

## 饲料牛磺酸对尼罗罗非鱼生长、体成分及组织游离氨基酸含量的影响

周铭文, 王和伟, 叶继丹\*

(集美大学水产学院, 厦门市饲料检测与安全评价重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 本实验旨在探讨饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼幼鱼生长性能、体成分及游离氨基酸含量的影响。选用体质量为 $(5.89 \pm 0.03)$ g 的尼罗罗非鱼 300 尾, 随机分为 5 个处理组, 每个处理 3 个重复, 每个重复 20 尾。在基础饲料中分别添加 0、0.4%、0.8%、1.2% 和 1.6% 的牛磺酸, 配制成 5 种实验饲料, 分别饲喂不同处理组的罗非鱼, 饲养周期为 56 d。结果表明: 0.8% 牛磺酸组罗非鱼增重率最高, 且显著高于对照组和 1.6% 组 ( $P < 0.05$ ); 饲料牛磺酸水平 (0.4%~1.6%) 提高了罗非鱼摄食率、肝体比和脏体比, 但降低了饲料系数 ( $P < 0.05$ )。随着饲料牛磺酸水平的提高, 全鱼粗蛋白质和粗脂肪含量随之升高, 全鱼水分和粗灰分含量随之降低 ( $P < 0.05$ ); 以增重率为指标, 通过二次曲线回归分析得出尼罗罗非鱼饲料牛磺酸最适需要量为 0.75%。罗非鱼血清、肝脏、肌肉和全鱼中牛磺酸含量与饲料牛磺酸含量存在正相关关系, 且牛磺酸添加组血清、肝脏、肌肉和全鱼牛磺酸含量显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。罗非鱼肝脏和肌肉中游离氨基酸含量随饲料牛磺酸含量的增加均呈逐渐下降的趋势, 且牛磺酸添加组肝脏和肌肉中游离氨基酸含量显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。

**关键词:** 尼罗罗非鱼; 牛磺酸; 生长性能; 体成分; 游离氨基酸

**中图分类号:** S 963

**文献标志码:** A

牛磺酸的化学名为 2-氨基乙磺酸, 是一种  $\beta$  型含硫氨基酸。自 1976 年 Hayes 等<sup>[1]</sup>发现猫牛磺酸缺乏症以来, 大量学者不断发现牛磺酸在脊椎动物中的新功能, 如作为生物膜的稳定剂、参与三大营养物质代谢、抗氧化和免疫调节等<sup>[2-3]</sup>。在鱼类, 当饲料中补充适量牛磺酸可以显著提高大菱鲆 (*Scophthalmus maximus* L.)<sup>[4]</sup>、真鲷 (*Pagrus major*)<sup>[5]</sup> 和牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*)<sup>[6]</sup> 等鱼类的生长性能, 而当饲料中缺乏牛磺酸时鲷鱼 (*Seriola quinqueradiata*) 的生长变得迟缓, 并出现绿肝综合征<sup>[7]</sup>。可见, 牛磺酸是鱼类生长发育必不可少的营养物质。牛磺酸是由半胱氨酸、胱氨酸和蛋氨酸等含硫氨基酸经过一系列酶促反应合成的<sup>[8]</sup>, 而鱼类合成牛磺酸的能力与牛磺酸合成关键酶的活性密切相关, 而且这种能力也存在种类差异, 不同鱼类合成

牛磺酸能力不同, 因此种间需要量不同<sup>[9-10]</sup>; 同种鱼不同生理阶段合成牛磺酸的能力不同, 因此, 同种鱼不同阶段的需要量也不同<sup>[11-12]</sup>。许多海洋鱼类处于仔鱼期和幼鱼期时, 不能合成足够的牛磺酸来满足其生长需要<sup>[13]</sup>, 需要补充外源性牛磺酸。

游离氨基酸具有合成蛋白质作用, 构成体内氨基酸的动态平衡, 维持正常生命活动, 并为鱼类幼体发育提供能量<sup>[14-15]</sup>。饲料牛磺酸水平可以改变鱼类体内游离氨基酸含量。当给予适宜饲料牛磺酸水平时, 大西洋鲑 (*Salmo salar*) 肝脏中所有必需游离氨基酸含量升高<sup>[16]</sup>。目前, 还没有关于饲料牛磺酸水平与尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 生长性能、组织游离氨基酸含量关系的研究报道。本实验研究了饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼生长性能、体成分和组织游离氨基酸含量

收稿日期: 2014-10-17 修回日期: 2014-12-15

资助项目: 国家自然科学基金 (31372546)

通信作者: 叶继丹, E-mail: yjdwk@sina.com

的影响,旨在探讨饲料牛磺酸水平与尼罗罗非鱼不同组织牛磺酸沉积和游离氨基酸含量之间的关系,确定尼罗罗非鱼对饲料牛磺酸的适宜需要量,为尼罗罗非鱼饲料的配制提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计和饲料

以酪蛋白和明胶为蛋白源(蛋白质含量均为95%),鱼油、豆油和大豆卵磷脂为脂肪源,面粉为淀粉源配制一个低牛磺酸含量的基础料(表1)。牛磺酸以5个水平(0、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%)添加到基础料中,分别配制成5种实验饲料,分别记为D1、D2、D3、D4和D5。根据饲料配方将所有原料加水搅拌均匀,制成2.5 mm的湿颗粒饲料。饲料直接密封,并置于-20℃冰箱保存备用。实验饲料游离氨基酸含量见表2。

### 1.2 实验动物与饲养管理

从厦门当地一家养殖场购买罗非鱼苗,鱼苗运至集美大学养殖基地后进行驯化,以适应实验饲料和养殖条件。驯化结束后选择健康的罗非鱼300尾[均重为(5.89±0.03)g],随机分配到15个水族箱中,每箱放鱼20尾,每3个水族箱随机作为1个饲料处理组,共5个实验处理,分别投喂不同牛磺酸水平的饲料,养殖56 d。养殖期间,每天饱食投喂两次,时间分别为8:30、18:30,投喂前吸除粪便,投喂半小时后收集剩余饲料,并将饲料烘干、称重。由于本实验所用饲料为半精制饲料,我们将饲料制成湿颗粒料以提高饲料适口性。吸污后换水,换水量占总水量的1/3。养殖过程中观察鱼的摄食情况。养殖期间水体温度为(29±2)℃,溶解氧(6±0.85)mg/L,硝酸盐氮(0.237±0.12)mg/L。

表1 罗非鱼饲料配方和营养成分(风干基础)

Tab.1 Formulation and proximate composition of tilapia experimental diets(dry matter)

原料 ingredients	饲料 diets					%
	D1	D2	D3	D4	D5	
酪蛋白 casein	30	30	30	30	30	
面粉 flour	32	32	32	32	32	
明胶 gelatin	8	8	8	8	8	
鱼油 fish oil	4	4	4	4	4	
大豆卵磷脂 soybean lecithin	3	3	3	3	3	
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	9.7	9.3	8.9	8.5	8.1	
南极磷虾膏 antarctic krill cream	5	5	5	5	5	
维生素预混物 vitamin mix <sup>1</sup>	2	2	2	2	2	
矿物质预混物 mineral mix <sup>2</sup>	6	6	6	6	6	
氯化胆碱 choline chloride	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
牛磺酸 taurine	0	0.4	0.8	1.2	1.6	
合计 total	100	100	100	100	100	
<b>营养成分 nutrient level</b>						
干物质 dry matter	89.85	89.85	89.86	89.85	89.86	
粗蛋白 crude protein	35.21	35.27	35.46	35.56	35.67	
粗脂肪 crude lipid	5.52	5.49	5.53	5.41	5.49	
粗灰分 ash	5.05	5.07	5.04	5.03	5.05	
牛磺酸/(mg/100 g) taurine	97	433	785	1 128	1 451	

注:1. 复合多维(mg/kg 饲料):维生素A 10,维生素D 10,维生素C 1 000,维生素K 40,维生素E 500,维生素B<sub>1</sub> 60,维生素B<sub>2</sub> 70,维生素B<sub>6</sub> 80,维生素B<sub>12</sub> 0.4,烟酸 200,泛酸钙 200,生物素 2,肌醇 500,叶酸 8,对氨基苯甲酸钠 90,纤维素 17 229.6。2. 复合多矿(mg/kg 饲料):Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O 20 000,NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 5 000,KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 8 000,乳酸钙 5 000,KCl 1 000,NaCl 1 000,MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 6 000,柠檬酸铁 900,CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 25,ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 190,MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 100,CoSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 50,KI 8,Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 2,Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O 25,纤维素 12 700

Notes:1. vitamin premix supplied the diet with(mg/kg diet) the following: vitamin A 10, vitamin D 10, vitamin C, 1 000, vitamin K 40, vitamin E, 500, vitamin B<sub>1</sub> 60, vitamin B<sub>2</sub> 70, vitamin B<sub>6</sub> 80, vitamin B<sub>12</sub> 0.4, nicotinic acid 200, calcium pantothenate 200, biotin 2, inositol 500, folic acid 8, para aminobenzoic acid sodium salt 90, cellulose 17 229.6. 2. mineral premix consisted of(mg/kg diet) the following: Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O 20 000, NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 5 000, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 8 000, Calcium Lactate 5 000, KCl 1 000, NaCl 1 000, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 6 000, ferric citrate 900, CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 25, ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 190, MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 100, CoSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 50, KI 8, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub> 2, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>·18H<sub>2</sub>O 25, cellulose 12 700

表 2 罗非鱼饲料游离氨基酸组成(风干基础)  
Tab.2 Free amino acid composition of tilapia experimental diets(dry matter) mg/100 g

amino acids	饲料 diets				
	D1	D2	D3	D4	D5
精氨酸 Arg	34.53 ± 2.85	35.21 ± 0.02	35.12 ± 0.83	35.41 ± 0.01	35.26 ± 0.37
赖氨酸 Lys	12.17 ± 0.16	12.36 ± 0.17	12.22 ± 0.27	12.41 ± 0.09	12.25 ± 0.05
组氨酸 His	65.08 ± 7.53	63.49 ± 1.16	63.21 ± 0.68	63.86 ± 0.00	66.22 ± 5.63
苯丙氨酸 Phe	37.80 ± 1.72	37.18 ± 1.2	38.16 ± 0.26	39.05 ± 0.42	38.78 ± 0.01
酪氨酸 Tyr	5.50 ± 0.19	5.68 ± 0.45	5.68 ± 0.37	5.82 ± 0.23	5.67 ± 0.25
亮氨酸 Leu	5.60 ± 0.27	5.52 ± 0.08	5.54 ± 0.09	5.41 ± 0.00	5.52 ± 0.08
异亮氨酸 Ile	2.60 ± 0.03	2.60 ± 0.09	2.61 ± 0.01	2.65 ± 0.02	2.60 ± 0.11
蛋氨酸 Met	3.22 ± 0.45	3.32 ± 0.41	3.43 ± 0.12	3.35 ± 0.27	3.18 ± 0.28
缬氨酸 Val	5.30 ± 0.33	5.33 ± 0.03	5.43 ± 0.08	5.46 ± 0.07	5.47 ± 0.21
苏氨酸 Thr	1.49 ± 0.06	1.49 ± 0.01	1.55 ± 0.02	1.49 ± 0.02	1.50 ± 0.1
牛磺酸 Tau	97.4 ± 6.6	432.8 ± 4.8	784.7 ± 7.2	1 128.0 ± 3.7	1 450.5 ± 14.2
半胱氨酸 Cys	4.12 ± 0.23	4.33 ± 0.45	4.14 ± 0.05	4.24 ± 0.24	4.29 ± 0.38
丙氨酸 Ala	24.95 ± 1.64	25.83 ± 0.47	25.93 ± 0.75	24.67 ± 0.86	25.59 ± 0.62
甘氨酸 Gly	123.2 ± 2.28	122.34 ± 4.26	124.83 ± 1.67	126.59 ± 0.33	126.71 ± 1.81
谷氨酸 Glu	44.45 ± 2.24	44.44 ± 1.26	45.82 ± 0.64	46.81 ± 0.08	46.43 ± 0.67
丝氨酸 Ser	1.73 ± 0.12	1.72 ± 0.08	1.77 ± 0.03	1.73 ± 0.01	1.77 ± 0.11
天冬氨酸 Asp	9.61 ± 0.11	9.58 ± 0.13	9.79 ± 0.20	9.78 ± 0.01	9.9 ± 0.41
脯氨酸 Pro	101.81 ± 1.35	101.60 ± 0.67	102.72 ± 2.56	103.39 ± 0.75	102.50 ± 0.54

### 1.3 样品采集

在实验鱼分组前,随机选取 10 尾罗非鱼作为初始样品进行全鱼体成分分析。实验结束后,禁食 24 h,称取每箱实验鱼总重。从每箱中随机取 3 尾鱼冻存于 -20 °C 冰箱中,用于全鱼体成分分析,再分别从每箱中随机取 5 尾鱼解剖,取内脏和肝脏,记录每尾实验鱼的体长、体质量、内脏重和肝脏重。

### 1.4 测定方法

**常规成分测定** 水分含量测定在 105 °C 恒温烘箱中烘干至恒重。粗蛋白质含量测定采用凯氏定氮法,用 Kjeltac8400 型自动凯氏定氮仪进行测定。粗脂肪含量测定采用索氏提取法。粗灰分含量测定采用马弗炉(550 °C)灼烧法。

**牛磺酸含量测定** 测定血清牛磺酸时,先在每毫升血清中加入 4% 磺基水杨酸 1 mL,混匀后 15 000 r/min 离心 15 min,取上清液用于日立 L-8900 型高速氨基酸自动分析仪测定。测定组织和饲料中的牛磺酸时,先准确称取 1~2 g(精确至 0.000 2 g)饲料于 10 mL 离心管中,加入 4% 磺基水杨酸溶液约 4 mL,超声波仪超声匀质 5 min 后,于 15 000 r/min 离心 15 min,将上清液全部转移至 25 mL 容量瓶中,沉淀再用上述方法提

取一次,合并上清液,混匀,再用 0.02 mol/L 盐酸溶液定容。溶液经 0.45 μm 滤膜过滤,滤液上机测定。缓冲液流速:0.4 mL/min。衍生试剂流速:0.35 mL/min。检测波长:通道 1:570 nm;通道 2:440 nm。分离柱填料:3 μm 磺酸型阳离子树脂。分离柱温度:57.0 °C;反应柱温度:(135.0 ± 0.1)°C。

**游离氨基酸含量测定** 样品处理方法同牛磺酸含量测定,在使用氨基酸自动分析仪测定时,选用合适的分析方法,用混合氨基酸标准溶液调整仪器操作参数和洗脱用缓冲液的转换时间,使各氨基酸达到最佳分辨率,在进样盘中放入混合氨基酸标准溶液和待测样品,按照日立 L-8900 型氨基酸自动分析仪的操作程序进行分析测定。

### 1.5 计算公式及统计分析

增重率(weight gain rate, WGR, %) = 100 × (实验鱼终末均重 - 实验鱼初始均重)/实验鱼初始均重

摄食率(feed rate, FR, %) = 100 × 实验鱼平均进食量/[ (实验鱼初始均重 + 实验鱼终末均重)/2]/饲喂天数

成活率(survival rate, SR, %) = 100 × (实验末鱼数量/实验初鱼数量)

饲料系数 (feed conversion rate, FCR) = 实验鱼平均进食量 / (实验鱼终末均重 - 实验鱼初始均重)

肝体比 (hepatosomatic index, HSI, %) =  $100 \times$  (肝脏重 / 鱼体质量)

脏体比 (viscerasomatic index, VSI, %) =  $100 \times$  (内脏重 / 鱼体质量)

肥满度 (condition factor, CF,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) =  $100 \times$  鱼体质量 / 体长<sup>3</sup>

牛磺酸保留率 (taurine retention rate, %) = (实验鱼组织终末牛磺酸含量 - 实验鱼组织初始牛磺酸含量) / 实验饲料牛磺酸含量  $\times 100$

实验数据用 SPSS 13.0 分析软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 结果以平均值  $\pm$  标准差 (mean  $\pm$  SD) 表示, 若存在显著差异时, 则采用 Student-Newman-Keuls 法进行多重比较, 显著性差异水平为  $P < 0.05$ 。将各指标数据值与饲

料牛磺酸水平进行拟合, 建立各指标与牛磺酸的相关关系。

## 2 结果

### 2.1 饲料牛磺酸对尼罗罗非鱼生长性能的影响

饲料中牛磺酸水平从 0 增加到 0.8% 时, 尼罗罗非鱼的增重率显著升高 ( $P < 0.05$ ), 其后显著降低 ( $P < 0.05$ ), D3 (0.8%) 组增重率最高 (表 3)。与对照组相比, 添加组鱼摄食率显著升高 ( $P < 0.05$ ), 但饲料系数显著降低 ( $P < 0.05$ ), 且各添加组饲料系数差异不显著 ( $P > 0.05$ )。添加组罗非鱼肝体比和脏体比显著高于对照组 ( $P < 0.05$ )。各实验组肥满度差异不显著 ( $P > 0.05$ )。各组鱼的成活率差异不明显 ( $P > 0.05$ )。以饲料中牛磺酸含量为自变量, 以增重率为因变量, 对二者进行二次回归分析得出尼罗罗非鱼饲料牛磺酸适宜需要量为 0.75% (图 1)。

表 3 饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼生长性能的影响  
Tab. 3 Effects of dietary taurine levels on the growth performance of tilapia

饲料 diet	D1	D2	D3	D4	D5	Pooled SE	P-value
初均重/g IAW	5.87 $\pm$ 0.04	5.91 $\pm$ 0.01	5.89 $\pm$ 0.01	5.90 $\pm$ 0.05	5.90 $\pm$ 0.02	0.01	0.761
末均重/g FAW	131.88 $\pm$ 0.64 <sup>a</sup>	143.83 $\pm$ 1.69 <sup>c</sup>	145.32 $\pm$ 0.57 <sup>c</sup>	138.45 $\pm$ 0.42 <sup>b</sup>	132.62 $\pm$ 1.09 <sup>a</sup>	1.5	<0.001
增重率/% WGR	2 146 $\pm$ 6 <sup>a</sup>	2 336 $\pm$ 27 <sup>c</sup>	2 367 $\pm$ 8 <sup>c</sup>	2 247 $\pm$ 13 <sup>b</sup>	2 149 $\pm$ 24 <sup>a</sup>	24.85	<0.001
饲料系数 FCR	1.85 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.77 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.81 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	1.76 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	1.80 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	0.01	0.002
摄食率/% FI	1.77 $\pm$ 0.03 <sup>a</sup>	1.86 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	1.87 $\pm$ 0.02 <sup>c</sup>	1.84 $\pm$ 0.01 <sup>bc</sup>	1.81 $\pm$ 0.02 <sup>b</sup>	0.01	<0.001
肝体比/% HSI	1.80 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>	2.12 $\pm$ 0.06 <sup>b</sup>	2.08 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	2.32 $\pm$ 0.13 <sup>c</sup>	2.31 $\pm$ 0.12 <sup>c</sup>	0.05	<0.001
脏体比/% VSI	8.88 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>	9.74 $\pm$ 0.28 <sup>b</sup>	9.91 $\pm$ 0.31 <sup>b</sup>	9.58 $\pm$ 0.16 <sup>b</sup>	9.67 $\pm$ 0.15 <sup>b</sup>	0.11	0.004
肥满度/% CF	4.47 $\pm$ 0.19	4.55 $\pm$ 0.22	4.39 $\pm$ 0.12	4.49 $\pm$ 0.07	4.60 $\pm$ 0.11	0.04	0.514
成活率/% SR	85.79 $\pm$ 0.09	87.80 $\pm$ 0.03	80.84 $\pm$ 0.05	87.56 $\pm$ 0.03	80.91 $\pm$ 0.05	0.01	0.356

注: 同一行数字上标字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同

Notes: values with different superscripts in each row indicate significant difference ( $P < 0.05$ ), the same as the following

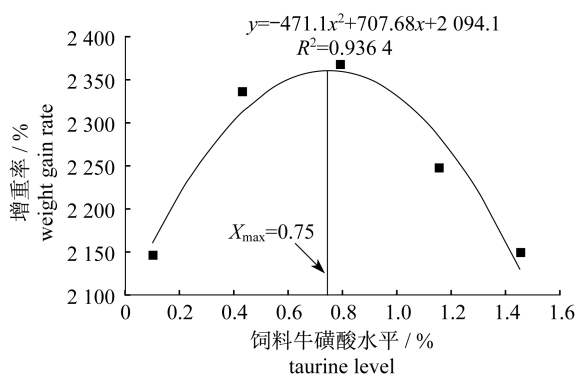


图 1 尼罗罗非鱼增重率和饲料牛磺酸水平的关系  
Fig. 1 Relationship between weight gain rate and dietary taurine levels of tilapia

### 2.2 饲料牛磺酸对尼罗罗非鱼体成分的影响

表 4 显示了饲料中不同水平牛磺酸对尼罗罗非鱼体成分的影响。与对照组相比, 各牛磺酸添加组鱼体粗蛋白质和粗脂肪含量显著升高 ( $P < 0.05$ ), 其中, D3 (0.8%) 组粗蛋白质含量最高, 而粗脂肪含量以 D5 (1.6%) 组最高, 且显著高于其他各添加组 ( $P < 0.05$ )。牛磺酸添加组水分含量均显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 但 D2 ~ D5 组之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。各牛磺酸添加组粗灰分含量均低于对照组, 但各组间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

表 4 饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼体成分的影响(占湿体质量)

**Tab. 4 Effects of dietary taurine levels on whole body composition of tilapia (wet weight basis) %**

饲料 diets	水分 moisture	粗蛋白质 crude protein	粗脂肪 crude lipid	粗灰分 ash
D1	72.47 ± 0.19 <sup>a</sup>	14.26 ± 0.15 <sup>a</sup>	7.74 ± 0.15 <sup>a</sup>	3.80 ± 0.14
D2	71.69 ± 0.27 <sup>b</sup>	14.70 ± 0.14 <sup>bc</sup>	8.47 ± 0.10 <sup>b</sup>	3.55 ± 0.10
D3	71.71 ± 0.14 <sup>b</sup>	14.82 ± 0.10 <sup>c</sup>	8.34 ± 0.11 <sup>b</sup>	3.53 ± 0.08
D4	71.74 ± 0.10 <sup>b</sup>	14.48 ± 0.17 <sup>ab</sup>	8.44 ± 0.16 <sup>b</sup>	3.63 ± 0.12
D5	71.64 ± 0.47 <sup>b</sup>	14.43 ± 0.26 <sup>ab</sup>	8.81 ± 0.24 <sup>c</sup>	3.41 ± 0.20
Pooled SE	0.10	0.07	0.10	0.05
P-value	0.017	0.017	<0.001	0.052

### 2.3 尼罗罗非鱼肝脏和肌肉游离氨基酸的含量变化

随饲料牛磺酸含量的增加,尼罗罗非鱼肝脏和肌肉总游离必需氨基酸(TEAA)含量、总游离非必需氨基酸(TNEAA)含量和总游离氨基酸(TAA)含量均呈先急剧下降后平缓下降的趋势,且牛磺酸添加组罗非鱼肝脏和肌肉中 TEAA、TNEAA 和 TAA 含量均显著低于对照组 ( $P < 0.05$ )。但只有游离牛磺酸的变化例外,牛磺酸添加组罗非鱼肝脏和肌肉中游离牛磺酸含量则随饲料中牛磺酸水平增加而增加 ( $P < 0.05$ ) (表 5,表 6)。肝脏中的 TEAA、TNEAA 和 TAA 含量均明显高于肌肉中的 TEAA、TNEAA 和 TAA 含量。

表 5 饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼肝脏游离氨基酸含量的影响(湿重)

**Tab. 5 Effects of dietary taurine on liver free amino acid content of tilapia (wet weight) mg/100 g**

amino acids	饲料 diets					Pooled SE	P-value
	D1	D2	D3	D4	D5		
总必需氨基酸 TEAA	307.86 ± 6.50 <sup>c</sup>	234.85 ± 8.1 <sup>b</sup>	235.77 ± 3.89 <sup>b</sup>	227.85 ± 6.22 <sup>b</sup>	201.40 ± 5.47 <sup>a</sup>	9.56	<0.001
精氨酸 Arg	19.72 ± 1.71 <sup>ab</sup>	16.92 ± 4.65 <sup>ab</sup>	13.62 ± 0.95 <sup>a</sup>	20.78 ± 1.90 <sup>b</sup>	13.94 ± 2.03 <sup>a</sup>	0.96	0.02
赖氨酸 Lys	42.08 ± 1.21 <sup>b</sup>	30.81 ± 2.83 <sup>a</sup>	31.50 ± 3.40 <sup>a</sup>	31.07 ± 2.63 <sup>a</sup>	29.09 ± 1.01 <sup>a</sup>	1.35	<0.001
组氨酸 His	11.78 ± 0.61 <sup>c</sup>	8.53 ± 0.37 <sup>a</sup>	9.91 ± 0.28 <sup>ab</sup>	11.19 ± 0.45 <sup>bc</sup>	9.87 ± 1.09 <sup>a</sup>	0.33	0.01
苯丙氨酸 Phe	31.20 ± 1.37 <sup>d</sup>	24.29 ± 2.33 <sup>c</sup>	23.58 ± 0.55 <sup>c</sup>	20.61 ± 0.44 <sup>b</sup>	17.20 ± 0.50 <sup>a</sup>	1.26	<0.001
酪氨酸 Tyr	21.76 ± 0.70 <sup>c</sup>	17.56 ± 0.55 <sup>b</sup>	17.66 ± 0.61 <sup>b</sup>	15.36 ± 0.78 <sup>a</sup>	14.83 ± 0.51 <sup>a</sup>	0.67	<0.001
亮氨酸 Leu	67.37 ± 0.79 <sup>c</sup>	51.41 ± 2.53 <sup>b</sup>	52.50 ± 2.67 <sup>b</sup>	52.88 ± 1.97 <sup>b</sup>	40.10 ± 2.11 <sup>a</sup>	0.34	<0.001
异亮氨酸 Ile	26.05 ± 0.41 <sup>c</sup>	19.54 ± 0.57 <sup>b</sup>	19.72 ± 0.24 <sup>b</sup>	17.65 ± 1.29 <sup>a</sup>	16.46 ± 1.19 <sup>a</sup>	0.91	<0.001
蛋氨酸 Met	16.38 ± 1.13 <sup>c</sup>	13.33 ± 0.80 <sup>b</sup>	12.75 ± 0.02 <sup>ab</sup>	11.41 ± 1.33 <sup>ab</sup>	11.12 ± 0.37 <sup>a</sup>	0.54	<0.001
缬氨酸 Val	47.13 ± 1.25 <sup>c</sup>	33.21 ± 1.12 <sup>b</sup>	33.69 ± 1.51 <sup>b</sup>	30.00 ± 3.14 <sup>ab</sup>	27.01 ± 0.94 <sup>a</sup>	1.88	<0.001
苏氨酸 Thr	24.38 ± 2.00 <sup>c</sup>	19.12 ± 0.39 <sup>ab</sup>	20.83 ± 1.03 <sup>abc</sup>	16.91 ± 0.83 <sup>a</sup>	21.47 ± 3.17 <sup>bc</sup>	0.77	0.05
总非必需氨基酸 TNEAA	1 054.2 ± 6.9 <sup>a</sup>	750.1 ± 4.9 <sup>b</sup>	678.35 ± 3.97 <sup>c</sup>	541.0 ± 3.5 <sup>d</sup>	519.0 ± 3.8 <sup>e</sup>	51.58	<0.001
牛磺酸 Tau	105.62 ± 5.31 <sup>a</sup>	200.62 ± 3.01 <sup>b</sup>	267.84 ± 4.50 <sup>c</sup>	339.70 ± 6.87 <sup>d</sup>	399.02 ± 6.46 <sup>e</sup>	27.56	<0.001
丙氨酸 Ala	92.30 ± 1.53 <sup>b</sup>	77.04 ± 4.49 <sup>a</sup>	76.52 ± 1.26 <sup>a</sup>	76.30 ± 3.77 <sup>a</sup>	70.92 ± 2.63 <sup>a</sup>	2.03	<0.001
甘氨酸 Gly	53.38 ± 1.60 <sup>b</sup>	44.57 ± 3.36 <sup>a</sup>	38.88 ± 3.89 <sup>a</sup>	44.11 ± 0.62 <sup>a</sup>	42.04 ± 5.87 <sup>a</sup>	1.50	0.005
谷氨酸 Glu	58.50 ± 4.66 <sup>b</sup>	55.82 ± 1.81 <sup>ab</sup>	48.65 ± 3.53 <sup>a</sup>	56.38 ± 3.59 <sup>ab</sup>	48.43 ± 1.94 <sup>a</sup>	1.33	0.01
丝氨酸 Ser	47.99 ± 4.27 <sup>b</sup>	30.62 ± 1.66 <sup>a</sup>	30.79 ± 0.63 <sup>a</sup>	28.22 ± 1.69 <sup>a</sup>	25.56 ± 0.65 <sup>a</sup>	2.17	<0.001
天冬氨酸 Asp	41.37 ± 1.61 <sup>c</sup>	35.94 ± 1.48 <sup>b</sup>	27.36 ± 2.13 <sup>a</sup>	31.92 ± 0.61 <sup>b</sup>	26.82 ± 3.84 <sup>a</sup>	1.54	<0.001
脯氨酸 Pro	760.69 ± 2.42 <sup>d</sup>	506.12 ± 8.97 <sup>c</sup>	456.16 ± 46.20 <sup>b</sup>	304.04 ± 3.89 <sup>a</sup>	305.21 ± 6.94 <sup>a</sup>	44.84	<0.001
总氨基酸 TAA	1 362.1 ± 6.3 <sup>a</sup>	985.0 ± 9.4 <sup>b</sup>	914.12 ± 4.65 <sup>c</sup>	768.8 ± 9.7 <sup>d</sup>	720.4 ± 6.0 <sup>e</sup>	60.72	<0.001
总必需氨基酸 TEAA	TEAA(Y)-taurine level(X): $Y = 220.57X^{-0.139}$			$R^2 = 0.910$		$P = 0.012$	
总非必需氨基酸 TNEAA	TNEAA(Y)-taurine level(X): $Y = 588.13X^{-0.263}$			$R^2 = 0.967$		$P = 0.003$	
总氨基酸 TAA	TAA(Y)-taurine level(X): $Y = 809.62X^{-0.232}$			$R^2 = 0.976$		$P = 0.002$	

表 6 饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼肌肉游离氨基酸含量的影响(湿重)  
Tab.6 Effects of dietary taurine on muscle free amino acid content of Nile tilapia (wet weight)

amino acids	饲料 diets					Pooled SE	P-value
	D1	D2	D3	D4	D5		
总必需氨基酸 TEAA	111.60 ± 2.42 <sup>b</sup>	79.17 ± 1.85 <sup>a</sup>	74.80 ± 3.00 <sup>a</sup>	74.36 ± 4.70 <sup>a</sup>	73.39 ± 3.48 <sup>a</sup>	3.89	<0.001
精氨酸 Arg	2.87 ± 0.25 <sup>b</sup>	1.92 ± 0.37 <sup>a</sup>	1.84 ± 0.20 <sup>a</sup>	1.84 ± 0.20 <sup>a</sup>	1.84 ± 0.12 <sup>a</sup>	0.12	0.007
赖氨酸 Lys	35.68 ± 3.14 <sup>b</sup>	22.19 ± 0.80 <sup>a</sup>	21.25 ± 2.29 <sup>a</sup>	22.18 ± 3.01 <sup>a</sup>	23.56 ± 0.95 <sup>a</sup>	1.71	<0.001
组氨酸 His	42.96 ± 2.26 <sup>c</sup>	31.43 ± 1.7 <sup>b</sup>	33.10 ± 0.73 <sup>b</sup>	31.05 ± 1.66 <sup>b</sup>	27.19 ± 1.87 <sup>a</sup>	1.43	<0.001
苯丙氨酸 Phe	1.02 ± 0.29	0.94 ± 0.37	1.24 ± 0.08	0.88 ± 0.27	0.76 ± 0.09	0.06	0.074
酪氨酸 Tyr	3.72 ± 0.45	3.34 ± 0.54	3.07 ± 0.70	3.22 ± 0.2	3.3 ± 0.22	0.12	0.54
亮氨酸 Leu	2.74 ± 0.22	2.70 ± 0.75	1.87 ± 0.15	1.98 ± 0.45	1.75 ± 0.57	0.15	0.077
异亮氨酸 Ile	1.30 ± 0.15	1.29 ± 0.40	0.99 ± 0.13	0.97 ± 0.25	0.93 ± 0.25	0.07	0.311
蛋氨酸 Met	0.85 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.68 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.62 ± 0.06 <sup>ab</sup>	0.64 ± 0.09 <sup>ab</sup>	0.63 ± 0.05 <sup>ab</sup>	0.04	0.006
缬氨酸 Val	3.86 ± 0.33 <sup>b</sup>	3.39 ± 0.79 <sup>ab</sup>	2.55 ± 0.38 <sup>a</sup>	2.32 ± 0.48 <sup>a</sup>	2.41 ± 0.18 <sup>a</sup>	0.19	0.009
苏氨酸 Thr	14.59 ± 0.60 <sup>c</sup>	11.26 ± 0.49 <sup>b</sup>	8.27 ± 0.60 <sup>a</sup>	9.28 ± 0.79 <sup>a</sup>	8.96 ± 0.62 <sup>a</sup>	0.63	<0.001
总非必需氨基酸 TNEAA	434.64 ± 5.79 <sup>c</sup>	304.14 ± 4.23 <sup>b</sup>	253.50 ± 3.92 <sup>a</sup>	244.88 ± 5.23 <sup>a</sup>	239.23 ± 5.83 <sup>a</sup>	19.09	<0.001
牛磺酸 Tau	227.4 ± 6.3 <sup>a</sup>	402.4 ± 9.3 <sup>b</sup>	462.2 ± 11.9 <sup>c</sup>	522.3 ± 4.4 <sup>d</sup>	546.8 ± 6.0 <sup>e</sup>	30.52	<0.001
丙氨酸 Ala	42.63 ± 3.82 <sup>b</sup>	31.12 ± 4.52 <sup>a</sup>	25.28 ± 3.31 <sup>a</sup>	26.14 ± 0.97 <sup>a</sup>	25.59 ± 1.21 <sup>a</sup>	1.89	<0.001
甘氨酸 Gly	69.64 ± 3.05 <sup>b</sup>	48.16 ± 5.17 <sup>b</sup>	39.04 ± 2.93 <sup>a</sup>	30.93 ± 4.95 <sup>a</sup>	29.26 ± 1.98 <sup>a</sup>	3.65	<0.001
谷氨酸 Glu	26.24 ± 2.45 <sup>b</sup>	23.46 ± 2.26 <sup>b</sup>	16.37 ± 0.28 <sup>a</sup>	12.59 ± 4.12 <sup>a</sup>	9.03 ± 3.08 <sup>a</sup>	1.46	0.01
丝氨酸 Ser	4.45 ± 0.22 <sup>c</sup>	1.82 ± 0.11 <sup>b</sup>	2.02 ± 0.09 <sup>b</sup>	1.79 ± 0.11 <sup>b</sup>	0.99 ± 0.10 <sup>a</sup>	0.31	<0.001
天冬氨酸 Asp	4.33 ± 0.45 <sup>b</sup>	3.78 ± 0.18 <sup>ab</sup>	3.19 ± 0.50 <sup>a</sup>	2.99 ± 0.49 <sup>a</sup>	3.50 ± 0.66 <sup>ab</sup>	0.15	0.14
脯氨酸 Pro	287.34 ± 7.53 <sup>c</sup>	195.80 ± 15.33 <sup>b</sup>	167.65 ± 6.77 <sup>a</sup>	170.43 ± 1.79 <sup>a</sup>	167.89 ± 4.85 <sup>a</sup>	12.35	<0.001
总氨基酸 TAA	546.24 ± 5.34 <sup>c</sup>	383.31 ± 2.38 <sup>b</sup>	328.31 ± 2.64 <sup>a</sup>	319.24 ± 0.75 <sup>a</sup>	312.62 ± 5.73 <sup>a</sup>	22.81	<0.001
总必需氨基酸 TEAA	TEAA (Y) -taurine level (X); Y = 74.36X <sup>-0.160</sup>			R <sup>2</sup> = 0.919		P = 0.001	
总非必需氨基酸 TNEAA	TNEAA (Y) -taurine level (X); Y = 251.37X <sup>-0.232</sup>			R <sup>2</sup> = 0.985		P = 0.001	
总氨基酸 TAA	TAA (Y) -taurine level (X); Y = 325.82X <sup>-0.216</sup>			R <sup>2</sup> = 0.981		P = 0.001	

#### 2.4 尼罗罗非鱼组织中牛磺酸的分布

罗非鱼血清、肝脏、肌肉和全鱼牛磺酸含量均随饲料中牛磺酸添加量的增加呈上升趋势,均显著高于对照组 ( $P < 0.05$ ),且各实验组之间差异显著 ( $P < 0.05$ ) (图 2)。各组织中的牛磺酸含量以肌肉中最高,血清中牛磺酸含量最少。由回归分析,尼罗罗非鱼血清、肝脏、肌肉和全鱼牛磺酸含量与饲料中牛磺酸含量呈显著正相关关系 ( $R > 0.907$ ) ( $P < 0.05$ ) (表 7)。表 8 显示了饲料中牛磺酸水平对罗非鱼肝脏和肌肉牛磺酸保留率的影响。从该表中可以看出,罗非鱼肝脏牛磺酸保留率随饲料中牛磺酸含量的增加而上升,D4 和 D5 组肝脏牛磺酸保留率显著高于其他组。肌肉中牛磺酸保留率随着饲料牛磺酸水平呈现先上升后下降的趋势,而 D2 组中牛磺酸保留率最高,显著高于其他实验组 ( $P < 0.05$ ),且各添加组肌肉牛磺酸保留率均高于肝脏牛磺酸保留率。

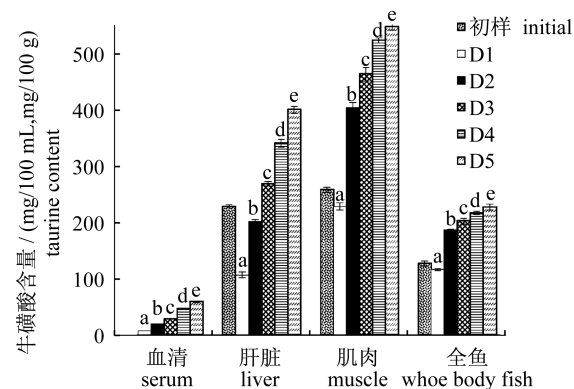


图 2 饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼牛磺酸分布的影响  
牛磺酸含量以湿重计算;柱形图上方不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

Fig. 2 Effects of dietary taurine on the tissue distribution of taurine in tilapia

The taurine content is calculated on wet weight basis; values on the bar sharing different superscript letters are significantly different ( $P < 0.05$ )

表 7 尼罗罗非鱼血清、肝脏、肌肉和全鱼牛磺酸含量 (Y) 与饲料中牛磺酸含量 (X) 之间的关系  
Tab. 7 Relationship between taurine contents (Y) in serum, liver, muscle and whole body and dietary taurine contents (X)

组织 tissues	回归方程 regressive equations	相关系数 (R) correlation coefficient	P-value
血清 serum	$Y = 38.32X + 1.416$	0.994	0.001
肝脏 liver	$Y = 213.4X + 96.48$	0.996	<0.001
肌肉 muscle	$Y = 223.1X + 258.6$	0.941	0.017
全鱼 whole-body fish	$Y = 74.28X + 131.0$	0.907	0.033

注:牛磺酸含量:mg/100 g 湿重

Notes: taurine contents: mg/100 g wet weight

表 8 饲料牛磺酸水平对尼罗罗非鱼不同组织中牛磺酸保留率的影响 (样品湿重)  
Tab. 8 Effects of dietary taurine levels on tissue taurine retention of tilapia (wet weight) %

	饲料牛磺酸水平 dietary taurine levels					Pooled SE	P-value
	D <sub>1</sub> (0)	D <sub>2</sub> (0.4%)	D <sub>3</sub> (0.8%)	D <sub>4</sub> (1.2%)	D <sub>5</sub> (1.6%)		
肝脏 liver	-125.06 ± 5.45 <sup>a</sup>	-6.19 ± 0.70 <sup>b</sup>	5.15 ± 0.57 <sup>c</sup>	9.96 ± 0.61 <sup>d</sup>	11.83 ± 0.45 <sup>d</sup>	14.03	<0.001
肌肉 muscle	-30.51 ± 6.42 <sup>a</sup>	33.58 ± 2.14 <sup>c</sup>	26.14 ± 1.52 <sup>b</sup>	23.51 ± 0.39 <sup>b</sup>	19.97 ± 0.41 <sup>b</sup>	6.17	<0.001

表明,牛磺酸能够促进牙鲈和鲈鱼生长<sup>[12,18]</sup>。本实验也获得了相似的结果,但饲料中牛磺酸水平高达 1.6% 时,罗非鱼增重率却出现明显的下降,这说明过高的饲料牛磺酸水平不利于罗非鱼的生长,原因可能与摄食量减少有关,在虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 上也得到类似结果<sup>[19]</sup>。其原因可能是由于牛磺酸呈微酸性,添加过多牛磺酸造成饲料酸性偏高,影响了饲料的适口性<sup>[20]</sup>。鱼类对牛磺酸需求量不同的原因可能与鱼的种类有关,在本实验中,经二次曲线回归分析,尼罗罗非鱼饲料牛磺酸的适宜需要量为 0.75%,这一结果低于牙鲈 (1.5%~2.0%)<sup>[18]</sup> 和鲈鱼 (>1.0%)<sup>[12]</sup>,但比欧洲鲈 (*Dicentrarchus labrax*) (0.2%)<sup>[21]</sup> 高,也可能与鱼的大小有关。研究表明,当牙鲈处于仔鱼时期 (体质量为 0.4 g) 时,牛磺酸可以显著提高其生长性能,但当牙鲈处于幼鱼时期 (体质量为 15 g) 时,牛磺酸的作用就不明显<sup>[22]</sup>。此外,本实验发现,无论是否添加牛磺酸,各组鱼均存在一定的死亡率,这可能与使用酪蛋白和明胶作为蛋白源配制的纯合或半纯合饲料有关。

### 3.2 牛磺酸对尼罗罗非鱼体成分的影响

本实验中,添加牛磺酸组罗非鱼粗蛋白质含量均高于对照组。这表明,添加牛磺酸可以提高

## 3 讨论

### 3.1 牛磺酸对尼罗罗非鱼生长性能的影响

牛磺酸作为一种氨基酸衍生物,拥有诱食剂的许多特征,对鱼类的味觉和嗅觉具有刺激作用,所以,生产上常将牛磺酸作为一种诱食剂用于促进水产动物摄食<sup>[17]</sup>。本实验中牛磺酸添加组鱼摄食率均比对照组显著升高,但随着牛磺酸水平的提高,摄食率呈现下降趋势,且最高牛磺酸水平组摄食率显著低于 D2 和 D3 组,表明无鱼粉饲料中适当添加牛磺酸有助于促进罗非鱼摄食,但过量添加在一定程度上反而会抑制其摄食。研究

鱼体蛋白含量,这与在草鱼 (*Ctenopharynodon idella*)<sup>[23]</sup> 和大菱鲈<sup>[11]</sup> 上的研究结果相吻合。而且,罗非鱼鱼体蛋白质含量的变化同其生长速度一致,因此,牛磺酸可能是通过调控蛋白质的合成和分解来调节罗非鱼的生长<sup>[24]</sup>。饲料中添加牛磺酸可提高罗非鱼体蛋白质和体脂肪含量,与在虹鳟上的研究结果一致<sup>[19]</sup>,其原因可能是牛磺酸通过促进限速酶-CYP7A1 活性,使胆固醇转化为胆汁酸的作用增强<sup>[4]</sup>,进而促进脂类合成代谢<sup>[25]</sup>。在本实验中,罗非鱼肝体比和脏体比的变化同体脂肪的变化趋势类似,这可能是因为牛磺酸与胆固醇结合生成胆盐,激活肝中脂肪酶的缘故<sup>[9]</sup>,并且肝中胆酸只与牛磺酸结合生成胆汁酸,促进肝脂肪合成<sup>[26]</sup>,导致肝脂肪沉积,从而提高了肝体比和脏体比。然而,肝脏中沉积过多脂肪会引起脂肪肝甚至肝脏病变的风险,从而导致代谢障碍。与本实验结果不同,饲料添加牛磺酸没有影响草鱼的脏体比<sup>[23]</sup>。

### 3.3 牛磺酸对尼罗罗非鱼肝脏和肌肉中游离氨基酸含量的影响

饲料组成可明显影响动物体内游离氨基酸的含量<sup>[27-28]</sup>。例如,混合植物蛋白质源替代饲料中的鱼粉显著提高金头鲷 (*Sparus aurata*) 肌肉中总游离氨基酸的含量<sup>[29]</sup>。本实验中饲料牛磺酸水

平同样可对罗非鱼肝脏和肌肉中游离氨基酸含量产生显著的影响,且随着牛磺酸水平升高肝脏和肌肉中的游离氨基酸含量均随之下降,这与在真鲷上的研究结果一致<sup>[30]</sup>。在一定范围内,鱼体内游离氨基酸含量的减少,可以使更多的氨基酸用于蛋白质的合成,从而促进了鱼体的生长。但过高的牛磺酸水平则会降低肌肉和肝脏中非必需氨基酸的含量,导致体内氨基酸失衡,从而降低机体对氨基酸的利用,因此,过多牛磺酸的摄入反而对罗非鱼的生长不利。丝氨酸和蛋氨酸是鱼类牛磺酸合成过程中的关键氨基酸<sup>[31]</sup>,本实验中,D1组肝脏和肌肉中游离的丝氨酸和蛋氨酸含量显著高于各添加组,说明罗非鱼摄入牛磺酸不足时,机体会调动更多丝氨酸和蛋氨酸用于牛磺酸的合成。此外,对照组肝脏中游离蛋氨酸含量明显高于所有牛磺酸添加组,但肌肉中游离蛋氨酸含量变化与牛磺酸添加与否无关,这说明肝脏中牛磺酸代谢比肌肉的旺盛,是牛磺酸代谢的主要器官<sup>[32]</sup>。饲料中添加牛磺酸能明显降低肝脏游离蛋氨酸和丝氨酸含量,同时也明显降低肝脏中其他游离氨基酸含量,具体的原因不明,今后还需进一步探讨含硫氨基酸在罗非鱼体内的代谢机制。

### 3.4 牛磺酸对尼罗罗非鱼组织中牛磺酸分布的影响

尼罗罗非鱼肌肉、肝脏、血清和全鱼牛磺酸含量均随饲料中牛磺酸水平的增加而呈线性增加(表7)。Qi等<sup>[11]</sup>也发现外源摄入牛磺酸也可直接蓄积于大菱鲆的眼、肌肉等组织,表明鱼类具有将外源摄入的牛磺酸直接蓄积到体组织中的能力。研究表明,肝脏牛磺酸保留率随着饲料牛磺酸水平呈逐渐升高趋势,而肌肉牛磺酸保留率呈现先升高后降低趋势(表7),反映出尼罗罗非鱼肝脏和肌肉组织对外源牛磺酸的代谢与利用有所不同。牛磺酸合成过程中的关键酶——半胱次磺酸脱羧酶<sup>[33]</sup>在鱼体的不同组织中均有分布<sup>[22,34]</sup>,该酶调控着鱼体牛磺酸的含量。尼罗罗非鱼以肌肉组织的牛磺酸含量最高,这个结果与Qi等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。无论牛磺酸添加与否,肌肉牛磺酸保留率始终高于肝脏,说明肌肉对牛磺酸的蓄积能力比肝脏强,提示鱼类不同的组织对牛磺酸的蓄积能力不同<sup>[16,35]</sup>,而在眼睛、脑等一些特定组织中的含量尤其高,说明这些特定组织需要更多的牛磺酸,以利于这些组织生理功能的

发挥<sup>[36]</sup>。

## 4 结论

(1)牛磺酸水平对尼罗罗非鱼的生长性能、体成分影响显著,在一定水平下(0.4%~1.2%)牛磺酸能明显促进尼罗罗非鱼的生长和摄食,增加体蛋白质和脂肪沉积。(2)适量添加牛磺酸能降低尼罗罗非鱼组织游离氨基酸含量,促进体内牛磺酸的累积。(3)以增重率为衡量指标,尼罗罗非鱼饲料中牛磺酸适宜需要量为0.75%。

## 参考文献:

- [1] Hayes K C, Carey R, Schmidt S Y. Retinal degeneration associated with taurine deficiency in the cat[J]. *Science*, 1976, 188(4191): 949-951.
- [2] Hayes K C, Trautwein E A. Taurine deficiency syndrome in cats [J]. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice*, 1989, 19(3): 403-413.
- [3] Wang H W, Ye J D, Chen J C. Taurine: Effect in Fish Nutrition and Application in Fish Feed [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, 25(7): 1418-1428. [王和伟,叶继丹,陈建春.牛磺酸在鱼类营养中的作用及其在鱼类饲料中的应用. *动物营养学报*, 2013, 25(7): 1418-1428.]
- [4] Yun B, Ai Q H, M K S, et al. Synergistic effects of dietary cholesterol and taurine on growth performance and cholesterol metabolism in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L) fed high plant protein diets [J]. *Aquaculture*, 2012, 324-325: 85-91.
- [5] Matsunari H, Furuita H, Yamamoto T, et al. Effect of dietary taurine and cystine on growth performance of juvenile red sea bream *Pagrus major* [J]. *Aquaculture*, 2008, 274(1): 142-147.
- [6] Kim S K, Matsunari H, Takeuchi T, et al. Effect of different dietary taurine levels on the conjugated bile acid composition and growth performance of juvenile and fingerling Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. *Aquaculture*, 2007, 273(4): 595-601.
- [7] Takagi S, Murata H, Goto T, et al. Hemolytic suppression roles of taurine in yellowtail *Seriola quinqueradiata* fed non-fishmeal diet based on soybean protein [J]. *Fisheries Science*, 2006, 72(3): 546-555.
- [8] Huxtable R J. Physiological actions of taurine [J].



- Physiological Reviews,1992,72(1):101-163.
- [9] Chatzifotis S, Polemitou I, Divanach P, *et al.* Effect of dietary taurine supplementation on growth performance and bile salt activated lipase activity of common dentex, *Dentex dentex*, fed a fish meal/soy protein concentrate-based diet [J]. *Aquaculture*, 2008,275(1-4):201-208.
- [10] Qiu X Z, Zhao H X, Wei Z Q. The effect of taurine on survival time and content of hemoglobin of Crucian Carp [J]. *Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 19(2): 179-184. [邱小琮,赵红雪,魏智清.牛磺酸对鲫鱼密闭缺氧存活时间和血红蛋白含量的影响.信阳师范学院学报:自然科学版,2006,19(2):179-184.]
- [11] Qi G S, Ai Q H, Mai K S, *et al.* Effects of dietary taurine supplementation to a casein-based diet on growth performance and taurine distribution in two sizes of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. *Aquaculture*, 2012, 358-359:122-128.
- [12] Matsunari H, Takeuchi T, Takahashi M, *et al.* Effect of dietary taurine supplementation on growth performance of yellowtail juveniles *Seriola quinqueradiata* [J]. *Fisheries Science*, 2005, 71(5): 1131-1135.
- [13] Yokoyama M, Takeuchi T, Park G S, *et al.* Hepatic cysteinesulphinate decarboxylase activity in fish [J]. *Aquaculture Research*, 2001, 32(1):216-220.
- [14] Watanabe T, Kiron V. Prospects in larval fish dietetics [J]. *Aquaculture*, 1994, 124(1):223-251.
- [15] Rønnestad I, Thorsen A, Finn R N. Fish larval nutrition: A review of recent advances in the roles of amino acids [J]. *Aquaculture*, 1999, 177(1): 201-216.
- [16] Espe M, Ruohonen K, El-Mowafi A. Effect of taurine supplementation on the metabolism and body lipid-to-protein ratio in juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J]. *Aquaculture Research*, 2012, 43(3): 349-360.
- [17] Døving K B, Selset R, Thommesen G. Olfactory sensitivity to bile acids in salmonid fish [J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1980, 108(2):123-131.
- [18] Park G S, Takeuchi T, Yokoyama M, *et al.* Optimal dietary taurine level for growth of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. *Fisheries Science*, 2002, 68(4):824-829.
- [19] Gaylord G T, Teague A M, Barrows F T. Taurine supplementation of all-plant protein diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2006, 37(4):509-517.
- [20] Takaoka O, Takii K, Nakamura M, *et al.* Identification of feeding stimulants for marbled rockfish. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 1990, 56(2): 345-351.
- [21] Martinez J B, Chatzifotis S, Divanach P, *et al.* Effect of dietary taurine supplementation on growth performance and feed selection of seabass *Dicentrarchus labrax* fry fed with demand-feeders [J]. *Fisheries Science*, 2004, 70(1):74-79.
- [22] Kim S K, Takeuchi T, Yokoyama M, *et al.* Effect of dietary supplementation with taurine, b-alanine and GABA on the growth of juvenile and fingerling Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. *Fisheries Science*, 2003, 69(2):242-248.
- [23] Luo L, Wen H, Wang L, *et al.* Effects of Taurine on Growth Performance, Quality, Digestive and Metabolic Enzyme Activity of Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2006, 18(3):166-171. [罗莉,文华,王琳,等.牛磺酸对草鱼生长、品质、消化酶和代谢酶活性的影响.动物营养学报,2006,18(3):166-171.]
- [24] Li P, Mai K S, Trushenski J, *et al.* New developments in fish amino acid nutrition: Towards functional and environmentally oriented aquafeeds [J]. *Amino Acids*, 2009, 37(1):43-53.
- [25] Russell D W. The enzymes, regulation, and genetics of bile acid synthesis [J]. *Annual review of Biochemistry*, 2003, 72(1):137-174.
- [26] Vessey D A, Benfatto A M, Zerweck E, *et al.* Purification and characterization of the enzymes of bile acid conjugation from fish liver [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry*, 1990, 95(4):647-652.
- [27] Gunasekera R M, Shim K F, Lam T J. Influence of dietary protein content on the distribution of amino acids in oocytes, serum and muscle of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) [J]. *Aquaculture*, 1997, 152(1):205-221.
- [28] Han B, Huang X X, Hua X M. *et al.* Effects of partial replacement of fish meal by corn gluten meal on daily ration, growth and nutrient ingredients in muscles of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(4):658-665. [韩斌,黄旭雄,华雪铭,等.玉米蛋白粉替代部分鱼粉对凡纳滨对虾摄食量、生长和肌肉成分的影响.水产

- 学报,2009,33(4):658-665.]
- [29] Gómez-Requeni P, Mingarro M, Calduch-Giner J. A, *et al.* Protein growth performance, amino acid utilisation and somatotropic axis responsiveness to fish meal replacement by plant protein sources in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) [J]. *Aquaculture*, 2004, 232(1):493-510.
- [30] Matsunari H, Yamamoto T, Kim S K, *et al.* Optimum dietary taurine level in casein-based diet for juvenile red sea bream *Pagrus major* [J]. *Fisheries Science*, 2008, 74(2):347-353.
- [31] Finkelstein J D, Martin J J. Methionine metabolism in mammals: Adaptation to methionine excess [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1986, 261(4):1582-1587.
- [32] Stipanuk M H. Role of the liver in regulation of body cysteine and taurine levels: A brief review [J]. *Neurochemical Research*, 2004, 29(1):105-110.
- [33] Goto T, Matsumoto T, Takagi S. Distribution of the hepatic cysteamine dioxygenase activities in fish [J]. *Fisheries Science*, 2001, 67(6):1187-1189.
- [34] Kim S K, Takeuchi T, Akimoto A, *et al.* Effect of taurine supplemented practical diet on growth performance and taurine contents in whole body and tissues of juvenile Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. *Fisheries Science*, 2005, 71(3):627-632.
- [35] Pinto W, Figueira L, Ribeiro L, *et al.* Dietary taurine supplementation enhances metamorphosis and growth potential of *Solea senegalensis* larvae [J]. *Aquaculture*, 2010, 309(1):159-164.
- [36] Pinto W, Rønnestad I, Jordal A E O, *et al.* Cloning, tissue and ontogenetic expression of the taurine transporter in the flatfish Senegalese sole (*Solea senegalensis*) [J]. *Amino Acids*, 2012, 42(4):1317-1327.

## Effects of taurine supplementation on the growth, body composition and tissue free amino acid concentrations in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

ZHOU Mingwen, WANG Hewei, YE Jidan\*

(Xiamen Key Laboratory for Feed Quality Testing and Safety Evaluation,  
Fisheries College of Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The nutritional effects of dietary taurine on the growth, body composition and tissue free amino acid concentrations in Nile tilapia were evaluated. Three hundred tilapias [initial body weight ( $5.89 \pm 0.03$ ) g] were randomly divided into five groups with three replicate tanks at a stock density of twenty fish in each replicate. Five diets were formulated to contain 0, 0.4%, 0.8%, 1.2%, and 1.6% taurine and were allocated to each of the groups of fish twice a day for a feeding period of 56 days. The fish fed the diet at 0.8% taurine got highest weight gain ( $P < 0.05$ ). Dietary taurine levels at 0.4% – 1.6% increased feed intake, hepatosomatic index and viscera index, but reduced feed conversion ratio ( $P < 0.05$ ); Both whole-body moisture and ash contents decreased but whole-body crude protein and lipid contents increased with the increase of dietary taurine level ( $P < 0.05$ ); Quadratic curve analysis indicated that the optimal level of dietary taurine for tilapia growth was 0.75% based on weight gain. Taurine concentrations in serum, liver, muscle and whole-body fish were positively linearly correlated with the dietary taurine levels, and the values for these tissues in taurine-treated groups were significantly higher than those of control group ( $P < 0.05$ ). With the increase of dietary taurine, free amino acid concentrations in liver and muscle gradually decreased, and the values in taurine-treated groups were significantly lower than those in control group ( $P < 0.05$ ).

**Key words:** *Oreochromis niloticus*; taurine; growth performance; body composition; free amino acid

**Corresponding author:** YE Jidan. E-mail: yjdwk@sina.com