg; 2)每千克矿物质预混料含有MgSO₄·H₂O 12 g, Ca(IO₃)₂ 9 g, KCl 36 g, Met-Cu 1.5 g, ZnSO₄·H₂O 10 g, FeSO₄·H₂O 1 g, Met-Co 250 mg, NaSeO₃ 0.003 6 g; 3)营养水平为实测值。

Notes: 1) one kilogram of vitamin premix contained VA 3 200 000 IU, VB₁ 4 g, VB₂ 8 g, VB₆ 4.8 g, VB₁₂ 16 mg, VD₃ 1 600 000 IU, VE 16 g, VK 4 g, calcium pantothenate 16 g, folic acid 1.28 g, nicotinic acid 28 g, inositol 40 g, biotin 64 mg; 2) one kilogram of mineral premix contained MgSO₄·H₂O 12 g, Ca(IO₃)₂ 9 g, KCl 36 g, Met-Cu 1.5 g, ZnSO₄·H₂O 10 g, FeSO₄·H₂O 1 g, Met-Co 250 mg, NaSeO₃ 0.003 6 g; 3) nutrient levels were measured values.

1.2 养殖管理

所有实验动物均按照广东省农科院动物实验伦理审查委员会制定的实验动物福利伦理原

则进行养殖管理及实验操作。黄颡鱼苗购自广州市白云锦龙渔业有限公司, 鱼苗运回后放入室外水泥池暂养 2 周, 暂养期间每天饱食投喂基础饲料 2 次。实验开始时挑选健康、规格一致 $[(1.26 \pm 0.01) \text{ g}]$ 的黄颡鱼幼鱼 480 尾进行分组, 每组 40 尾, 放入 12 个玻璃纤维圆柱形水桶 (350 L, 有效水体积 300 L) 中开展养殖实验, 饲料随机分配到 4 个实验组, 每组 3 个重复。实验采用室内循环水养殖系统, 同时使用空气泵充氧。实验期间, 每天分别于 8:30 和 16:30 进行饱食投喂, 每周换水 5 次, 每次换水量为总体积的 1/2。养殖实验为 56 d, 每天观察记录实验鱼摄食情况和死亡情况。养殖期间水质条件: 水温 26~33 °C, pH 值 7.7 左右, 溶解氧 $>6.0 \text{ mg/L}$, 亚硝酸盐含量 $<0.01 \text{ mg/L}$, 氨氮含量 $<0.20 \text{ mg/L}$, 自然光照。

1.3 采集样品

养殖实验结束后, 禁食 24 h, 分别对各养殖桶的鱼进行计数和称重。取样前先用 MS-222 溶液 (120 mg/L) 麻醉处理。每箱取 6 尾麻醉鱼尾静脉采血, 在 4 °C 下静置 3 h, 以 3 500 r/min 离心 15 min, 将血清分装收集并保存于 -80 °C 冰箱。每箱随机取 6 尾鱼, 测量其体重、体长、肝脏重和内脏重。随机另取 6 尾鱼, 解剖分离胃、肝胰脏和肠道, 胃和肠道如有食糜则使用镊子轻压清除食糜, 然后 -80 °C 保存。

1.4 实验饲料和实验鱼营养成分测定

采用 AOAC (1984) 方法测定饲料和全鱼的水分、粗蛋白、粗脂肪、粗灰分、钙和磷^[6]。采用凯氏定氮法测定粗蛋白含量; 粗脂肪含量采用索氏抽提法测定; 灰分含量在马弗炉中 600 °C 灼烧测定; 105 °C 下将样品干燥至恒重测定水分含量; 钙含量采用乙二胺四乙酸二钠

络合滴定法测定; 总磷含量采用分光光度法测定。

1.5 血清生化指标测定

血清总蛋白 (TP)、甘油三酯 (TG)、胆固醇 (CHO)、葡萄糖 (GLU)、尿素氮 (BUN)、谷草转氨酶 (AST)、谷丙转氨酶 (ALT) 含量采用全自动化学分析仪 (日立 7600-110, 日本) 测定。

1.6 消化酶活性测定

采用商业试剂盒 (南京建成生物工程研究所) 测定胃蛋白酶、胰蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶活性。

1.7 两种营养代谢基因测定

使用 Trizol 从肠道和肝胰脏中提取总 RNA, 将总 RNA 与无 RNA 的 DNA 酶一起孵育, 去除污染的基因组 DNA。然后分别使用琼脂糖凝胶 (1.2%) 电泳和分光光度法 (260 : 280 nm 比值) 分析来评估质量和数量。然后使用 PrimeScript RT 试剂盒将 RNA 反向转录为 cDNA (TaKaRa, 日本)。表 2 为两种营养代谢基因的特异性引物序列。实时定量 PCR (RT-qPCR) 在 ABI 7500 实时荧光定量 PCR 机器 (美国应用生物系统公司) 中进行。根据序列生成的特异性基因标准曲线计算目的基因和 β -actin 的扩增效率, 验证引物扩增效率接近 100% 后, 根据 Livak & Schmittgen, 采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法计算所有基因的 mRNA 水平。

1.8 计算公式

增重率 (weight gain rate, WGR, %) = $[\text{终末鱼体重} - \text{初始鱼体重}] / \text{初始鱼体重} \times 100\%$

特定增长率 (specific growth rate, SGR, %/d) = $[\ln G_q - \ln G_0] / \text{实验天数} \times 100\%$

摄食率 (feeding rate, FR, %) = $\text{饲料投喂量} / [(G_0 + G_q) \times \text{实验天数} / 2] \times 100\%$

饲料系数 (food coefficient, FC) = 饲料摄入量

表 2 荧光定量 PCR 引物

Tab. 2 Primers used in real-time quantitative PCR

目标 target	基因库编号 GenBank ID	正向引物(5'-3') forward primer (5'-3')	反向引物(5'-3') reverse primer (5'-3')
<i>tor</i>	KY072931	GTGAAGGACCTGACTCAAGCC	TGATAGACTGGATGCGTATGATTGG
<i>lpl</i>	JX992743	GACCAGAGAGATGATGCCGT	TAGCTTAGCTGGCTCTTGCTG
β -actin	XM027148463	TTCGCTGGAGATGATGCT	CGTGCTCAATGGGGTACT

注: *tor* 为雷帕霉素靶蛋白, *lpl* 为脂蛋白脂肪酶。

Notes: *tor* is target of rapamycin; *lpl* is lipoprotein lipase.

$$/(G_q - G_0)$$

肝体比 (hepatosomatic index, HSI, %) = 肝脏重/终末全鱼重 × 100%

脏体比 (viscerosomatic index, VSI, %) = 内脏重/终末全鱼重 × 100%

成活率 (survival rate, SR, %) = 终末鱼尾数/初始鱼尾数 × 100%

蛋白质沉积率 (protein retention value, PRV, %) = $[G_q \times \text{终末鱼蛋白质含量} - G_0 \times \text{初始鱼蛋白质含量}] / [\text{饲料摄入量} \times \text{饲料蛋白含量}] \times 100\%$

脂肪沉积率 (lipid retention value, LRV, %) = $[G_q \times \text{终末鱼脂肪含量} - G_0 \times \text{初始鱼脂肪含量}] / [\text{饲料摄入总量} \times \text{饲料脂肪含量}] \times 100\%$

钙沉积率 (calcium retention value, CaRV, %) = $[G_q \times \text{终末鱼钙含量} - G_0 \times \text{初始鱼钙含量}] / [\text{饲料摄入总量} \times \text{饲料钙含量}] \times 100\%$

磷沉积率 (phosphorus retention value, PhRV, %) = $[G_q \times \text{终末鱼磷含量} - G_0 \times \text{初始鱼磷含量}] / [\text{饲料摄入总量} \times \text{饲料磷含量}] \times 100\%$

式中, G_0 表示初始鱼总重量 (g), G_q 表示终末鱼总重量 (g)。

1.9 数据分析

采用 SPSS 25.0 软件进行数据的统计分析, 采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和 Duncan 氏法进行组间的多重比较。实验数据使用平均值 ± 标准误 (mean ± SE, $n=3$) 表示。

$P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 生长性能

100 mg/kg 组终末鱼体重、WGR、SGR 显著高于对照组和 200 mg/kg 组 ($P < 0.05$) (表 3)。100 mg/kg 组的 PRV、LRV、CaRV、PhRV 显著高于对照组 ($P < 0.05$), FC 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。各组间成 SR、FR、HSI 和 VSI 无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2 体成分

50 和 100 mg/kg 组肝体比显著高于对照组 ($P < 0.05$)。200 mg/kg 组粗灰分显著高于对照组 ($P < 0.05$)。各组间的脏体比、干物质、粗蛋白、粗脂肪、钙、磷无显著差异 ($P > 0.05$) (表 4)。

2.3 血清生化指标

各组间的 TP、TG、CHO、GLU、BUN、AST、ALT 无显著差异 ($P > 0.05$) (表 5)。

2.4 消化酶活性

100 mg/kg 组胃中脂肪酶活性显著高于其他组 ($P < 0.05$), 各组间蛋白酶和淀粉酶活性无显著差异 ($P > 0.05$) (表 6)。100 mg/kg 组肝胰腺中胰蛋白酶活性显著高于对照组 ($P < 0.05$), 各

表 3 饲料中 γ -氨基丁酸对黄颡鱼生长性能的影响

Tab. 3 Effects of dietary γ -aminobutyric acid supplementations on growth performance of *P. fulvidraco*

项目 item	饲料 γ -氨基丁酸添加量 dietary GABA supplementation			
	0 mg/kg	50 mg/kg	100 mg/kg	200 mg/kg
初始鱼体重/g IBW	1.26±0.01	1.26±0.00	1.25±0.01	1.26±0.00
终末鱼体重/g FBW	12.87±0.33 ^a	13.51±0.58 ^{ab}	15.35±0.38 ^b	13.09±0.85 ^a
增重率/% WGR	925.50±27.22 ^a	975.43±45.12 ^{ab}	1123.05±31.52 ^b	942.92±67.19 ^a
特定增长率/(%/d) SGR	4.16±0.05 ^a	4.24±0.07 ^{ab}	4.47±0.05 ^b	4.18±0.12 ^a
摄食率/% FR	3.59±0.21	3.53±0.15	3.37±0.16	3.77±0.62
饲料系数 FCR	1.16±0.03 ^b	1.09±0.03 ^{ab}	0.99±0.02 ^a	1.13±0.07 ^{ab}
肝体比/% HSI	1.76±0.03 ^a	1.90±0.04 ^b	1.92±0.05 ^b	1.89±0.06 ^{ab}
脏体比/% VSI	9.05±0.24	9.03±0.32	8.84±0.18	8.79±0.22
成活率/% SR	92.50±2.50	91.67±4.17	93.33±3.63	94.17±5.83
蛋白质沉积率/% PRV	25.49±1.01 ^a	27.99±1.17 ^{ab}	31.44±2.16 ^b	27.97±1.30 ^{ab}
脂肪沉积率/% LRV	56.44±2.19 ^a	64.57±4.59 ^{ab}	73.05±1.58 ^b	65.59±3.61 ^{ab}
钙沉积率/% CaRV	47.71±3.18 ^a	54.14±3.89 ^{ab}	61.51±5.72 ^b	52.81±1.35 ^{ab}
磷沉积率/% PhRV	52.12±1.31 ^a	60.59±3.38 ^{ab}	67.26±4.49 ^b	59.43±6.42 ^{ab}

注: 同一行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Notes: Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$), the same below.

表 4 饲料中 γ -氨基丁酸对黄颡鱼体成分的影响Tab. 4 Effects of dietary γ -aminobutyric acid on body parameters and body composition of *P. fulvidraco* %

项目 item	饲料 γ -氨基丁酸添加量 dietary GABA supplementation			
	0 mg/kg	50 mg/kg	100 mg/kg	200 mg/kg
干物质 dry matter	25.22 ± 0.28	25.15 ± 0.64	25.23 ± 0.15	25.05 ± 0.20
粗蛋白 crude protein	14.17 ± 0.15	14.16 ± 0.52	14.00 ± 0.06	14.29 ± 0.27
粗脂肪 crude lipid	6.29 ± 0.11	6.71 ± 0.32	6.39 ± 0.24	6.16 ± 0.35
粗灰分 crude ash	2.81 ± 0.12 ^a	2.98 ± 0.06 ^{ab}	2.89 ± 0.05 ^{ab}	3.13 ± 0.04 ^b
钙 calcium	0.79 ± 0.26	0.81 ± 0.25	0.78 ± 0.02	0.84 ± 0.01
磷 phosphorus	0.53 ± 0.01	0.55 ± 0.05	0.53 ± 0.02	0.57 ± 0.01

表 5 饲料中 γ -氨基丁酸对黄颡鱼血清生化指标的影响Tab. 5 Effects of dietary γ -aminobutyric acid on blood biochemical indices of *P. fulvidraco*

项目 item	饲料 γ -氨基丁酸添加量 dietary GABA supplementation			
	0 mg/kg	50 mg/kg	100 mg/kg	200 mg/kg
总蛋白/(g/L) TP	32.40±0.72	33.07±1.42	33.47±0.79	33.57±0.75
甘油三酯/(mmol/L) TG	5.40±0.49	6.09±0.54	5.84±0.69	5.71±1.03
胆固醇/(mmol/L) CHO	4.82±0.08	4.71±0.25	4.65±0.13	4.54±0.17
葡萄糖/(mmol/L) GLU	6.08±0.76	5.95±0.40	5.63±0.64	5.12±0.31
尿素氮/(mmol/L) BUN	0.67±0.07	0.70±0.05	0.70±0.01	0.63±0.09
谷草转氨酶/(U/L) AST	560.04±22.72	498.43±1.53	492.98±39.05	554.11±14.42
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	13.50±1.50	14.67±0.67	11.67±1.33	15.00±2.08

表 6 饲料中 γ -氨基丁酸对黄颡鱼消化酶活性的影响Tab. 6 Effects of dietary γ -aminobutyric acid on digestive enzyme activities of *P. fulvidraco* U/mg protein

项目 item	饲料 γ -氨基丁酸添加量 dietary GABA supplementation			
	0 mg/kg	50 mg/kg	100 mg/kg	200 mg/kg
胃 stomach				
蛋白酶 protease	15.51 ± 1.19	17.92 ± 3.76	13.59 ± 2.33	14.81 ± 1.25
脂肪酶 lipase	33.91 ± 2.73 ^a	37.16 ± 2.12 ^a	45.64 ± 0.97 ^b	36.33 ± 2.83 ^a
淀粉酶 amylase	0.64 ± 0.07	0.54 ± 0.01	0.61 ± 0.14	0.70 ± 0.06
肝胰腺 hepatopaneas				
胰蛋白酶 trypsin	171.61 ± 8.26 ^a	199.45 ± 12.83 ^{ab}	235.01 ± 28.37 ^b	188.40 ± 5.69 ^{ab}
脂肪酶 lipase	8.19 ± 0.18	9.87 ± 2.02	8.99 ± 0.49	7.98 ± 0.88
淀粉酶 amylase	0.64 ± 0.06	0.66 ± 0.05	0.68 ± 0.02	0.69 ± 0.05
肠道 intestine				
胰蛋白酶 trypsin	389.90 ± 12.15	409.32 ± 31.53	411.6 ± 28.17	395.54 ± 28.13
脂肪酶 lipase	17.85 ± 1.67 ^a	18.54 ± 1.22 ^{ab}	27.14 ± 3.80 ^c	26.55 ± 2.58 ^{bc}
淀粉酶 amylase	1.62 ± 0.04	1.40 ± 0.12	1.47 ± 0.11	1.52 ± 0.12

组间脂肪酶和淀粉酶活性无显著差异 ($P>0.05$)。100 mg/kg 组肠道中脂肪酶活性显著高于对照组和 50 mg/kg 组 ($P<0.05$)，各组胰蛋白酶和淀粉酶活性无显著差异 ($P>0.05$)。

2.5 *lpl* 和 *tor* 基因表达

由图 1 可知，100 mg/kg 组肝胰腺中 *tor* 基因表达量显著高于其他组 ($P<0.05$)，各组间 *lpl* 表达量无显著差异 ($P>0.05$)。100 mg/kg 和 200

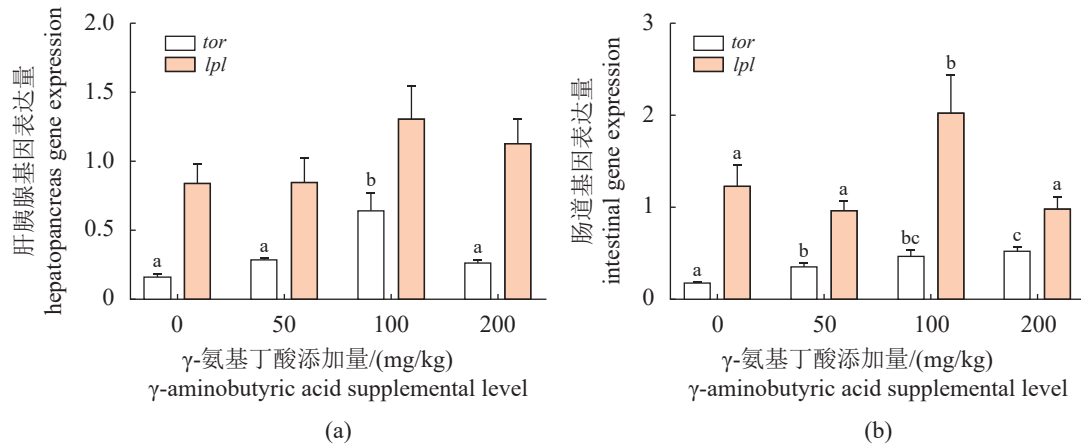


图1 饲料中 γ -氨基丁酸对黄颡鱼 *lpl* 和 *tor* 基因表达的影响

不同字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 Effects of dietary γ -aminobutyric acid on the expression of key genes of nutrient metabolism in *P. fulvidraco*

Different letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

mg/kg 组肠道中 *tor* 基因表达量显著高于对照组 ($P < 0.05$)。100 mg/kg 组肠道中 *lpl* 基因表达量显著高于其他组 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 γ -氨基丁酸对黄颡鱼生长性能的影响

GABA 作为一种抑制性神经递质, 可显著降低动物的压力指数, 通过控制动物的神经兴奋影响其新陈代谢, 从而提高动物的生长性能^[17-18]。饲料中添加 GABA 可显著增加水产动物的体重、降低饲料系数以及诱导生长基因的表达, 表明 GABA 可以改善水产动物的生长性能^[1,4,6]。本研究中, 饲料添加 100 mg/kg 组 WGR、FBW、SGR、PRV、LRV、CaRV、PhRV 显著高于对照组, FC 显著低于对照组, 各组间的 VSI、干物质、粗蛋白、粗脂肪、钙、磷无显著差异, 其原因可能是随着 γ -氨基丁酸添加量的增加, 增重率和沉积率先增加后降低, 由公式可看出沉积率与鱼的终末体重密切相关, 而与干物质无关, 所以沉积率的变化随着 FBW 的增加而改变。Bae 等^[6]发现在凡纳滨对虾饲料中添加 100 mg/kg GABA 可显著提高凡纳滨对虾增重、比生长率、饲料系数和蛋白效率, 显著提高了凡纳滨对虾的生长性能。中华绒螯蟹饲料中添加 GABA 的最佳水平为 84~89 mg/kg, 该水平可以提高幼年中华绒螯蟹蜕壳频率、摄食量、消化和吸收, 显著提高了生长性能^[4]。建鲤 (*Cyprinus carpio* var. *jian*) 饲料中添加

GABA, 采食量随着 GABA 的增加而增加, GABA 可通过影响下丘脑食欲相关因子的表达 (神经肽 Y、胆囊收缩素和生长素释放肽等) 调节摄食量和采食量来促进生长^[19]。根据以往的研究和本实验获得的结果, 推断 GABA 可改善水产动物生长性能, 而 GABA 的添加量对生长性能的影响起到决定性作用。Wu 等^[11]发现 GABA 添加量为 50~150 mg/kg, 随着添加量的增加, 可显著提高草鱼幼鱼生长速率、超氧化物歧化酶和总抗氧化酶活性, 而超过 200 mg/kg 时上述参数均有所下降。本研究表明, 饲料中添加 100 mg/kg GABA 可显著提高黄颡鱼生长性能, 水产饲料中添加 GABA 存在“剂量-效应反应”。

3.2 γ -氨基丁酸对黄颡鱼血清生化的影响

血清生化指标是用来评价动物生理、代谢、营养和身体器官病变状况的重要指标, 其中, 总蛋白、尿素、甘油三酯、胆固醇、血糖是参与氨基酸代谢和蛋白质、脂肪、糖代谢过程的重要指标^[20]。脂肪除了作为鱼类的能量来源, 还可以提供必需脂肪酸和作为可溶性维生素的载体^[21]。尿素是蛋白质代谢最终产物, 其指标也是判断机体蛋白质代谢能力强弱的关键指标。胆固醇是细胞膜重要组成部分, 也是体内胆汁酸以及肾上腺皮质激素、维生素 D 等的合成前体物质, 在鱼类生长发育过程中发挥着重要作用^[22]。本研究结果表明, 各组间的 TP、TG、CHO、GLU、BUN 含量无显著差异, 表明

GABA 在调节脂质、蛋白质和糖代谢过程方面无显著效果。补充 GABA 对在低氧应激状态下麦瑞加拉鲮的甘油三酯和胆固醇无显著影响, 与本试验结论相同^[10]。赵文静等^[23]在研究 GABA 对蛋鸽产蛋性能影响中发现, 与对照组相比, 80 mg/kg 的 GABA 可显著降低血清中甘油三酯含量。赵红霞等^[24]报道, 相比对照组, 饲料中添加 100 和 150 mg/kg GABA 显著提高了凡纳滨对虾血清总蛋白、胆固醇、甘油三酯含量, 与本研究结果不一致。饲喂断奶仔猪补充 40 和 80 mg/kg GABA 的饲料可显著降低血清中总胆固醇、低密度脂蛋白和甘油三酯浓度^[25]。给大鼠灌服 2 mg/kg GABA, 血浆中总胆固醇含量显著低于对照组^[26]。综上所述, GABA 对不同动物血清中脂质的影响结果并不相同, 本研究的结果表明, GABA 不参与脂质代谢过程, 对黄颡鱼幼鱼脂质代谢无影响。Chen 等^[19]研究发现, 建鲤饲料中添加 90 mg/kg GABA 显著增加了血清中总蛋白和血糖的水平, 并显著降低 AST 和 ALT 水平。AST 和 ALT 等血淋巴生化参数是评价肝脏功能健康状况的重要指标, 这些酶在血淋巴中的变化可以指示肝胰腺损伤, 并用于诊断动物疾病^[27-28]。本研究结果表明, 各组间的 AST 和 ALT 无显著差异, 表明饲料中添加 GABA 对黄颡鱼肝脏健康无显著损害。本研究结果与凡纳滨对虾^[6]中的研究结果一致。而 Li 等^[14]发现, 饲喂虎斑乌贼添加 58.9 mg/kg GABA 的饲料可显著降低血清中谷草转氨酶的水平, 但添加过量 GABA 可显著增加血清中谷草转氨酶的水平, 表明过量添加 GABA 可能会损害虎斑乌贼肝脏健康。研究表明, 3 种不同剂量的 GABA 对黄颡鱼脂质、蛋白和血糖代谢无显著影响, 并且 3 种添加剂量不会对黄颡鱼肝脏产生损害作用。

3.3 γ -氨基丁酸对黄颡鱼形体指标和体组成的影响

形体指标和体组成是评价水产动物生长和营养状况的重要指标, 肝体比、脏体比、肠体比等形体指标增加时, 鱼体内脏器官可能因脂肪堆积或炎症反应出现内脏器官肥大^[29]。饲料中添加 GABA (0~200 mg/kg) 对草鱼肝体比和脏体比无显著影响^[10]。本研究结果表明, 饲料中添加 50 和 100 mg/kg 黄颡鱼肝体比显著高于对

照组, 各组间血清 AST、ALT、TG 和 CHO 无显著差异, 饲料中添加 GABA 并不会对黄颡鱼肝脏产生损害作用, 并不会影响脂肪在肝脏中的堆积, 分析原因可能是黄颡鱼幼鱼免疫系统发育尚不完全, 养殖期间遭受疾病侵袭。本研究发现, 各组间的脏体比、干物质、粗蛋白、粗脂肪、钙、磷无显著差异。本研究结果与凡纳滨对虾^[6]和草鱼幼鱼^[11]中的研究结果一致, 饲料中添加 GABA, 各组间体成分无显著差异。本研究结果表明, 饲料中添加 GABA 对黄颡鱼幼鱼肝脏无损害作用, 而且对黄颡鱼体成分无显著影响, GABA 对黄颡鱼体成分和肝脏健康长期的影响需要进一步研究。

3.4 γ -氨基丁酸对黄颡鱼消化酶活性的影响

消化酶是一类重要的生物分子, 可将营养物质从其复杂的聚合结构中分解成更小、更易消化的成分, 消化酶活性反映了机体消化、吸收和利用营养的能力^[1,4]。鱼胰腺是蛋白酶和脂肪酶的主要合成和分泌部位, 胰蛋白酶和脂肪酶的合成和活性与胰腺的生长和发育有关^[30]。本研究结果表明, 100 mg/kg 组胃中脂肪酶显著高于其他组; 肝胰腺中胰蛋白酶显著高于对照组; 肠道中脂肪酶显著高于对照组和 50 mg/kg 组。以往的研究结果与本研究结果相似, 在牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*) 饲料中添加 GABA, 显著提高了牙鲆的肠道胰蛋白酶和淀粉酶活性, 改善了牙鲆的生长^[1,31]。Zhang 等^[13]饲喂中华绒螯蟹添加 GABA 的饲料, 显著提高了 α -淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶的活性, 促进了中华绒螯蟹消化吸收, 提高了生长性能。在饲料中添加 GABA 前体物质谷氨酸, 可显著提高草鱼肝胰腺消化酶活性^[32], 并提高松浦镜鲤幼鱼 (*C. carpio* Songpu) 肠道中脂肪酶和淀粉酶活性^[33]。相似的研究中, 谷氨酰胺可改善建鲤^[34]和杂交鲟 [*Acipenser schrenckii*(♀)×*Huso dauricus*(♂)]^[35]的肠道蛋白酶和脂肪酶活性。本研究结果表明, 黄颡鱼饲料中添加 GABA 可提高胃、肝胰腺和肠道消化酶活性, 增强消化和吸收能力, 促进黄颡鱼生长发育。

3.5 γ -氨基丁酸对黄颡鱼 *lpl* 和 *tor* 基因表达的影响

lpl 是一种脂解酶, 以乳糜微粒和极低密度脂蛋白形式的甘油三酯水解成游离脂肪酸和 2-

单酰基甘油, 影响动物脂肪沉积和组织之间脂质分配, 主要在具有高脂质氧化或储存需求的组织中表达^[36-37]。GABA 对鱼类营养代谢基因的影响鲜有报道, 本研究结果表明, 饲料中添加不同剂量的 GABA 对黄颡鱼肝胰腺中 *lpl* mRNA 表达量无显著影响, 添加 100 mg/kg 组肠道中 *lpl* mRNA 表达量显著提高, 表明 GABA 可提高黄颡鱼肠道中 *lpl* mRNA 的表达, 促进肠道脂质水解与吸收。但在建鲤中的研究发现, GABA 的前体物质谷氨酸降低了 *lpl* mRNA 在鱼体肌肉中的表达^[38], 与本研究结果不同, 可能 GABA 与其前体物质谷氨酸的作用机制存在差异。鱼类以及其他脊椎动物的组织蛋白合成受 *tor* 信号通路的调节, 鱼类中营养保留与 *tor* 信号通路之间密切相关^[39-40]。本研究中对黄颡鱼幼鱼饲料中添加 100 mg/kg GABA 肝胰腺中 *tor* mRNA 表达量显著提高, 与对照组相比, 添加 100 和 200 mg/kg 组肠道中 *tor* mRNA 表达量显著提高。表明 GABA 可能通过激活 *tor* 信号通路, 改善黄颡鱼蛋白质组成, 添加量不同的 *tor* mRNA 在肠道和肝胰腺的表达量也不相同。Zhao 等^[38] 在建鲤饲料中添加谷氨酸显著提高了肌肉中 *tor* mRNA 的表达, 促进肌肉中必需氨基酸的沉积, 增加肌肉蛋白质含量。本实验结果表明, 饲料中添加 100 mg/kg GABA 显著提高了肠道中的 *tor* 和 *lpl* mRNA 的表达量, 促进肠道蛋白质合成和脂质的沉积, 而其影响的潜在机制仍需进一步研究。

综上, 饲料添加 GABA 改善了黄颡鱼生长性能、消化酶活性、体组成和营养保留, 对其生长起到积极作用。本实验条件下, GABA 在黄颡鱼饲料中的适宜添加剂量为 100 mg/kg。

参考文献 (References):

- [1] Farris N W, Hamidoghli A, Bae J, *et al.* Dietary supplementation with γ -aminobutyric acid improves growth, digestive enzyme activity, non-specific immunity and disease resistance against *Streptococcus iniae* in juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. *Animals*. 2022, 12(3): 248.
- [2] Li C Q, Tian Y, Ma Q Y, *et al.* Dietary gamma-aminobutyric acid ameliorates growth impairment and intestinal dysfunction in turbot (*Scophthalmus maximus* L.) fed a high soybean meal diet[J]. *Food & Function*. 2022, 13(1): 290-303.
- [3] Sterndale S O, Miller D W, Mansfield J P, *et al.* Dietary gamma-aminobutyric acid supplementation does not mitigate stress responses in weaner pigs given adrenocorticotrophic hormone and experimentally infected with enterotoxigenic *Escherichia coli*[J]. *Livestock Science*. 2022, 256: 104818.
- [4] Zhang C, Wang X D, Su R Y, *et al.* Dietary gamma-aminobutyric acid (GABA) supplementation increases food intake, influences the expression of feeding-related genes and improves digestion and growth of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Aquaculture*. 2022, 546: 737332.
- [5] Li X Y, Zheng S X, Wu G Y. Nutrition and metabolism of glutamate and glutamine in fish[J]. *Amino Acids*. 2020, 52(5): 671-691.
- [6] Bae J, Hamidoghli A, Farris N W, *et al.* Dietary γ -aminobutyric acid (GABA) promotes growth and resistance to *Vibrio alginolyticus* in whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture Nutrition*. 2022, (1): 9105068.
- [7] 王国霞, 孙育平, 牛凤池, 等. 外源酶制剂对黄颡鱼稚鱼消化酶活性、消化率及粪便氮磷含量的影响 [J]. 广东海洋大学学报. 2017, 37(6): 19-25.
- Wang G X, Sun Y P, Niu F C, *et al.* Effects of exogenous enzyme preparations on digestive enzyme activity, digestibility and fecal nitrogen and phosphorus content in juvenile fish[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*. 2017, 37(6): 19-25 (in Chinese).
- [8] Li P J, Hou D Q, Zhao H X, *et al.* Dietary pyridoxine effect on growth performance, physiological metabolic parameters, intestinal enzymatic activities and antioxidant status of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Aquaculture Reports*. 2022, 24: 101153.
- [9] Li P J, Hou D Q, Zhao H X, *et al.* Dietary clostridium butyricum improves growth performance and resistance to ammonia stress in yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Aquaculture Nutrition*. 2022(1): 6965174.
- [10] Varghese T, Rejish Kumar V J, Anand J, *et al.* Dietary GABA enhances hypoxia tolerance of a bottom-dwelling carp, *Cirrhinus mrigala* by modulating HIF-1 α , thyroid hormones and metabolic responses[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*. 2020, 46(1): 199-212.
- [11] Wu F, Liu M M, Chen C, *et al.* Effects of dietary gamma aminobutyric acid on growth performance, antioxidant status, and feeding-related gene expression of juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2022, 53(1): 1-11.

- ture Society. 2016, 47(6): 820-829.
- [12] Kumar M, Gupta G, Varghese T. Effect of dietary gamma-aminobutyric acid on growth performance, haemato-immunological responses, antioxidant enzymes activity, ghrelin and IGF-I expression of *Labeo rohita* (Hamilton, 1822) fingerlings[J]. Comparative Clinical Pathology. 2023, 32(1): 53-65.
- [13] Zhang C, He J Q, Wang X D, *et al.* Dietary gamma-aminobutyric acid (GABA) improves non-specific immunity and alleviates lipopolysaccharide (LPS)-induced immune overresponse in juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Fish & Shellfish Immunology. 2022, 124: 480-489.
- [14] Li J P, Jiang M W, Han Q X, *et al.* Effects of γ - aminobutyric acid supplementation on the growth performance, serum biochemical indices and antioxidant status of pharaoh cuttlefish, *Sepia pharaonis*[J]. Aquaculture Nutrition. 2020, 26(4): 1026-1034.
- [15] 王海瑞, 莫文艳, 赵红霞, 等. 饲料添加丁酸梭菌对黄颡鱼生长性能及血清生化指标、免疫功能和抗氧化能力的影响 [J]. 动物营养学报. 2022, 34(8): 5295-5303.
- Wang H R, Mo W Y, Zhao H X, *et al.* Effects of adding clostridium butyricum in diets on growth performance, serum biochemical indices, immune function and antioxidant ability of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(8): 5295-5303 (in Chinese)
- [16] Cheng Z, Yang H, Xu Z, *et al.* Dietary supplementation of tributyrin improved the growth, feed utilization and intestinal histology of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Aquaculture Nutrition. 2021, 27(6): 2007-2018.
- [17] Liu J W, Mai K S, Xu W, *et al.* Effects of dietary glutamine on survival, growth performance, activities of digestive enzyme, antioxidant status and hypoxia stress resistance of half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis* Günther) post larvae[J]. Aquaculture. 2015, 446: 48-56.
- [18] Turenius C I, Httut M M, Prodon D A, *et al.* GABA receptors in the lateral hypothalamus as mediators of satiety and body weight regulation. [J]. Brain Research. 2009, 1262: 16-24.
- [19] Chen X M, Gao C S, Du X Y, *et al.* Effects of dietary γ - aminobutyric acid levels on the growth, serum biochemical indexes, immune - related signalling molecules of *Jian* carp[J]. Aquaculture Research. 2021, 52(3): 1096-1105.
- [20] Chen X M, Guo G L, Sun L, *et al.* Effects of Ala-Gln feeding strategies on growth, metabolism, and crowding stress resistance of juvenile *Cyprinus carpio* var. *Jian*[J]. Fish & Shellfish Immunology. 2016, 51: 365-372.
- [21] 孙阳, 姜志强, 李艳秋, 等. 饲料脂肪水平对红鳍东方鲀幼鱼肝脏抗氧化酶活力及组织结构的影响 [J]. 广东海洋大学学报. 2013, 33(3): 27-32.
- Sun Y, Jiang Z Q, Li Y Q, *et al.* Effects of Dietary lipid on the liver antioxidant capacity and histology of *Takifugu rubripes* juvenile[J]. Journal of Guangdong Ocean University. 2013, 33(3): 27-32 (in Chinese).
- [22] 陈强, 刘泓宇, 谭北平, 等. 饲料胆固醇对军曹鱼幼鱼生长、血液生化指标及脂代谢的影响 [J]. 广东海洋大学学报. 2016, 36(1): 35-43.
- Chen Q, Liu H Y, Tan B P, *et al.* Effects of dietary cholesterol level on growth performance, blood biochemical parameters and lipid metabolism of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. Journal of Guangdong Ocean University. 2016, 36(1): 35-43 (in Chinese).
- [23] 赵文静, 邹晓庭, 张敏, 等. γ -氨基丁酸对蛋鸽产蛋性能和血清生化指标的影响 [J]. 饲料工业. 2010, 31(12): 24-26.
- Zhao W J, Zou X T, Zhang M, *et al.* Effects of gamma-aminobutyric acid on laying performance and serum biochemical parameters of pigeons[J]. Feed Industry, 2010, 31(12): 24-26 (in Chinese).
- [24] 赵红霞, 陈晓瑛, 王国霞, 等. 饲料中添加 γ -氨基丁酸对凡纳滨对虾生长性能、血清生化指标和抗亚硝酸氮应激能力的影响 [J]. 动物营养学报. 2020, 32(9): 4251-4259.
- Zhao H X, Chen X Y, Wang G X, *et al.* Effects of dietary γ -aminobutyric acid supplemental level on growth performance, serum biochemical indices and anti-nitrite-nitrogen stress ability of *Litopenaeus vannameion*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(9): 4251-4259 (in Chinese).
- [25] 杨兵, 韩晓洁, 夏先林, 等. γ -氨基丁酸对断奶仔猪养分代谢的影响 [J]. 饲料研究. 2012(9): 7-9, 50.
- Yang B, Han X J, Xia X L, *et al.* Effects of γ -aminobutyric acid on nutrient metabolism in weaned piglets[J]. Feed Research. 2012(9): 7-9, 50 (in Chinese).
- [26] 欧阳俊彦, 胡卓炎, 褚玥, 等. γ -氨基丁酸对情绪应激大鼠血脂的影响 [J]. 营养学报. 2013, 35(3): 241-245.
- Ouyang J Y, Hu Z Y, Chu Y, *et al.* Effects of γ -aminobutyric acid on blood lipids in rats under emotional stress[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2013, 35(3): 241-245 (in Chinese).
- [27] Pacheco M, Santos M A. Biotransformation, genotoxic, and histopathological effects of environmental contaminants in European eel (*Anguilla anguilla* L.)[J]. Ecotoxicology and

- Environmental Safety. 2002, 53(3): 331-347.
- [28] Zhou Q C, Cun Z, B Y, *et al.* Dietary threonine requirements of juvenile Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. Aquaculture. 2013, 392-395: 142-147.
- [29] 彭凯, 萧鸿发, 莫文艳, 等. 黑水虻幼虫替代鱼粉对加州鲈生长性能, 形体指标, 体成分及营养物质沉积率的影响 [J]. 动物营养学报. 2021, 33(11): 6340-6348.
- Peng K, Xiao H F, Mo W Y, *et al.* Effects of replacing fish meal with black soldier fly larvae meal on growth performance, physical indexes, body composition and nutrient retention rates of *Micropterus salmoides*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(11): 6340-6348 (in Chinese).
- [30] Infante J L Z, Cahu C L. Ontogeny of the gastrointestinal tract of marine fish larvae[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology. 2001, 130(4): 477-487.
- [31] Bae J, Hamidoghli A, Won A, *et al.* Evaluation of seven different functional feed additives in a low fish meal diet for olive flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. Aquaculture. 2020, 525: 735333.
- [32] Zhao Y, Hu Y, Zhou X Q, *et al.* Effects of dietary glutamate supplementation on growth performance, digestive enzyme activities and antioxidant capacity in intestine of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Aquaculture Nutrition. 2015, 21(6): 935-941.
- [33] 李晋南, 王常安, 王连生, 等. 低磷饲料添加谷氨酸对松浦镜鲤幼鱼肠道消化酶活性及肠道形态的影响 [J]. 广东海洋大学学报. 2019, 39(4): 20-26.
- Li J N, Wang C G, Wang L S, *et al.* Effects of glutamic acid addition to low-phosphorus feed on intestinal digestive enzyme activity and intestinal morphology of *Cyprinus carpio* Songpu juveniles[J]. Journal of Guangdong Ocean University. 2019, 39(4): 20-26 (in Chinese).
- [34] Yan L, Xiao Q Z. Dietary glutamine supplementation improves structure and function of intestine of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. *Jian*) [J]. Aquaculture. 2006, 256(1-4): 389-394.
- [35] Xu Q Y, Zhu Q, Xu H, *et al.* Dietary glutamine supplementation improves growth performance and intestinal digestion/absorption ability in young hybrid sturgeon (*Acipenser schrenckii* ♀×*Huso dauricus* ♂)[J]. Journal of Applied Ichthyology. 2011, 27(2): 721-726.
- [36] Preiss-Landl K, Zimmermann R, Hämmerle G, *et al.* Lipoprotein lipase: the regulation of tissue specific expression and its role in lipid and energy metabolism. [J]. Current Opinion in Lipidology. 2002, 13(5): 471-481.
- [37] Albalat A, Saera-Vila A, Capilla E, *et al.* Insulin regulation of lipoprotein lipase (LPL) activity and expression in gilthead sea bream (*Sparus aurata*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology. 2007, 148(2): 151-159.
- [38] Zhao Y, Li J Y, Yin L. Effects of dietary glutamate supplementation on flesh quality, antioxidant defense and gene expression related to lipid metabolism and myogenic regulation in Jian carp (*Cyprinus carpio* var. *Jian*)[J]. Aquaculture. 2019, 502: 212-222.
- [39] Jiang W D, Wen H L, Liu Y, *et al.* Enhanced muscle nutrient content and flesh quality, resulting from tryptophan, is associated with anti-oxidative damage referred to the Nrf2 and TOR signalling factors in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*): avoid tryptophan deficiency or excess[J]. Food Chemistry. 2016, 199: 210-219.
- [40] 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 albiglora*, Richardson)[J]. Aquaculture Research. 2020, 51(1): 69-79.

Effects of dietary γ -aminobutyric acid on growth, digestive enzyme activities, *lpl* and *tor* gene expressions of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)

HOU Dongqiang^{1,2}, LI Min^{1,2}, ZHAO Hongxia^{1*}, LI Peijia^{1,2}, HUANG Wen¹, CAO Junming¹

1. Guangdong Key Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Collaborative Innovation Center of Aquatic Sciences, Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of dietary γ -aminobutyric acid (GABA) on growth performance, serum biochemistry, body composition, digestive enzyme activity, *lpl* and *tor* gene expression of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*). Four isonitrogenous and isolipidic diets were formulated to contain graded levels of GABA (0, 50, 100 and 200 mg/kg of diet) by adding GABA. A total of 480 fish with an initial average body weight of (1.26±0.01) g were randomly divided into four groups with three replicates of 40 fish each, and each group was fed with one of the diets for 56 d. The results showed that: (1) The final body weight, weight gain rate and specific growth rate of the 100 mg/kg group were significantly higher than those of the control group and 200 mg/kg group. The protein deposition rate, fat deposition rate, calcium deposition rate, and phosphorus deposition rate of the 100 mg/kg group were significantly higher than those of the control group, and the feed ratio was significantly lower than that of the control group. (2) The liver-body ratio of the 50 mg/kg group and 100 mg/kg group was significantly higher than that of the control group. Ash in the 200 mg/kg group was significantly higher than in the control group. (3) There were no significant differences in total protein, triglyceride, cholesterol, glucan, urea, aspartate aminotransferase and alanine aminotransferase among the three groups. (4) The gastric lipase in the 100 mg/kg group was significantly higher than in other groups. Trypsin in the hepatopancreas of the 100 mg/kg group was significantly higher than that of the control group. The 100 mg/kg group had a significantly higher level of intestinal lipase than the control and 50 mg/kg groups ($P<0.05$). (5) The *tor* gene expression in the hepatopancreas of the 100 mg/kg group was significantly higher than that of other groups. The *tor* gene expression in the intestine was significantly higher in the 200 mg/kg group than in the other groups. The intestinal *lpl* gene expression was significantly higher in the 100 mg/kg group than in the other groups. The study showed that the dietary addition of 50-100 mg/kg γ -aminobutyric acid significantly improved the growth performance and body composition of *P. fulvidraco*, and the dietary addition of 100 mg/kg significantly increased the digestive enzyme activity, *lpl* and *tor* gene expression levels. Combined with the comprehensive evaluation of growth, body composition, digestive enzyme activity, *lpl* and *tor* gene expression levels, the dietary addition of 50-100 mg/kg γ -aminobutyric acid significantly increased the digestive enzyme activity of *P. fulvidraco*. The optimal amount of GABA added to the diet of yellow catfish was 100 mg/kg. In summary, adding GABA to feed improved the growth performance, digestive enzyme activity, body composition and nutrient retention of *P. fulvidraco*, and played a positive role in the growth of *P. fulvidraco*.

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; γ -aminobutyric acid; growth performance; digestion; nutrient metabolism gene

Corresponding author: ZHAO Hongxia. E-mail: zhaohongxia8866@163.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31402307, 31902388); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2021A1515010850)