

饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼生长性能、消化能力和免疫抗氧化能力的影响

李诗洋^{1,2,3}, 陈晓瑛^{1,2}, 梁浩辉^{1,2}, 谢雨桐^{1,2}, 胡俊茹^{1,2}, 黄燕华³,
周萌³, 王国霞^{1,2}

(1. 广东省农业科学院动物科学研究所 农业农村部华南动物营养与饲料重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 广东省农业科学院动物科学研究所 广东省畜禽育种与营养研究重点实验室, 广东 广州 510640; 3. 仲恺农业工程学院 动物科技学院健康养殖创新研究院, 广东 广州 510225)

摘要: 本试验旨在研究饲料蛋氨酸(Met)水平对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)稚鱼生长性能、消化和免疫抗氧化能力的影响。选取初始体质量为(0.18±0)g的大口黑鲈1440尾,随机分为6组(每组4个重复,每个重复60尾),饲养于室外养殖系统水体体积为50 L的尼龙网箱中,分别饲喂T1~T6(蛋氨酸添加量分别为0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和2.5%,实测值分别为0.67%、1.08%、1.43%、1.78%、2.22%和2.61%)6种等脂等氮饲料,试验期为30 d。结果表明:随着饲料蛋氨酸水平升高,试验鱼增重率、特定生长率、蛋白质沉积率和脂肪沉积率先升高后降低,饲料系数先降低后升高,T2、T3、T4、T5和T6组的增重率、特定生长率均显著高于T1组($P<0.05$),饲料系数显著低于T1组($P<0.05$);随着饲料Met水平升高,试验鱼肠道胰蛋白酶活性呈先上升后下降趋势,T4组最高,对其他消化酶活性则无明显影响;试验鱼肝脏谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化氢酶(CAT)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)、溶菌酶(LZM)活性先升高后降低,CAT、T-SOD、LZM活性在T4组时最高,显著高于T1组($P<0.05$)。饲料中适量添加Met能促进大口黑鲈稚鱼生长、消化吸收能力,提高大口黑鲈稚鱼免疫抗氧化能力,以SGR和抗氧化指标GSH-Px为评价指标获得大口黑鲈稚鱼蛋氨酸需要量分别为饲料干质量的1.72%和1.51%。

关键词: 蛋氨酸; 大口黑鲈; 生长性能; 抗氧化; 肠道发育

中图分类号: S 963

文献标志码: A

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)为我国淡水养殖的主要经济品种之一,全国每年大口黑鲈苗种的需求量达到500亿尾,但在养殖过程中,鱼苗成活率低是目前大口黑鲈鱼苗培育中面临的关键问题,据测算成活率仅为5%~10%。其中鱼苗培育时营养不足是影响其成活率的主要因素之一,蛋氨酸作为鱼类生长的必需氨基酸,是蛋白质合成的重要组分,对鱼体正常的生长及新陈代谢具有重要作用,饲料中适宜的蛋氨酸水平有利于促进鱼类生长。面对鱼粉日益增长的需求和攀升的成本^[1],植物饲料因其供应更稳定、成分更一致且成本更低,正被用作替代品^[2]。而蛋氨

酸作为很多植物性原料的第一限制性氨基酸,广泛地参与鱼类的生理代谢过程^[3],因此水产动物饲料中蛋氨酸的适宜添加尤为重要。陈乃松等^[4]研究得出38 g大口黑鲈对饲料中蛋氨酸的最适需求量为1.22%,占饲料蛋白质的2.75%^[4];12~42日龄大黄鱼(*Larimichthys crocea*)稚鱼的蛋氨酸需要量为饲料的2.58%^[5];2.0 g的大黄鱼幼鱼的蛋氨酸需要量为饲料的1.15%^[6];2.3 g的吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)幼鱼的蛋氨酸需要量为饲料的0.91%^[7];0.6 g的乌苏拟鲮(*Pseudobagrus ussuriensis*)幼鱼的蛋氨酸需要量为饲料的1.41%^[8];24 g的松浦镜鲤(*Cyprinus*

收稿日期: 2024-08-08

修回日期: 2025-01-08

基金项目: 广州市基础研究计划民生科技专题(202002020018);广东省重点领域研发计划(2021B0202050002)

作者简介: 李诗洋(1997—),女,硕士研究生,研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: crishine@163.com

通信作者: 王国霞, E-mail: wanggx78@126.com

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

carpio Songpu mirror) 幼鱼蛋氨酸需求量为饲料的 0.90%^[9]; 1.38 g 黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 幼鱼的蛋氨酸需求量为 1.05%^[10]; 14.7 g 的军曹鱼 (*Rachycentron canadum*) 幼鱼蛋氨酸需求量为饲料的 2.67%^[11]。本试验研究饲料中不同蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼生长、肠道酶活性和免疫抗氧化指标等的影响, 以确定大口黑鲈稚鱼饲料中蛋氨酸的适宜需求量, 为大口黑鲈稚鱼养殖提供营养素参数和开发其专用的人工微颗粒饲料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

以进口鱼粉、大豆浓缩蛋白为主要蛋白质源, 豆油、鱼油、大豆磷脂为脂肪源, 面粉为主要糖源, 并添加复合维生素和复合矿物质等, 以褐藻酸钠作黏合剂, 以丙氨酸作为等氮替代物, 通过添加不同水平蛋氨酸(L-蛋氨酸, 纯度≥95%的晶体氨基酸, 购自石家庄瑞远化工有限公司), 配制成蛋氨酸添加量分别为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 和 2.5% 的 6 种等脂等氮试验饲料, 饲料蛋白质和脂肪水平等参照预试验设定。将全部饲料原料分别粉碎后过 80 目筛, 全部称重后混匀, 微量组分采用逐级扩大法混匀, 加入一定量的水, 充分混匀后经摇摆式制粒机加工, 55 °C 烘干后冷却至室温, 饲料分别过 60 目、40 目和 20 目筛网, 过筛后得到粒径为 0.425~0.850 mm 的颗粒饲料, 并装入密封袋中于 -20 °C 冰箱保存备用。各组饲料组成及营养水平见表 1。

1.2 试验鱼与饲养管理

试验用大口黑鲈稚鱼购于广东梁氏水产种业有限公司。养殖于广东省农业科学院动物科学研究所水产研究室的室外水泥池网箱养殖系统中。试验开始前将大口黑鲈稚鱼在室外循环水系统中暂养 1 周, 其间投喂商品饲料, 每天 4 次(8:00、11:30、15:30 和 19:00)。暂养结束后挑选 1 440 尾活力强、外观健康、初始体质量为 (0.18±0.00) g 的试验鱼, 随机分成 6 组, 每组 4 个重复, 每个重复 60 尾, 养殖在网箱(水体为 50 L/缸)中。每日 8:00、11:30、15:30 和 19:00 进行投喂, 使用虹吸法吸出残饵, 水泥池每天排污并根据情况换水, 表观饱食投喂, 试验周期 30 d。养殖期间自然光源, 水体水温 25.0~29.5 °C、pH 6.5~

7.0、溶解氧>6 mg/L、氨氮<0.20 mg/L、亚硝酸盐<0.05 mg/L。

1.3 样品采集

养殖试验结束后禁食 24 h, 逐缸称重, 并统计存活数。每缸随机取 9 尾鱼测量体长、称量体质量和内脏团质量用于计算形体指标; 取 16 尾鱼于冰上解剖, 取全肠和肝脏, -80 °C 冰箱保存, 用以检测消化酶、免疫抗氧化酶活性, 试剂购于南京建成生物有限公司; 取 10 尾全鱼于 -80 °C 冰箱保存用于全鱼体成分测定; 取 2 尾鱼分离肠道, 置于 4% 甲醛溶液中固定, 以便后期的切片制作。

1.4 指标测定

1.4.1 生长性能指标计算

存活率(Survival rate, SR)、增重率(Weight gain rate, WGR)、特定生长率(Specific growth rate, SGR)、饲料系数(Feed conversion ratio, FCR)、蛋白质沉积率(Protein retention rate, PRR)、脂肪沉积率(Lipid retention rate, LRR)的计算公式:

$$S_R = 100\% \times A_f / A_i \quad (1)$$

$$W_{GR} = 100\% \times (W_f - W_i) / W_i \quad (2)$$

$$S_{GR} = 100\% \times (\ln W_f' - \ln W_i') / t \quad (3)$$

$$F_{CR} = D_a / (W_f - W_i) \quad (4)$$

$$P_{RR} = 100\% \times (W_f \times P_f - W_i \times P_i) / (D_a \times P_d) \quad (5)$$

$$L_{RR} = 100\% \times (W_f \times L_f - W_i \times L_i) / (D_a \times L_d) \quad (6)$$

式中: S_R 为存活率, %; W_{GR} 为增重率, %; S_{GR} 为特定生长率, %/d; F_{CR} 为饲料系数; P_{RR} 为蛋白质沉积率, %; L_{RR} 为脂肪沉积率, %; A_i 和 A_f 分别为初始和终末的鱼体数量; W_i 和 W_f 分别为初始和终末的鱼体总质量, g; W_i' 和 W_f' 分别为初始和终末的平均鱼体质量, g; t 为养殖天数, d; D_a 为总摄入饲料量, g; P_i 、 P_f 和 P_d 分别为初始鱼体粗蛋白质含量、终末鱼体粗蛋白质含量和饲料粗蛋白质含量, g; L_i 、 L_f 和 L_d 分别为初始鱼体粗脂肪含量、终末鱼体粗脂肪含量和饲料粗脂肪含量, %。

肥满度(Condition factor, CF)、脏体比(Viscerosomatic index, VSI)的计算公式:

$$C_F = W_b / L_b \quad (7)$$

$$V_{SI} = 100\% \times W_v / W_b \quad (8)$$

式中: C_F 为肥满度, g/cm³; V_{SI} 为脏体比, %; W_b 和 W_v 分别为鱼体质量和肝脏质量, g; L_b 为鱼体长, cm。

表 1 试验饲料组成及营养水平(风干基础)
Tab. 1 Composition and nutrient levels of basal diets (air-dry basis)

项目 Items	饲料 Diets						%
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
鱼粉 Fish meal	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	
酶解鸡肉粉 Enzyme-digested poultry by-product meal	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
血浆蛋白粉 Spray-dried plasma protein	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	
大豆浓缩蛋白 Soy protein concentrate	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	28.00	
面粉 Wheat flour	12.45	12.45	12.45	12.45	12.45	12.45	
褐藻酸钠 Alginate sodium	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	
鱼油 Fish oil	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	
豆油 Soybean oil	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	
大豆磷脂 Soy lecithin	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	
氯化胆碱 Choline chloride	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
维生素 C 磷酸酯 Ascorbyl polyphosphate	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	
多维 Multi-vitamin ¹⁾	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
多矿 Multi-mineral	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
蛋氨酸 Methionine	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	
丙氨酸 Alanine	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50	0.00	
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
营养水平 Nutrient levels ²⁾							
水分 Moisture	3.66	3.89	3.39	3.5	3.74	3.17	
粗蛋白质 Crude protein	52.75	53.50	53.18	53.36	53.35	53.23	
粗脂肪 Crude fat	12.92	13.05	11.91	12.14	12.47	11.63	
粗灰分 Crude ash	9.63	9.70	9.89	9.70	9.54	9.77	
晶体蛋氨酸(%饲料)Methionine (% of diet)	0.67	1.08	1.43	1.78	2.22	2.61	
总能 Gross energy/(kJ/g)	19.77	20.26	20.63	20.79	20.97	20.52	

注:1)维生素预混料和矿物质预混料为每千克饲料提供:维生素 A 8 000 IU,维生素 B₁ 4 mg,维生素 B₂ 3.6 mg,维生素 B₃ 40 mg,维生素 B₆ 4 mg,维生素 B₁₂ 0.02 mg,维生素 D₃ 3 000 IU,维生素 E 20 IU,维生素 K₃ 2 mg,生物素 0.15 mg,叶酸 1.0 mg,D-泛酸 11 mg,烟酸 10 mg,抗氧化剂 100 mg,铜 10 mg,铁 80 mg,锰 80 mg,锌 75 mg,碘 0.40 mg,硒 0.30 mg;2)指实测值。

Notes: 1) Vitamin premix and mineral premix provided the following per kg of diets: V_A 8 000 IU, V_{B₁} 4 mg, V_{B₂} 3.6 mg, V_{B₃} 40 mg, V_{B₆} 4 mg, V_{B₁₂} 0.02 mg, V_{D₃} 3 000 IU, V_E 20 IU, V_{K₃} 2 mg, biotin 0.15 mg, folic acid 1.0 mg, D-pantothenic acid 11 mg, nicotinic acid 10 mg, antioxidant 100 mg, Cu (as copper sulfate) 10 mg, Fe (as ferrous sulfate) 80 mg, Mn (as manganese sulfate) 80 mg, Zn (as zinc sulfate) 75 mg, I (as potassium iodide) 0.40 mg, Se (as sodium selenite) 0.30 mg; 2) Refers to the measured value.

1.4.2 营养成分检测

饲料及全鱼营养成分采用国标法测定:105℃烘箱干燥法测水分含量(GB/T6435—2014)、乙醚抽提法测粗脂肪含量(GB/T6433—2006)、凯氏定氮法测粗蛋白含量(GB/T6432—2018)、马弗炉 550℃灼烧法测粗灰分含量(GB/T6438—2007)。总能量用 Parr 1281 型自动氧弹仪(Parr, Moline, IL, USA)测量;利用常规酸水解法测定样品中氨基酸的含量。

1.4.3 肝脏免疫、抗氧化指标和肠道消化吸收相关指标测定

从每个网箱中随机选取 8 尾鱼于冰上解剖后取肝脏组织,混合进行免疫、抗氧化指标检测;取

肠道组织,进行肠道消化酶指标检测。肝脏免疫、抗氧化指标和肠道消化吸收相关酶活性采用试剂盒检测,消化酶、谷胱甘肽过氧化物酶和过氧化氢酶均采用比色法进行检测,溶菌酶、总超氧化物歧化酶和丙二醛分别采用比浊法、WST-1 法和 TBA 法进行检测,试剂盒均购自南京建成生物工程研究所,具体操作方法参照试剂盒所附说明书。

1.4.4 组织切片的制作

将固定好的中肠进行修剪、脱水、包埋、切片、PAS 染色、封片最后镜检。应用 CaseViewer 2.4 软件,每张切片分别测量 5 根最高绒毛的绒毛高度、肌层厚度和绒毛上的杯状细胞数量。绒毛高度:肠绒毛基部至顶端的垂直距离;肌层厚度:黏膜下

层基部至浆膜层的垂直距离。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 24.0 对数据进行单因素(One-way ANOVA)分析,用 Duncan's 法分析组间差异显著性,结果用平均值±标准误(Mean±SE)表示, $P<0.05$ 为差异显著水平。

2 结果

2.1 饲料中蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼生长性能的影响

由表 2 可知,大口黑鲈稚鱼的 WGR、SGR、

PRR 和 LRR 随着饲料中蛋氨酸水平升高而显著提高,在 T4 组达到最大,但随着饲料中蛋氨酸水平的进一步增加而显著降低;FCR 则随着饲料中蛋氨酸水平升高而显著降低,在 T4 组时最低,随着饲料中蛋氨酸水平的进一步增加而显著升高($P<0.05$)。各组稚鱼 SR、形体指标 CF 和 VSI 差异不显著($P>0.05$)。以大口黑鲈稚鱼的 SGR 为评价指标,经二次回归模型分析得出大口黑鲈稚鱼对饲料中蛋氨酸的需求量为 1.72% (占饲料蛋白质的 3.23%,图 1)。

表 2 饲料中蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary methionine level on growth performance of juvenile *Micropterus salmoides*

项目 Items	饲料 Diets					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
初均重 IBW/g	0.18±0	0.18±0	0.18±0	0.18±0	0.18±0	0.18±0
末均重 FBW/g	1.77±0.06 ^a	2.26±0.11 ^c	2.27±0.05 ^c	2.37±0.09 ^c	2.20±0.06 ^{bc}	1.99±0.06 ^b
增重率 WGR/%	872.99±65.27 ^a	1 142.44±106.30 ^c	1 140.47±53.56 ^c	1 199.7±98.76 ^c	1 103.54±63.31 ^{bc}	992.29±66.55 ^b
特定生长率 SGR/(%/d)	7.35±0.26 ^a	7.96±0.37 ^{bc}	8.06±0.24 ^c	8.16±0.21 ^c	7.94±0.05 ^{bc}	7.65±0.27 ^{ab}
存活率 SR/%	93.33±4.08	87.78±3.47	90.42±4.17	89.17±3.47	90.00±4.08	90.83±2.89
饲料系数 FCR	1.08±0.07 ^c	0.88±0.03 ^b	0.85±0.06 ^{ab}	0.80±0.04 ^a	0.89±0.03 ^b	0.92±0.03 ^b
肥满度 CF/(g/cm ³)	2.01±0.07	1.92±0.02	1.97±0.03	1.95±0.02	1.95±0.04	1.89±0.04
脏体比 VSI/%	8.35±0.28	8.19±0.15	9.31±0.93	8.58±0.19	8.23±0.14	8.59±0.16
蛋白质沉积率 PRR/%	28.45±1.48 ^a	32.35±1.02 ^{ab}	34.95±1.22 ^{bc}	38.3±1.19 ^c	33.32±1.11 ^b	34.97±1.75 ^{bc}
脂肪沉积率 LRR/%	26.19±1.39 ^a	32.43±4.11 ^{ab}	33.14±1.86 ^{ab}	36.61±2.39 ^b	33.04±1.96 ^{ab}	30.6±2.28 ^{ab}

注:同行数据肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Notes: Different letters in the shoulder labels of peer data indicate significant differences ($P<0.05$), and identical letters or no letters indicate insignificant differences ($P>0.05$).

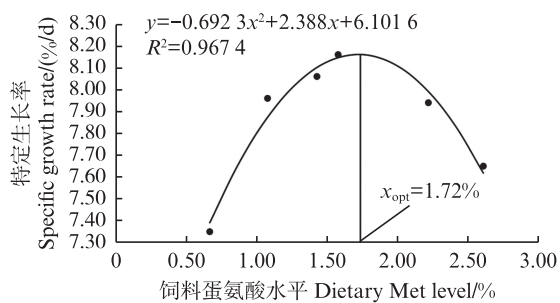


图 1 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼特定生长率的影响
Fig. 1 Effects of dietary Met level on SGR of juvenile *Micropterus salmoides*

2.2 饲料 Met 水平对大口黑鲈稚鱼体组成的影响

从表 3 可知,不同蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼体组成水分、蛋白质和脂肪含量没有差异($P>0.05$)。

2.3 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼肠道酶活的影响

由表 4 可知,试验鱼的胰蛋白活性随饲料蛋氨酸水平的升高呈先上升后下降的趋势,在 T4 组达到最高。饲料中蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼的肠道蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶、碱性磷酸酶(AKP)和超微量 $\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{ATP}$ 酶的活性没有显著影响($P>0.05$)。

2.4 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼肠道结构的影响

饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼中肠道结构的影响见图版和表 5。随着饲料蛋氨酸水平的升高,试验鱼肠道绒毛高度、肌层厚度和杯状细胞数量呈先上升后下降的趋势,绒毛高度和肌层厚度在 T3 组达到最大值,杯状细胞数在 T4 组达到最大值。

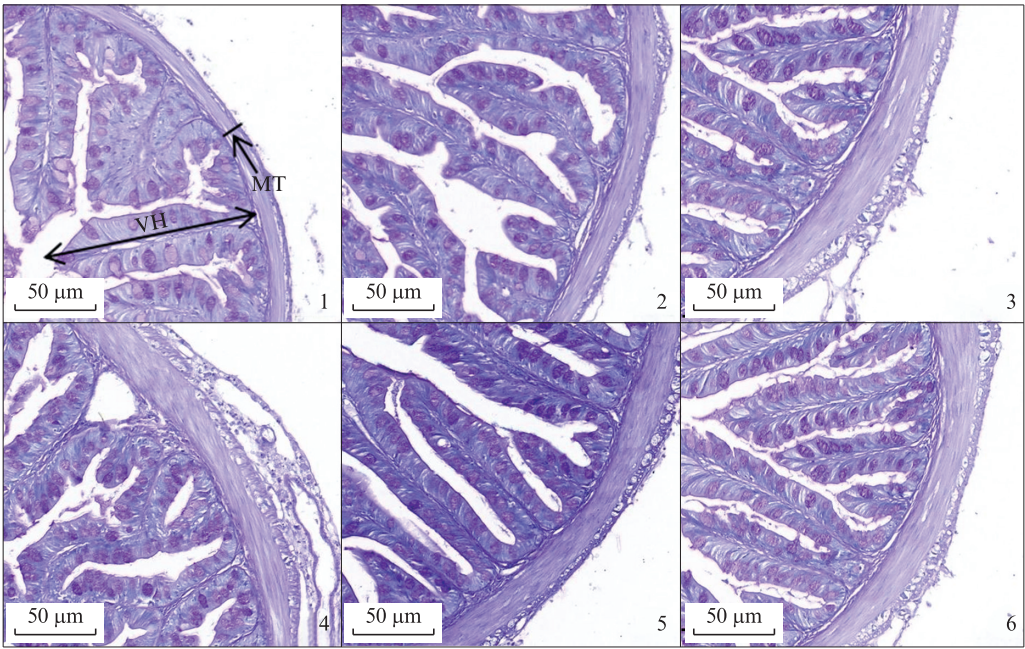
表 3 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼体成分的影响
Tab. 3 Effects of dietary Met level on body indicators and body composition of juvenile *Micropterus salmoides* %

项目 Items	饲料 Diets					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
水分 Moisture	76.29±0.63	76.41±0.59	76.80±0.56	75.85±0.36	76.55±0.94	76.09±0.39
粗蛋白 Crude protein	15.91±0.55	15.52±0.28	15.52±0.32	16.02±0.36	15.56±0.56	16.12±0.18
粗脂肪 Ether extract	3.31±0.07	3.51±0.34	3.36±0.20	3.49±0.13	3.51±0.23	3.22±0.22

注:由于试验鱼个体较小,采样量较少,未能采取足够样品进行全鱼灰分检测。
Notes: Due to the small size of the experimental fish and the small sample size, sufficient samples were not taken for ash content detection of the entire fish.

表 4 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼肠道酶活的影响
Tab. 4 Effects of dietary Met level on intestinal digestion indicators of juvenile *Micropterus salmoides*

项目 Items	饲料 Diets					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
胰蛋白酶 Trypsin/(U/mg prot)	765.81±29.27	852.58±62.75	848.51±103.28	1005.29±92.58	916.54±49.83	880.26±138.19
脂肪酶 Lipase/(U/mg prot)	11.26±1.65	11.14±1.37	12.67±1.46	11.79±0.97	12.45±1.02	11.05±1.33
淀粉酶 Amylase/(U/mg prot)	0.40±0.04	0.39±0.06	0.33±0.02	0.34±0.02	0.29±0.01	0.38±0.02
碱性磷酸酶 AKP/(金氏单位/mg prot)	1.31±0.01	1.12±0.09	1.12±0.03	1.22±0.10	1.11±0.05	1.29±0.04
超微量 Na ⁺ -K ⁺ ATP 酶/(U/mg prot)	1.66±0.13	1.46±0.08	1.43±0.11	1.70±0.26	1.66±0.13	1.66±0.10



1~6. T1-T6; VH. 绒毛高度;MT. 肌层厚度。
1-6. Group T1-T6; VH. Villus height; MT. Muscular thickness.

图版 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼中肠肠道显微结构的影响(PAS,×200)
Plate Effects of dietary Met level on intestinal microstructure of juvenile *Micropterus salmoides* (PAS,×200)

表 5 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼中肠肠道结构的影响
Tab. 5 Effects of dietary Met level on intestinal structure of juvenile *Micropterus salmoides*

项目 Items	饲料 Diets					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
绒毛高度 Villus height/μm	503.18±73.67	617.31±92.07	696.00±59.87	645.05±49.63	606.44±42.49	498.00±88.87
肌层厚度 Intestinal wall thickness/μm	36.20±5.63	39.20±7.29	43.75±8.82	40.50±9.57	35.35±4.58	30.10±9.14
杯状细胞 Goblet/(cells/个)	27.53±3.04	27.57±4.30	30.05±5.60	33.79±6.20	25.87±2.46	28.38±3.57

2.5 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼肝脏免疫抗氧化能力的影响

由表6可知,试验鱼肝脏LZM、GSH-Px、CAT、T-SOD活性随饲料蛋氨酸水平升高而显著上升($P<0.05$),在T4组时达到最高,随着蛋氨酸水平的进一

步提高酶活性下降;而试验鱼的丙二醛(MDA)含量则随着蛋氨酸水平的升高而降低,T1组显著高于其他试验组($P<0.05$)。进一步分析知,GSH-Px活性与蛋氨酸符合折线模型,当蛋氨酸添加水平为1.51%时,GSH-Px活性达到峰值(图2)。

表6 饲料蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼肝脏免疫抗氧化指标的影响

Tab. 6 Effects of dietary Met level on antioxidant indicators of juvenile *Micropterus salmoides*

项目 Items	饲料 Diets					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
溶菌酶 LZM/($\mu\text{g/mL}$)	1.94 \pm 0.03 ^a	2.29 \pm 0.15 ^{ab}	2.54 \pm 0.13 ^b	2.60 \pm 0.15 ^b	2.60 \pm 0.16 ^b	2.42 \pm 0.25 ^{ab}
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot)	25.15 \pm 0.76 ^a	26.93 \pm 2.77 ^{ab}	33.94 \pm 2.37 ^c	32.65 \pm 1.53 ^{bc}	30.33 \pm 0.18 ^{abc}	27.93 \pm 1.93 ^{ab}
过氧化氢酶 CAT/(U/mg prot)	24.73 \pm 1.72 ^{ab}	22.33 \pm 0.48 ^a	25.22 \pm 1.41 ^{ab}	27.61 \pm 2.43 ^b	27.40 \pm 0.85 ^b	23.48 \pm 1.42 ^{ab}
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot)	184.84 \pm 8.62 ^a	184.96 \pm 5.48 ^a	218.32 \pm 12.16 ^b	219.14 \pm 8.38 ^b	194.75 \pm 2.57 ^{ab}	208.53 \pm 8.75 ^{ab}
丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	0.81 \pm 0.05 ^b	0.60 \pm 0.02 ^a	0.63 \pm 0.02 ^a	0.65 \pm 0.04 ^a	0.67 \pm 0.04 ^a	0.68 \pm 0.04 ^a

注:同行数据肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Notes: Different letters in the shoulder labels of peer data indicate significant differences ($P<0.05$), and identical letters or no letters indicate insignificant differences ($P>0.05$).

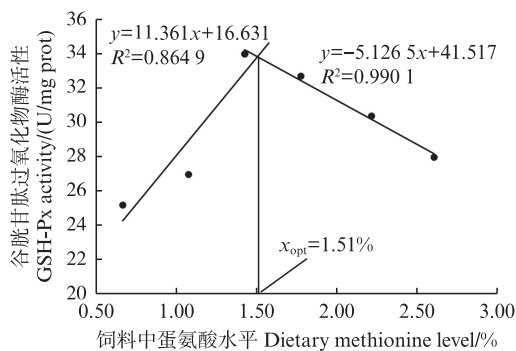


图2 饲料中蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼肝脏谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响

Fig. 2 Effects of dietary methionine level on GSH-Px of juvenile *Micropterus salmoides*

3 讨论

3.1 饲料中蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼生长性能的影响

蛋氨酸作为水生动物重要的必需氨基酸之一,在蛋白质合成和促生长上发挥着重要作用。本研究发现,添加最低量蛋氨酸的T1组生长性能低于其他试验组,但随着蛋氨酸水平的提高,大口黑鲈稚鱼的WGR、SGR、PRR和LRR均显著提高,FCR显著降低;但随着蛋氨酸水平的进一步的升高,蛋氨酸水平最高的T6组试验鱼的生长速度相比T2、T3、T4和T5组却也显著降低,这说明蛋氨酸是大口黑鲈稚鱼不可或缺的氨基酸,晶体蛋氨酸能够被有效利用,但饲料中缺乏或过量的蛋氨酸也会抑制大口黑鲈的生长。研究表明,当

饲料中蛋氨酸缺乏或者过量时,对红鳍东方鲀(*Takifugu rubripes*)幼鱼^[12]、团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)幼鱼^[13]、吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[14]的生长性能均有抑制。饲料中氨基酸水平的平衡会影响氨基酸的利用,当饲料中蛋氨酸缺乏时,机体内蛋氨酸水平也随之降低,从而打破了氨基酸的平衡,限制了机体对其他氨基酸的利用,抑制了鱼体的生长发育,也降低了饲料的利用效率^[15];而当饲料中蛋氨酸水平过高时,可能会破坏氨基酸的平衡,阻碍大口黑鲈对其他氨基酸的吸收利用,最终影响蛋白质合成,进而使试验鱼鱼体生长性能降低^[16],这与斜带石斑鱼^[17]的研究结果一致。不同的饲料蛋氨酸水平能影响鱼类的饲料利用和蛋白质的沉积率,本试验中饲料蛋氨酸水平不足和过量时试验鱼表现出较高的FCR和较低的PRR,说明适宜的蛋氨酸水平有利于大口黑鲈稚鱼对饲料的吸收和利用,这与大黄鱼稚鱼^[5]、军曹鱼幼鱼^[18]和虎龙杂交斑(*Epinephelus fuscogutatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)^[19]等的研究结果相似。

蛋氨酸和胱氨酸统称为含硫氨基酸,在鱼体内能够通过蛋氨酸合成胱氨酸,所以胱氨酸被认为是非必需氨基酸。饲料中含有胱氨酸时,可显著减少动物对蛋氨酸的需要量^[19]。对于稚鱼和幼鱼而言,生理发育阶段和代谢能力存在差异,这可能导致它们在胱氨酸合成与利用上存在差异。稚鱼处于生长发育的初期,其生理系统尚未完全成熟,包括与氨基酸代谢相关的酶系统^[20]。

这可能导致稚鱼在胱氨酸合成上的效率相对较低,从而需要更多的蛋氨酸来满足其对含硫氨基酸的需求。相比之下,幼鱼的生理系统更为成熟,可能具有更高的胱氨酸合成能力,因此对蛋氨酸的需求量相对较低。稚鱼处于快速生长期,其代谢速率通常较高,对营养物质的需求也更大^[21]。为了满足快速的生长和发育,稚鱼可能需要更多的氨基酸作为构建块来合成蛋白质^[22]。因此,即使稚鱼和幼鱼在饲料中胱氨酸含量相同的情况下,稚鱼由于更高的代谢速率和营养需求,也可能表现出对蛋氨酸更高的需求量。

3.2 饲料中蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼消化吸收能力的影响

肠道是鱼类营养吸收和消化的主要场所,蛋氨酸缺乏或过量都会影响肠道形态结构、消化酶活性及吸收功能。消化酶包括胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶,其活性对肠道消化和吸收能力有重要影响。本研究中大口黑鲈稚鱼的肠道胰蛋白酶的活性整体上都呈现先上升再下降的趋势,这与在鲈鲤(*Percocypris pingi*)^[23]上的研究结果相似;淀粉酶活性随蛋氨酸水平的升高呈先下降后上升趋势,这与在松浦镜鲤^[24]、洛氏鲮(*Rhynchocypris lagowskii*)^[25]上的研究一致,可能是由于稚鱼对蛋白质和脂肪的利用率比对碳水化合物化合物的利用率更高,淀粉酶活性的变化表明随着饲料蛋氨酸水平的增加,鱼体对蛋白质和脂肪的利用增加,对糖类的需求降低^[26]。

营养物质的跨膜转运方式有许多种,其中主动转运是机体最重要的物质转运形式, $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATP}$ 酶的活性直接影响主动转运过程的能量供给,可以间接反映小肠黏膜的吸收功能^[27]。AKP是一种重要的刷状缘膜酶,参与多种营养物质的转运,其活性一定程度上能够反映肠上皮细胞的发育水平,因此常作为水生动物肠黏膜发育成熟度的标识酶^[28]。本试验中蛋氨酸水平对刷状缘膜酶活性无显著影响,但肠道形态结构与机体的消化吸收能力息息相关,肠道绒毛高度增高有利于增强吸收能力,肌层厚度增高有利于肠道消化。随着饲料蛋氨酸水平的增加,试验鱼的肠道绒毛高度和肌层厚度均呈先上升后下降的趋势,T3组高于其他试验组,这说明适当添加蛋氨酸能有效改善大口黑鲈稚鱼的肠道发育,增加消化吸收能力,在幼建鲤^[29]的研究中也发现类似现象。

胰蛋白酶作为消化蛋白质的关键酶,其活性随饲料蛋氨酸水平的增加呈现先上升后下降的趋势。这表明适宜的蛋氨酸水平能够提高胰蛋白酶的活性,进而促进蛋白质的消化,增加氨基酸的可利用性,改变了肠道的吸收功能。研究表明Met缺乏或过量均会导致试验鱼消化吸收能力下降,从而降低试验鱼的生长发育^[30]。Met缺乏会导致肠道组织的功能和代谢受到抑制,从而影响绒毛的发育和高度;Met过量会导致肠道屏障功能受损,同时会改变肠道微生物的组成,使机会性病原体的丰度增加,进而使肠道发育减缓^[31]。

3.3 饲料中蛋氨酸水平对大口黑鲈稚鱼免疫抗氧化能力的影响

研究表明,蛋氨酸可以提高动物机体抗氧化能力,其在动物体内的抗氧化能力主要通过氧化还原和谷胱甘肽代谢两种途径^[32]。几乎所有的活性氧都可被蛋氨酸残基修饰,氧化还原途径是通过蛋氨酸刺激线粒体,残基中的二硫键保护蛋白质等生物分子免受氧化损伤;随着氧化还原反应,达到将动物体内活性氧清除的效果,并且氧化反应消耗的蛋氨酸残基可通过相应的还原反应得到补充。本实验中添加适宜Met水平,大口黑鲈获得最大WGR和SGR时,肝脏T-SOD与CAT活性最高,能够有效提高试验鱼的抗氧化能力,改善试验鱼的氧化损伤。这与斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)^[33]的研究结果一致。

蛋氨酸代谢过程中转甲基后水解生成的中间产物同型半胱氨酸(Hcy),能够通过转硫途径生成半胱氨酸(Cys)进行代谢反应生成抗氧化产物(谷胱甘肽、牛磺酸)清除体内氧自由基,参与机体免疫抗氧化反应^[34-35]。鱼类的正常生长与免疫反应有着密不可分的关系。GSH-Px、CAT和T-SOD是酶性抗氧化系统的主要成分,其活性影响体内MDA的含量;MDA是过氧化脂质分解代谢的产物,通过机体内MDA的含量反映细胞损伤程度,机体通过抗氧化酶的作用清除细胞产生的过氧化物而免受损伤^[36]。本研究中大口黑鲈稚鱼T1组缺乏蛋氨酸,其MDA含量显著高于其他试验组,GSH-Px显著低于其他试验组,表明饲料中缺乏蛋氨酸会导致大口黑鲈稚鱼机体抗氧化能力减弱,T3和T4组T-SOD、GSH-Px和LZM活性显著高于T1组,表明适宜水平的蛋氨酸能增强鱼体免疫抗氧化能力,这与在丝尾鲮

(*Mystus nemurus*)^[37]、花鲈 (*Lateolabrax japonicus*)^[38] 上的研究结果一致。研究表明,团头鲂幼鱼^[39]在蛋氨酸水平为 0.84% 时 GSH-Px 活性达到峰值低于大口黑鲈稚鱼 GSH-Px 活性达到最大值时所需的蛋氨酸水平,可能是因为不同规格鱼类对蛋氨酸的最适需求量存在差异。蛋氨酸能促进肝内脂肪酸的代谢,一些研究^[40-41]表明,蛋氨酸过量或不足会导致肝脏损伤,从而影响肝脏的免疫抗氧化功能;蛋氨酸还可以通过免疫球蛋白的水平来影响动物的体液免疫功能,研究发现在饲料中添加蛋氨酸提高了黄颡鱼血清总免疫球蛋白的含量,进而使黄颡鱼的免疫能力得到增强^[6]。PAN 等^[42]在草鱼中的研究表明,饲料中添加蛋氨酸羟基类似物增加了草鱼组织中溶菌酶、碱性磷酸酶、免疫球蛋白 M 和补体 C3 的含量,提高了草鱼的免疫能力。研究^[43-44]发现,蛋氨酸可以通过增强白细胞吞噬能力和提高特异性抗体效价来提高建鲤的免疫力。目前在大口黑鲈上未发现有相关的研究,对于大口黑鲈的体液免疫功能是否受蛋氨酸水平的影响值得探讨。

4 结论

饲料中适量添加蛋氨酸能促进大口黑鲈稚鱼生长,提高大口黑鲈稚鱼的消化吸收和免疫抗氧化能力。以 SGR 和抗氧化指标 GSH-Px 为评价指标获得大口黑鲈稚鱼蛋氨酸需求量分别为饲料干重的 1.72% 和 1.51% (占饲料蛋白质的 3.23% 和 2.83%)。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] TACON A G J, HASAN M R, METIAN M. Demand and supply of feed ingredients for farmed fish and crustaceans. Trends and prospects[C]//FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 564. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2011: 87.
- [2] GATLIN D M, BARROWS F T, BROWN P, et al. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review[J]. Aquaculture Research, 2007, 38 (6): 551-579.
- [3] GOFF J B, GATLIN III D M. Evaluation of different sulfur amino acid compounds in the diet of red drum, *Sciaenops ocellatus*, and sparing value of cystine for methionine[J]. Aquaculture, 2004, 241(1/4): 465-477.
- [4] 陈乃松, 马建忠, 周恒永, 等. 大口黑鲈对饲料中蛋氨酸需求量的评定[J]. 水产学报, 2010, 34(8): 1244-1253.
- [5] CHEN N S, MA J Z, ZHOU H Y, et al. Assessment of dietary methionine requirement in largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(8): 1244-1253.
- [6] 于海瑞, 艾庆辉, 麦康森, 等. 大黄鱼稚鱼 L-蛋氨酸需要量的研究[J]. 水生生物学报, 2013, 37(6): 1094-1102.
- [7] YU H R, AI Q H, MAI K S, et al. L-methionine requirement of large yellow croaker (*Pseudosciaenops crocea* R.) larvae [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(6): 1094-1102.
- [8] ELMADA C Z, HUANG W, JIN M, et al. The effect of dietary methionine on growth, antioxidant capacity, innate immune response and disease resistance of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2016, 22(6): 1163-1173.
- [9] HE J Y, LONG W Q, HAN B, et al. Effect of dietary L-methionine concentrations on growth performance, serum immune and antioxidative responses of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. Aquaculture Research, 2017, 48(2): 665-674.
- [10] WANG Y Y, CHE J F, TANG B B, et al. Dietary methionine requirement of juvenile *Pseudobagrus ussuriensis* [J]. Aquaculture Nutrition, 2016, 22 (6): 1293-1300.
- [11] 程龙, 王连生, 徐奇友. 饲料蛋氨酸水平对松浦镜鲤生长性能、肌肉品质及肌肉合成通路相关基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(3): 1293-1304.
- [12] CHENG L, WANG L S, XU Q Y. Effects of dietary methionine level on growth performance, muscle quality and muscle synthesis pathway related gene expression of *Songpu* mirror carp [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(3): 1293-1304.
- [13] CHEN Y, CAO J M, HUANG Y H, et al. The dietary L-methionine requirement of the juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. The Israeli Journal of aquaculture-Bamidgeh, 2014, 966: 1-9.
- [14] 赵红霞, 曹俊明, 吴建开, 等. 军曹鱼幼鱼对蛋氨酸的需要量[J]. 饲料工业, 2006, 27(4): 32-34.
- [15] ZHAO H X, CAO J M, WU J K, et al. Research on methionine requirement for juvenile cobia, *rachycentron canadum* [J]. Feed Industry, 2006, 27(4): 32-34.
- [16] 张庆功, 梁萌青, 徐后国, 等. 红鳍东方鲀幼鱼对饲料中蛋氨酸需求的研究[J]. 渔业科学进展, 2019, 40 (4): 1-10.
- [17] ZHANG Q G, LIANG M Q, XU H G, et al. Dietary methionine requirement of juvenile tiger puffer (*Takifugu*

- rubripes*) [J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40 (4): 1-10.
- [13] 廖英杰. 团头鲂幼鱼对蛋氨酸、赖氨酸和精氨酸需要量的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- LIAO Y J. Dietary methionine, lysine and arginine requirements of juvenile Wuchang bream (*Megalobrama amblycephala*) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [14] 向泉, 周兴华, 罗莉, 等. 饲料蛋氨酸水平对吉富罗非鱼生长、饲料利用率和体成分的影响[J]. 水产学报, 2014, 38(4): 537-548.
- XIANG X, ZHOU X H, LOU L, et al. Effects of dietary methionine levels on the growth performance, feed utilization and body composition of GIFT Tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(4): 537-548.
- [15] 陈秀梅, 申斌, 李萌, 等. 饲料必需氨基酸平衡关联度对框镜鲤生长、蛋白质消化和代谢的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(4): 36-42.
- CHEN X M, SHEN B, LI M, et al. Effects of dietary essential amino acid balance relativity on growth, digestion and metabolism of protein of *Cyprinus carpio* [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36 (4): 36-42.
- [16] 桂聪, 邓琦琦, 杨慧君, 等. 低蛋白饲料添加蛋氨酸和赖氨酸对大口黑鲈生长性能和抗氧化能力的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 184-191.
- GUI C, DENG Q Q, YANG H J, et al. Effects of methionine and lysine supplementation in low protein diets on growth performance, body composition, antioxidant capacity and immune enzymes of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 184-191.
- [17] LUO Z, LIU Y J, MAI K S, et al. Dietary L-methionine requirement of juvenile grouper *Epinephelus coioides* at a constant dietary cystine level[J]. Aquaculture, 2005, 249 (1/4): 409-418.
- [18] 何远法, 郭勇, 迟淑艳, 等. 低鱼粉饲料中补充蛋氨酸对军曹鱼生长性能、体成分及肌肉氨基酸组成的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(2): 624-634.
- HE Y F, GUO Y, CHI S Y, et al. Effects of methionine supplementation in low fish meal diet on growth performance, body composition and muscle amino acid composition of cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(2): 624-634.
- [19] 李小军. 饲料赖氨酸和蛋氨酸对虎龙杂交斑幼鱼生长、饲料利用、肠道形态学和免疫的影响[D]. 海口: 海南大学, 2019.
- LI X J. Effects of dietary lysine and methionine levels on survival, growth, feed utilization, gut morphology and immunity of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*♀×*Epinephelus lanceolatus*♂) [D]. Haikou: Hainan University, 2019.
- [20] 陈慕雁, 张秀梅. 海水鱼类仔稚鱼消化生理学研究进展[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(3): 81-88.
- CHEN M Y, ZHANG X M. Recent advances in digestive physiology of marine fish larvae-juvenile [J]. Marine Fisheries Research, 2004, 25(3): 81-88.
- [21] 宫官, 薛敏, 王嘉, 等. 仔稚鱼营养需要及生长发育的营养调控[J]. 动物营养学报, 2014, 26(4): 843-851.
- GONG G, XUE M, WANG J, et al. Nutrition requirement and nutritional regulation of growth and development for fish larvae [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2014, 26(4): 843-851.
- [22] 李诗洋, 胡俊茹, 黄燕华, 等. 肉食性仔稚鱼的营养需要与饲料开发的研究进展[J]. 饲料工业, 2023, 44 (3): 97-103.
- LI S Y, HU J R, HUANG Y H, et al. Research progress on nutritional requirement and feed development of carnivorous larvae and juveniles [J]. Feed Industry, 2023, 44(3): 97-103.
- [23] 严太明, 李松, 何治德, 等. 鲈鲤仔稚鱼肠道形态发育及消化酶活性分析[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37 (3): 390-396.
- YAN T M, LI S, HE Z D, et al. Ontogenetic development and activities of digestive enzymes of the digestive system in larval and juvenile of *Percocypris pingi* [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37 (3): 390-396.
- [24] 赵静怡, 杨欣, 徐奇友. 包膜蛋氨酸对松浦镜鲤生长性能、肠道消化酶和肌肉氨基酸组成的影响[J]. 饲料工业, 2022, 43(20): 40-46.
- ZHAO J Y, YANG X, XU Q Y. Effects of coated methionine on growth performance, intestinal digestive enzymes and muscle amino acids content of Songpu mirror carp (*Cyprinus carpio* Songpu) [J]. Feed Industry, 2022, 43(20): 40-46.
- [25] 段晶, 吴莉芳, 王婧瑶, 等. 蛋氨酸水平对洛氏鲮生长及消化酶和蛋白质代谢酶活力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 23-31.
- DUAN J, WU L F, WANG J Y, et al. Effects of methionine level on growth performance and activities of digestive enzymes and protein metabolism enzymes of *Rhynchocypris lagowskii* Dybowski [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 23-31.
- [26] 苏昕. 大口黑鲈早期发育肌肉生长及消化性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022.
- SU X. Study on muscle growth and digestive performance of *Micropterus salmoides* during early development [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022.

- [27] 黄春慧, 李宁, 胥蕾, 等. 饲料非植酸磷水平对14日龄仔鹅肠道组织形态、食糜酶活性及菌群结构的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(3): 1674-1684.
- HUANG C H, LI N, XU L, et al. Effects of dietary non-phytic phosphorus levels on intestinal morphology, chyme enzyme activities and microbial structure of 14-day-old goslings [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(3): 1674-1684.
- [28] CUVIER-PÉRES A, KESTEMONT P. Development of some digestive enzymes in Eurasian perch larvae *Perca fluviatilis* [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2001, 24(4): 279-285.
- [29] 彭艳, 唐凌, 帅柯, 等. 蛋氨酸对幼建鲤生长及消化吸收功能的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2009, 45(13): 33-38.
- PENG Y, TANG L, SHUAI K, et al. Effect of methionine on digestive function of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* Var. Jian) [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2009, 45(13): 33-38.
- [30] 王连生, 范泽, 吴迪, 等. 水产动物蛋氨酸营养研究进展[J]. 动物营养学报, 2020, 32(11): 4981-4991.
- WANG L S, FAN Z, WU D, et al. Research progress of methionine nutrition in aquatic animals [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(11): 4981-4991.
- [31] ZHOU L X, YAN Z, YANG S F, et al. High methionine intake alters gut microbiota and lipid profile and leads to liver steatosis in mice [J]. Food & Function, 2024, 15(15): 8053-8069.
- [32] 冯艳, 杨琳, 朱勇文, 等. 蛋氨酸调控动物主要生理功能的机制[J]. 中国科学(生命科学), 2019, 49(3): 228-237.
- FENG Y, YANG L, ZHU Y W, et al. Methionine regulates the major physiological functions of animals[J]. Scientia Sinica Vitae, 2019, 49(3): 228-237.
- [33] 杨炬懿, 王学武, 迟淑艳, 等. 蛋氨酸对2个规格斜带石斑鱼生长性能、血清生化指标及肝脏酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(3): 1305-1314.
- YANG X Y, WANG X W, CHI S Y, et al. Effects of methionine on growth performance, serum biochemical indices and liver enzyme activity of *Epinephelus coioides* in two sizes [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(3): 1305-1314.
- [34] TRIPODI F, CASTOLDI A, NICASTRO R, et al. Methionine supplementation stimulates mitochondrial respiration [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular Cell Research, 2018, 1865(12): 1901-1913.
- [35] LEVINE R L, BERLETT B S, MOSKOVITZ J, et al. Methionine residues may protect proteins from critical oxidative damage [J]. Mechanisms of Ageing and Development, 1999, 107(3): 323-332.
- [36] 李静, 李晓丽, 王玲, 等. 低鱼粉饲料中添加羟基蛋氨酸对凡纳滨对虾生长性能、抗氧化能力和抗亚硝酸盐胁迫的影响[J]. 水产学报, 2022, 46(10): 1848-1859.
- LI J, LI X L, WANG L, et al. Effects of hydroxyl methionine selenium supplementation in low-fishmeal diet on growth, antioxidant ability and nitrite tolerance of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(10): 1848-1859.
- [37] 张新党, 李光彬, 王秋梅, 等. 蛋氨酸和半胱氨酸对丝尾鳢生长性能、蛋氨酸代谢和蛋白质代谢的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(20): 136-143.
- ZHANG X D, LI G B, WANG Q M, et al. Effects of dietary methionine and cystine on growth performance, methionine metabolism and protein metabolism of Asian red-tailed catfish (*Hemibagrus wyckiioides*) [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(20): 136-143.
- [38] 张树威, 鲁康乐, 宋凯, 等. 饲料羟基蛋氨酸钙、DL-蛋氨酸对花鲈生长、抗氧化能力及肠道蛋白酶活性的影响[J]. 水产学报, 2017, 41(12): 1908-1918.
- ZHANG S W, LU K L, SONG K, et al. Effects of crystalline methionine and calcium 2-hydroxy-4-(methylthio) butyrate on growth, antioxidant ability and intestinal protease activities of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(12): 1908-1918.
- [39] 季珂. 蛋氨酸对草鱼稚鱼和团头鲂幼鱼生长、营养代谢、免疫和抗氧化能力的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
- JI K. Study on the effects of methionine on growth, nutrient metabolism, immunity and anti-oxidant capacity in grass carp fry and juvenile blunt snout bream [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.
- [40] 王香丽. 蛋氨酸对瓦氏黄颡鱼幼鱼生长和代谢的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- WANG X L. Effects of dietary methionine on growth performance and methionine metabolism of juvenile darkbarbel catfish (*Pelteobagrus vachelli*) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [41] FENG L, XIAO W W, LIU Y, et al. Methionine hydroxy analogue prevents oxidative damage and improves antioxidant status of intestine and hepatopancreas for juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. Aquaculture Nutrition, 2011, 17(6): 595-604.
- [42] PAN F Y, FENG L, JIANG W D, et al. Methionine hydroxy analogue enhanced fish immunity via modulation of NF- κ B, TOR, MLCK, MAPKs and Nrf2 signaling in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 56: 208-228.
- [43] 孙崇岩, 帅柯, 冯琳, 等. 蛋氨酸对幼建鲤疾病抵抗能力及免疫应答的影响[J]. 动物营养学报, 2009, 21(4): 506-512.

SUN C Y, SHUAI K, FENG L, et al. Effects of methionine on immune response and disease resistance of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2009, 21(4): 506-512.

[44] KUANG S Y, XIAO W W, FENG L, et al. Effects of graded levels of dietary methionine hydroxy analogue on immune response and antioxidant status of immune organs in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2012, 32(5): 629-636.

Effects of dietary methionine levels on growth performance, antioxidant capacity and intestinal development of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

LI Shiyang^{1,2,3}, CHEN Xiaoying^{1,2}, LIANG Haohui^{1,2}, XIE Yutong^{1,2}, HU Junru^{1,2}, HUANG Yanhua³, ZHOU Meng³, WANG Guoxia^{1,2}

(1.Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2.Guangdong Key Laboratory of Animal Breeding and Nutrition, Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 3.Innovative Institute of Animal Healthy Breeding, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, Guangdong, China)

Abstract: This experiment was conducted to study the effects of dietary methionine levels on the growth performance, digestion and absorption related indexes and antioxidant capacity of juvenile *Micropterus salmoides*. 1 440 largemouth bass with an initial body weight of (0.18 ± 0) g were selected and randomly divided into 6 groups (each group had 4 replicates, with 60 replicates each). They were raised in nylon cages with a water volume of 50 L in an outdoor aquaculture system, and fed with equal nitrogen and fat feed ranging from T1 to T6 (methionine additions of 0, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% and 2.5%, with measured values of 0.67%, 1.08%, 1.43%, 1.78%, 2.22% and 2.61%, respectively). The experimental period is 30 days. The results showed that as the feed methionine level increased, the weight gain rate, specific growth rate, and protein deposition of the experimental fish first increased and then decreased, and the feed coefficient first decreased and then increased. The weight gain rate and specific growth rate of the 1.08%, 1.43%, 1.78%, 2.22% and 2.61% groups were significantly higher than the 0.67% group ($P < 0.05$), and the feed coefficient was significantly lower than the 0.67% group ($P < 0.05$); With the increase of feed methionine levels, the activity of trypsin in the intestinal tract of experimental fish showed a trend of first increasing and then decreasing, with the highest in the 1.78% group, and had no significant effect on other intestinal enzyme activities; With the increase of feed methionine levels, the activities of GSH-Px, CAT, T-SOD, and LZM in the liver of experimental fish first increased and then decreased. CAT, T-SOD, and LZM activities were highest at 1.78%, significantly higher than those in the 0.67% group ($P < 0.05$). Using specific growth rate as an evaluation indicator, the demand for methionine in juvenile largemouth bass is 1.72%, accounting for 3.23% of the feed protein.

Key words: methionine; largemouth bass; growth performance; antioxidant; intestinal development