

doi: 10.7541/2019.136

不同形式蛋氨酸对黄鳊生长、血清生化、血清游离氨基酸含量及肌肉品质的影响

胡亚军^{1,2} 胡毅^{1,2} 石勇^{1,2} 戴振炎^{1,2} 钟蕾^{1,2}

(1. 湖南农业大学湖南省特色水产资源利用工程技术研究中心, 长沙 410128;

2. 水产高效健康生产湖南省协同创新中心, 常德 415000)

摘要: 以初始体重(30.00±0.45) g的黄鳊(*Monopterus albus*)为研究对象, 以低鱼粉饲料为对照组, 在低鱼粉饲料中分别添加蛋氨酸有效含量为2 g/kg的晶体蛋氨酸(C-Met)、包膜蛋氨酸(E-Met)、蛋氨酸羟基类似物钙盐(MHA-Ca)、蛋氨酸羟基类似物(MHA), 研究其在低鱼粉黄鳊饲料中的利用效果, 共5个处理组, 养殖试验持续10周。结果表明: (1)在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸均有提高黄鳊增重率和蛋白质效率比、降低饲料系数的趋势, 其中MHA-Ca和MHA组与对照组差异显著($P<0.05$)。 (2)在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸均显著提高了肠道胰蛋白酶活力、血清胆汁酸、总胆固醇、总蛋白、尿素氮和血氨含量、肌肉黏附性与胶黏性($P<0.05$); 添加MHA-Ca和MHA显著提高了肠道淀粉酶活力、血清葡萄糖和高密度脂蛋白胆固醇含量、肝脏谷草转氨酶活力、全鱼粗蛋白含量、肌肉硬度、弹性和咀嚼性($P<0.05$), 显著降低了黄鳊肝体比与血清谷草转氨酶活力($P<0.05$)。 (3)对照组在摄食6h出现蛋氨酸吸收峰值, C-Met与MHA-Ca组均在摄食后9h出现蛋氨酸吸收峰值, E-Met组在摄食后12h出现蛋氨酸吸收峰值, MHA组分别在摄食后3h和9h出现蛋氨酸峰值。结果表明, 在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸均能提高黄鳊生长和氨基酸代谢, 且MHA-Ca与MHA效果较佳。

关键词: 黄鳊; 晶体蛋氨酸; 包膜蛋氨酸; 蛋氨酸羟基类似物钙盐; 蛋氨酸羟基类似物; 生长; 氨基酸代谢

中图分类号: S965.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2019)06-1155-09

由于鱼粉资源紧缺、价格上涨, 大量植物蛋白源被应用到水产饲料中, 但植物蛋白源中氨基酸不平衡, 尤其是蛋氨酸缺乏, 影响了鱼类生长和代谢^[1]。因此, 研究者通过添加蛋氨酸以期提高植物蛋白源的利用效果, 但外源性添加的蛋氨酸在水产动物中的利用效果存在差异, 一些研究表明, 在低鱼粉饲料中添加晶体蛋氨酸(C-Met)能显著提高尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[2]、军曹鱼(*Rachycentron canadum*)^[3]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[4]、南美白对虾(*Penaeus vannamei*)^[5]、异育银鲫(*Carassius auratus*)^[6]和黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[7]的生长性能; 但是对鲤(*Cyprinus carpio*)^[8]、斑节对虾(*Marsupenaeus japonicus*)^[9]、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)^[10]和花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[11]等的促生长效果却不显著。其原因可能是外源性添加

晶体氨基酸与饲料中蛋白质态氨基酸吸收不同步, 而造成的氨基酸代谢效率下降^[12]。针对此问题, 有学者通过包膜和胶囊化方式对C-Met进行缓释处理来提高氨基酸的利用率。据报道, 包膜蛋氨酸(E-Met)在鲤^[8]、异育银鲫^[13]、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)^[14]和罗非鱼^[2]中的利用效果优于C-Met。蛋氨酸羟基类似物(MHA), 是由蛋氨酸的氨基被羟基取代的具有类似蛋氨酸功能的褐色黏液, 具有较强的硫化物刺激性气味, 且酸性较强。MHA与氢氧化钙或氧化钙中和反应, 即为固体粉状的蛋氨酸羟基类似物钙(MHA-Ca), 虽然MHA与MHA-Ca无氨基, 但在动物体内可通过生成L-蛋氨酸发挥作用, 有研究表明, 建鲤(*Cyprinus carpio* Jian)对MHA和MHA-Ca的利用效果优于C-Met^[15]。

黄鳊(*Monopterus albus*)是我国重要的名特优

收稿日期: 2018-10-09; 修订日期: 2019-05-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31572626); 2017年湖南省研究生科研创新项目(CX2017B367)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31572626); Postgraduate Research Innovation Project of Hunan in 2017 (CX2017B367)]

作者简介: 胡亚军(1992—), 男, 湖南衡阳人; 博士研究生; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: huyajungowell@163.com

通信作者: 胡毅, 教授, 博士生导师; E-mail: huyi740322@163.com; 钟蕾, 副教授; E-mail: zhonglei-5@163.com

水产品养殖对象。本实验室前期研究表明, 去除皂素、多种凝集素、抗胰蛋白酶等抗营养因子的大豆浓缩蛋白的鱼粉替代效果优于豆粕, 但当替代水平超过60%后, 黄鳝生长性能显著下降^[16]。本试验以大豆浓缩蛋白为主要植物蛋白源, 比较研究在低鱼粉饲料中添加C-Met、E-Met、MHA-Ca及MHA对黄鳝生长及氨基酸代谢的影响, 为蛋氨酸在低鱼粉黄鳝饲料中的合理应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

以鱼粉、大豆浓缩蛋白和玉米蛋白粉为蛋白源, 鱼油为脂肪源。以基础饲料为对照组, 蛋氨酸添加量参照前期研究^[17], 分别向基础饲料中添加有效含量为2 g/kg的晶体蛋氨酸(C-Met, 98%)、包膜蛋氨酸(E-Met, 49%)、蛋氨酸羟基类似物钙(MHA-Ca, 86%)、蛋氨酸羟基类似物(MHA, 88%)。氨基酸产品由安迪苏生命科学制品上海有限公司提供, 饲料配方见表1和表2。在饲料原料粉碎过80目筛后, 按饲料配方称取各原料并混合均匀, 在室温下风干至水分含量低于10%, 再置于-20℃冰箱中保存备用, 投喂前加水调成面团状使用。

1.2 饲养与管理

试验动物来源于洞庭湖区规格整齐的野生黄鳝, 初始体重(30.00±0.45) g。黄鳝入箱饥饿48h后进行驯食, 首先投喂少许1:1的蚯蚓和鲜鱼浆, 并根据摄食情况逐渐增加鲜鱼浆的比例以及投喂量, 直到黄鳝能完全摄食鲜鱼浆, 再添加粉状饲料(鲜鱼浆/试验饲料为4:1), 并依照摄食情况适当增加粉状饲料的比例, 直到黄鳝完全摄食粉状饲料。在驯食结束后, 饥饿24h, 挑选健康、体格均匀的黄鳝, 随机分成5个试验组, 每组设3个重复, 共15个网箱(1.5 m×2.0 m×1.5 m), 每个网箱放养50尾黄鳝。根据黄鳝的摄食习性和减少氨基酸溶失, 试验饲料置于网箱中的水花生上。养殖试验在常德西湖区黄鳝养殖基地中进行, 时间持续10周, 试验期间, 每天投喂1次(17:30—18:30), 投喂量为黄鳝体重的3%—5%, 每7天调整1次投喂量。养殖期间, 水温(28±3.5)℃, 溶氧高于5.0 mg/L, 氨氮低于0.5 mg/L。在饲养结束后, 停食24h后进行采样。

1.3 生长指标

所用黄鳝均在养殖试验前后禁食24h, 称量各网箱黄鳝重量并统计尾数, 在养殖过程中记录黄鳝的摄食量。本试验所测生长指标包括: 成活率(Survival rate, SR)、增重率(Weight gain rate, WGR)、饲料系数(Feed conversion rate, FCR)、蛋白质效率比(Protein

表1 饲料组成及营养水平(干物质, %)

Tab. 1 The diet composition at each nutrition level (dry matter, %)

原料 Ingredient	Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
秘鲁蒸汽鱼粉 Peruvian fish meal	22	22	22	22	22
虾壳粉 Shrimp head meal	3	3	3	3	3
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	5	5	5	5	5
大豆浓缩蛋白Soy protein concentrate	30	30	30	30	30
次粉Wheat middling	3.06	3.056	2.852	3.027	3.033
面粉Wheat meal	5	5	5	5	5
α-淀粉α-starch	20	20	20	20	20
啤酒酵母 Brewer yeast	5	5	5	5	5
鱼油Fish oil	3	3	3	3	3
氯化胆碱(50%) Choline chloride (50%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
晶体蛋氨酸 Crystalline methionine		0.204			
包膜蛋氨酸 Encapsulated methionine			0.408		
蛋氨酸羟基类似物钙 MHA-Ca				0.233	
蛋氨酸羟基类似物 MHA					0.227
赖氨酸Lysine	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
谷氨酸Glutamate	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
预混料Vitamin and Mineral premix	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
抗氧化剂Antioxidants	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
防霉剂Mold inhibitor	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
总计Total	100	100	100	100	100
营养分析Proximate analysis (%)					
干物质Dry matter	90.3	89.2	89.9	89.4	90.1
粗蛋白Crude protein	43.22	42.94	43.11	43.79	44.08
粗脂肪Crude lipid	6.22	6.13	6.13	6.44	6.29
粗灰分Crude ash	10.11	9.97	9.82	10.01	9.86

注: *预混料由青岛玛斯特生物技术有限公司提供, 成分(mg/kg)为: KCl, 200 mg; KI (1%), 60 mg; CoCl₂·6H₂O (1%), 50 mg; CuSO₄·5H₂O, 30 mg; FeSO₄·H₂O, 400 mg; ZnSO₄·H₂O, 400 mg; MnSO₄·H₂O, 150 mg; Na₂SeO₃·5H₂O (1%), 65 mg; MgSO₄·H₂O, 2 000 mg; 沸石粉, 3 645.85 mg; VB₁, 12 mg; 核黄素, 12 mg; VB₆ (盐酸吡哆醇), 8 mg; VB₁₂, 0.05 mg; VK₃, 8 mg; 肌醇, 100 mg; 泛酸钙(VB₃), 40 mg; 烟酸, 50 mg; 叶酸, 5 mg; 生物素, 0.8 mg; VA, 25 mg; VD₃, 5 mg; VE, 50 mg; VC 100 mg; 乙氧基喹啉, 150 mg; 小麦粉, 2434.15 mg

Note: *Provided by MGOTer Bio-Tech Co.Ltd (Qingdao, Shandong, China), Premix composition (mg/kg diet): KCl, 200 mg; KI (1%), 60 mg; CoCl₂·6H₂O (1%), 50 mg; CuSO₄·5H₂O, 30 mg; FeSO₄·H₂O, 400 mg; ZnSO₄·H₂O, 400 mg; MnSO₄·H₂O, 150 mg; Na₂SeO₃·5H₂O (1%), 65 mg; MgSO₄·H₂O, 2000 mg; Zeolite power, 3645.85 mg; VB₁, 12 mg; Riboflavin, 12 mg; VB₆, 8 mg; VB₁₂, 0.05 mg; VK₃, 8 mg; Inositol, 100 mg; Pantothenic acid, 40 mg; Niacin acid, 50 mg; Folic acid, 5 mg; Biotin, 0.8 mg; VA, 25 mg; VD₃, 5 mg; VE, 50 mg; VC, 100 mg; Ethoxyquin, 150 mg; Wheat meal, 2434.15 mg

表 2 试验饲料中氨基酸含量

Tab. 2 The contents of amino acids of the experimental diets (g/kg)

氨基酸Amino acid	Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
Asp	36.704	35.787	36.844	38.204	37.724
Thr [☆]	16.721	16.381	17.221	15.983	16.351
Ser	18.433	17.467	15.498	16.723	18.553
Glu	69.157	67.829	59.887	65.833	62.864
Gly	20.403	20.314	21.096	19.573	22.822
Ala	22.610	24.517	22.165	23.339	23.621
Cys	2.029	1.824	1.702	2.013	1.938
Val [☆]	17.697	16.273	17.524	16.778	18.685
Met [☆]	4.291	6.336	6.281	6.194	6.187
Ile [☆]	17.475	16.468	16.382	15.778	17.433
Leu [☆]	32.926	30.516	29.998	28.325	33.556
Tyr	9.013	10.551	10.770	8.369	9.305
Phe [☆]	17.601	19.564	18.649	19.911	16.625
Lys [☆]	26.956	26.262	26.357	26.257	27.903
His [☆]	10.108	10.468	10.778	9.449	10.846
Arg [☆]	22.516	23.803	22.801	23.228	21.953
Pro	26.976	24.408	25.337	25.839	26.575
Trp [☆]	/	/	/	/	/

注: ☆为必需氨基酸, Trp (色氨酸)未检测
Note: ☆ for essential amino acids, Trp not detected

efficiency ratio, *PER*); 每箱随机取5尾黄鳝, 称量肝重和体重、测量体长, 在解剖后, 分离内脏及肝脏, 称量肝脏重、空壳重。体型指标包括: 肝脏指数 (Hepatosomatic index, *HSI*)、肥满度 (Condition factor, *CF*) 和内脏指数 (Viscerosomatic index, *VSI*)。

计算方法如下:

$$\begin{aligned} SR (\%) &= 100\% \times N_t / N_0 \\ WGR (\%) &= 100\% (W_2 - W_1) / W_1 \\ FCR &= W_0 / (W_2 - W_1) \\ PER &= 100 \times (W_2 - W_1) / (W_0 \times P) \\ HSI &= 100 \times W_5 / W_3 \\ VSI &= 100 \times (W_3 - W_4) / W_3 \\ CF (g/m^3) &= W_3 / L^3 \end{aligned}$$

式中: N_t 为试验鱼结束尾数, N_0 为试验鱼初始尾数, P 为试验饲料蛋白质含量, W_0 为试验鱼平均摄食饲料干物质量(g), W_1 为试验鱼初均重(g), W_2 为试验鱼末均重 (g), W_3 为试验结束时鱼体重(g), W_4 为试验结束时鱼空壳重(g), W_5 为试验结束时鱼肝脏重(g), L 为试验结束时鱼体长(cm)。

1.4 饲料氨基酸含量测定、饲料及全鱼常规营养成分分析

饲料水解氨基酸含量测定: 参照国标(GB/5009.

124-2003)食品中氨基酸的测定方法。将待测饲料样品干燥, 取100 mg样品置于水解管, 加入5 mL 6 mg/L 的盐酸, 封住水解管管口, 在110℃恒温下干燥水解22h, 取出冷却, 打开水解管, 将水溶液过滤, 定容至100 mL, 取1 mL稀释至10 mL, 取样上机分析(氨基酸自动分析仪, A300, 德国)。

常规营养成分测定: 取待测饲料样品和全鱼(每个网箱中随机选取5尾黄鳝), 水分: 105℃常压干燥法(GB/T5009.3-1985), 粗蛋白: 凯氏定氮法(GB/T5009.5-1985), 粗脂肪: 乙醚萃取法(GB/T5009.6-1985), 粗灰分: 550℃高温灰化法(GB/T5009.4-1985)。

1.5 血清部分生化指标测定

在养殖试验结束, 每箱随机取6尾鱼尾静脉采血, 每箱随机采血6尾, 血液随机混合于2 mL无菌离心管中, 4℃静置12h后, 4000 r/min离心10min, 取上层血清混合后于-80℃冰箱保存备用。高密度脂蛋白胆固醇(High-density lipoprotein cholestero, HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(Low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、总胆汁酸(Total bile acid, TBA)、甘油三酯(Triglyceride, TG)、总胆固醇(Total cholesterol, TC)、总蛋白(Total protein, TP)、谷草转氨酶(Glutamic oxalacetic transaminase, GOT)、谷丙转氨酶(Glutamate pyruvic transa, GPT)、尿素氮(Blood urea nitrogen, BUN)以及血氨(Serum ammonia, Amon)采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定, 血糖(Glucose, Glu)采用浙江伊利康生物技术有限公司试剂盒测定。

血清游离氨基酸含量测定: 分别对黄鳝摄食0、3h、6h、9h、12h、24h进行尾静脉取血, 取血方式和处理方式同上。取200 μL血清于1.5 mL离心管中, 并加入等体积8%磺基水杨酸, 充分混匀, 4℃沉淀过夜。取出离心管, 在4℃条件下, 10000 r/min离心10min。将上清液吸出, 经0.22 μm滤膜过滤, 取样上机分析(氨基酸自动分析仪, A300, 德国)。

1.6 肠道消化酶活性测定

每箱随机取5尾黄鳝, 解剖, 取整个肠道, 去除内容物, 并用冰生理盐水清洗肠道, 滤纸吸干, 称重、剪碎并匀浆, 4℃ 3000 r/min离心10min, 取上清液, 于24h内分析。肠道淀粉酶(Amylase, AMS)、脂肪酶(Lipase, LPS)和胃蛋白酶(Trypsin, TRYP)采用南京建成生物研究所试剂盒测定。

1.7 肌肉质构参数分析

每箱选取5尾黄鳝, 取背部肌肉(0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm), 采用质构仪(TMS-PRO, FTC, USA)测硬度(Hardness)、胶黏性(Gumminess)、咀嚼性(Chewiness)、黏附性(Adhesiveness)、内聚性(Cohesive-

ness)及弹性(Springiness)。测试速度为30 mm/min,接触力为0.1 N,形变量为60%。

1.8 数据处理与分析

试验数据使用Microsoft office Excel 2016软件进行初步计算,然后采用SPSS (22.0版本)统计软件进行单因素方差分析,当差异显著时($P<0.05$),采用Duncan's进行多重检验,分析结果用平均值 $\pm$ 标准误(Mean $\pm$ SE)表示。

2 结果

2.1 不同形式蛋氨酸对黄鳝生长性能的影响

由表 3可知,与对照组相比,在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸均能提高黄鳝增重率和蛋白质效率比,降低饲料系数,且MHA-Ca和MHA组比对照组差异显著($P<0.05$);添加蛋氨酸组黄鳝肝体比均呈下降趋势,且C-Met、MHA-Ca和MHA组比对照组差异显著($P<0.05$);添加E-Met和MHA-Ca黄鳝脏体比显著提高($P<0.05$),各组间黄鳝肥满度无显著性差异($P>0.05$)。

2.2 不同形式蛋氨酸对黄鳝肠道消化酶活力的影响

由表 4可知,与对照组相比,在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸均显著提高了肠道胰蛋白酶活力($P<0.05$);添加E-Met、MHA-Ca和MHA显著提高了肠道淀粉酶活力($P<0.05$);添加MHA-Ca显著提高了脂肪酶活力($P<0.05$),但添加C-Met脂肪酶活力显著下降

($P<0.05$)。

2.3 不同形式蛋氨酸对黄鳝血清部分生化指标的影响

由表 5可知,与对照组相比,添加蛋氨酸均显著提高了黄鳝血清胆汁酸、总胆固醇、总蛋白、尿素氮和血氨含量($P<0.05$);E-Met、MHA-Ca和MHA组血清葡萄糖和高密度脂蛋白胆固醇含量显著升高($P<0.05$),而谷草转氨酶活力显著下降($P<0.05$);E-Met与MHA-Ca组血清低密度脂蛋白胆固醇含量显著上升($P<0.05$)。

2.4 不同形式蛋氨酸对黄鳝肝脏转氨酶活力的影响

由表 6可知,与对照组相比,E-Met、MHA-Ca和MHA组肝脏GOT活力均显著提高($P<0.05$),C-Met组肝脏GOT活力显著降低;C-Met、E-Met和MHA-Ca组肝脏GPT活力均显著提高($P<0.05$)。

2.5 不同形式蛋氨酸对黄鳝肌肉质构参数的影响

由表 7可知,与对照组相比,在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸均显著提高了肌肉黏附性和胶黏性($P<0.05$),但对内聚性无显著影响($P>0.05$);添加E-Met、MHA-Ca和MHA显著提高了肌肉硬度、弹性和咀嚼性($P<0.05$)。

2.6 不同形式蛋氨酸对黄鳝全鱼体成分的影响

由表 8可知,与对照组相比,在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸对黄鳝全鱼水分和粗脂肪含量均无显著性影响($P>0.05$);添加C-Met、MHA-Ca和MHA均

表 3 不同形式蛋氨酸对黄鳝生长性能的影响(平均值 $\pm$ 标准误, $n=6$)

Tab. 3 Effects of dietary methionine on growth performance of *Monopterus albus* (Mean $\pm$ SE, $n=6$)

指标Index	Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
初均重IMW (g)	30.44 $\pm$ 0.01	30.11 $\pm$ 0.23	29.97 $\pm$ 0.04	30.12 $\pm$ 0.04	30.03 $\pm$ 0.01
末均重FMW (g)	57.80 $\pm$ 3.40 ^a	60.78 $\pm$ 0.09 ^{ab}	61.41 $\pm$ 1.14 ^{ab}	64.44 $\pm$ 0.98 ^b	66.78 $\pm$ 2.13 ^b
成活率SR (%)	97.23 $\pm$ 1.11	95.45 $\pm$ 5.10	92.00 $\pm$ 4.46	99.15 $\pm$ 1.24	95.56 $\pm$ 3.78
增重率WGR (%)	92.67 $\pm$ 11.35 ^a	102.59 $\pm$ 0.34 ^{ab}	104.93 $\pm$ 4.09 ^{ab}	113.99 $\pm$ 3.54 ^b	122.40 $\pm$ 7.19 ^b
饲料系数FCR	2.36 $\pm$ 0.32 ^b	2.12 $\pm$ 0.05 ^{ab}	2.10 $\pm$ 0.04 ^{ab}	1.86 $\pm$ 0.05 ^a	1.78 $\pm$ 0.08 ^a
蛋白质效率比PER	0.84 $\pm$ 0.17 ^a	1.04 $\pm$ 0.06 ^{ab}	1.15 $\pm$ 0.04 ^{ab}	1.18 $\pm$ 0.05 ^b	1.20 $\pm$ 0.09 ^b
肝体比HSI	7.92 $\pm$ 0.09 ^c	7.23 $\pm$ 0.26 ^{ab}	7.75 $\pm$ 0.23 ^{bc}	6.76 $\pm$ 0.17 ^a	7.09 $\pm$ 0.15 ^a
脏体比VSI	17.96 $\pm$ 0.37 ^a	18.60 $\pm$ 0.08 ^{ab}	20.78 $\pm$ 0.47 ^b	19.02 $\pm$ 0.08 ^b	18.06 $\pm$ 0.29 ^{ab}
肥满度CF ($\times 10^4$ g/m ³)	9.25 $\pm$ 0.09	9.04 $\pm$ 0.06	10.39 $\pm$ 0.20	10.31 $\pm$ 0.27	9.52 $\pm$ 0.09

注:同行数据肩标字母不同代表差异显著($P<0.05$),下同

Note: Values in each row without a common superscript represent significant differences ($P<0.05$). The same applies bellow

表 4 不同形式蛋氨酸对黄鳝肠道消化酶活力的影响(平均值 $\pm$ 标准误, $n=9$, U/mg prot)

Tab. 4 Effects of dietary methionine on the activities of intestinal digestive enzymes on *Monopterus albus* (Mean $\pm$ SE, $n=9$, U/mg prot)

消化酶Digestive enzyme	对照Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
淀粉酶Amylase	15.58 $\pm$ 2.47 ^a	18.93 $\pm$ 0.31 ^{ab}	20.24 $\pm$ 0.32 ^b	31.23 $\pm$ 1.76 ^c	22.26 $\pm$ 0.39 ^b
脂肪酶Lipase	0.68 $\pm$ 0.07 ^b	0.47 $\pm$ 0.02 ^a	0.66 $\pm$ 0.04 ^b	0.86 $\pm$ 0.01 ^c	0.57 $\pm$ 0.08 ^{ab}
胃蛋白酶Trypsin	1.92 $\pm$ 0.07 ^a	3.24 $\pm$ 0.26 ^b	3.11 $\pm$ 0.17 ^b	3.43 $\pm$ 0.22 ^b	3.08 $\pm$ 0.22 ^b

显著提高了全鱼粗蛋白含量($P<0.05$), 添加E-Met显著提高了全鱼灰分含量($P<0.05$), 而添加C-Met和MHA-Ca显著降低了全鱼灰分含量($P<0.05$)。

2.7 不同形式蛋氨酸对黄鳝血清游离氨基酸含量的影响

由图 1 可知, 对照组在摄食6h后, 血清出现总必需氨基酸吸收峰值, 但蛋氨酸吸收未出现明显峰值, 且趋势较平稳。C-Met与MHA-Ca组均在摄食9h后出现蛋氨酸和总必需氨基酸吸收峰值。E-Met组在摄食3h后血清出现总必需氨基酸吸收峰值, 摄食12h后出现血清蛋氨酸峰值。MHA组在摄食3h后出现血清蛋氨酸和总必需氨基酸吸收峰值, 摄食9h后再次出现蛋氨酸峰值。

3 讨论

3.1 不同形式蛋氨酸对黄鳝生长性能的影响

本试验结果显示, 在低鱼粉饲料中添加MHA-Ca和MHA促黄鳝生长效果显著, 但添加C-Met效

果不显著, 这与在建鲤(*Cyprinus carpio* var. Jian)^[15]和凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[18, 19]上的研究结果类似。其原因可能是C-Met在肠道中被快速吸收, 蛋白质态的结合氨基酸需经过水解后才能被利用, 导致氨基酸吸收不同步。通过分析黄鳝血清游离氨基酸发现, E-Met组蛋氨酸吸收峰值比C-Met组有所延长, 其原因是E-Met需先分解包膜, 使Met逐渐被肠道吸收, 具有一定缓释效果, 但与C-Met类似, 其促生长效果不显著, 这与在建鲤(*Cyprinus carpio* var. Jian)^[15]上的结果不同, 可能是不同鱼类对E-Met利用存在种属间差异, 具体原因有待深入研究。MHA组总必需氨基酸和蛋氨酸吸收峰值比C-Met组提前, 且仍再次出现蛋氨酸吸收峰值, 这可能是由于L-蛋氨酸通过Na⁺载体被肠道吸收^[20], 而MHA通过H⁺非立体专一性转运系统被转运^[21], 且MHA具有较强的酸性, 能自身提供H⁺, 故较容易被黄鳝肠道吸收, 并在机体中再次转化为L-蛋氨酸参与代谢^[22]。MHA-Ca与C-Met组蛋氨

表 5 不同形式蛋氨酸对黄鳝血清部分生化指标的影响(平均值±标准误, $n=9$)

Tab. 5 Effects of dietary methionine on serum biochemical indexes of *Monopterus albus* (Mean±SE, $n=9$)

指标Index	对照Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
葡萄糖Glu (mmol/L)	2.93±0.17 ^a	3.25±0.04 ^a	3.86±0.26 ^b	3.93±0.06 ^b	5.05±0.08 ^c
高密度脂蛋白HDL (mmol/L)	1.51±0.12 ^a	1.7±0.04 ^{ab}	2.24±0.05 ^c	2.29±0.07 ^c	1.88±0.11 ^b
低密度脂蛋白LDL (mmol/L)	1.42±0.07 ^a	1.56±0.03 ^{ab}	1.69±0.03 ^b	1.75±0.11 ^b	1.42±0.06 ^a
胆汁酸TBA (μmol/L)	0.27±0.23 ^a	0.34±0.01 ^b	0.61±0.01 ^c	0.52±0.01 ^d	0.39±0.01 ^c
甘油三酯TG (mmol/L)	1.09±0.16	1.1±0.03	1.3±0.15	1.33±0.03	1.03±0.09
总胆固醇TC (mmol/L)	3.57±0.13 ^a	4.74±0.1 ^d	4.31±0.08 ^c	4.2±0.07 ^c	3.88±0.13 ^b
总蛋白TP (mg/L)	27.97±0.45 ^a	33.42±1.63 ^b	37.58±0.61 ^c	47.48±2.5 ^c	43.13±0.56 ^d
谷草转氨酶GOT (U/L)	8.76±0.92 ^b	7.08±0.83 ^b	2.48±0.44 ^a	4.58±0.84 ^a	2.84±0.37 ^a
谷丙转氨酶GPT (U/L)	1.92±0.18 ^{ab}	1.87±0.19 ^{ab}	1.37±0.37 ^a	3.76±1.44 ^b	2.73±0.16 ^{ab}
尿素氮UN (mmol/L)	1.51±0.04 ^a	2.42±0.09 ^b	2.67±0.06 ^c	2.42±0.07 ^b	2.49±0.06 ^b
血氨Amon (μmol/L)	123.74±0.88 ^a	180.57±2.94 ^c	185.33±2.34 ^c	171.65±1.18 ^b	169.18±2.75 ^b

表 6 不同形式蛋氨酸对黄鳝肝脏转氨酶活力的影响(平均值±标准误, $n=9$, U/g prot)

Tab. 6 Effects of dietary methionine on the activities of hepatosomatic aminotransferases on *Monopterus albus* (Mean±SE, $n=9$, U/g prot)

转氨酶Hepatosomatic aminotransferase	Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
谷草转氨酶GOT	8.97±0.25 ^b	7.11±0.18 ^a	13.97±0.91 ^d	10.87±0.51 ^c	12.56±0.26 ^d
谷丙转氨酶GPT	15.52±1.26 ^a	19.15±0.36 ^b	25.22±0.42 ^d	22.42±0.39 ^c	16.18±0.47 ^a

表 7 不同形式蛋氨酸对黄鳝肌肉质构参数的影响(平均值±标准误, $n=15$)

Tab. 7 Effects of dietary methionine on muscle texture of *Monopterus albus* (Mean±SE, $n=15$)

参数Parameter	对照Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
硬度Hardness (N)	1.79±0.07 ^a	1.89±0.10 ^a	2.98±0.18 ^c	2.63±0.05 ^b	2.55±0.02 ^b
黏附性Adhesiveness (N.mm)	0.01±0.00 ^a	0.08±0.01 ^b	0.1±0.01 ^c	0.08±0.01 ^b	0.09±0.00 ^{bc}
内聚性Cohesiveness (%)	0.67±0.03	0.67±0.03	0.63±0.03	0.70±0.00	0.70±0.00
弹性Springiness (mm)	1.03±0.05 ^a	1.04±0.06 ^a	1.81±0.10 ^c	1.72±0.10 ^c	1.47±0.03 ^b
胶黏性Gumminess (N)	3.11±0.16 ^a	4.21±0.21 ^b	7.36±0.02 ^d	7.07±0.04 ^d	5.79±0.33 ^c
咀嚼性Chewiness (mJ)	3.17±0.29 ^a	4.33±0.07 ^a	13.33±0.79 ^c	12.20±0.76 ^c	8.53±0.47 ^b

表 8 不同形式蛋氨酸对黄鳝全鱼体成分的影响(平均值±标准误, n=9, %)

Tab. 8 Effects of dietary methionine on the composition of whole body of *Monopterus albus* (Mean±SE, n=9, %)

成分Composition	对照Control	C-Met	E-Met	MHA-Ca	MHA
水分Moisture	74.3±0.22	74.33±0.38	73.56±0.27	72.71±0.3	72.18±0.65
粗蛋白Crude protein	3.44±0.11 ^a	4.25±0.03 ^{bc}	3.82±0.04 ^{ab}	4.86±0.08 ^d	4.66±0.32 ^{cd}
粗脂肪Crude lipid	17.31±0.05	17.71±0.05	18.55±0.11	18.33±0.18	18.01±0.04
灰分Ash	2.92±0.06 ^b	2.66±0.01 ^a	3.12±0.09 ^c	2.73±0.04 ^a	2.92±0.04 ^b

酸和总必需氨基酸吸收时间虽类似,但MHA-Ca需先经过分离出Ca²⁺,然后转化为L-蛋氨酸参与机体代谢^[23]。MHA-Ca和MHA促黄鳝生长的原因可能是:(1)MHA-Ca和MHA转化为L-蛋氨酸被机体利用的过程相对C-Met具有一定的缓释效果,使机体氨基酸含量达到动态平衡,从而显著提高黄鳝生长,且MHA具有较强的酸性,有利于食糜在胃中消化;(2)MHA-Ca和MHA不但具有抗氧化能力,并且参与机体多胺(包括腐胺、亚精胺和精胺等)合成,多胺可调控细胞间的信号转导、机体遗传物质转录及蛋白质翻译^[24],调节肠道稳态,改善肠道形态结构等^[25,26]。

本试验所添加蛋氨酸均不同程度提高了黄鳝肠道消化酶活力,其中胃蛋白酶活力差异显著,且MHA-Ca效果最佳,这与在花鲈上的研究结果类似^[27],与此同时,黄鳝全鱼粗蛋白含量与肠道胃蛋白酶活力变化趋势一致,这与在罗非鱼(*Oreochromis nilo-*

ticus × *O. aureus*)^[2]上研究结果类似,可能是由于黄鳝与罗非鱼均具有明显的胃^[2,28],食糜在胃中储存并消化,再蠕动至肠道,使氨基酸吸收不同步问题得到一定程度缓解。本试验MHA-Ca组肠道脂肪酶活力虽显著提高了,但对全鱼粗脂肪含量均无显著性影响,这与在建鲤上的研究结果类似^[15],可能是MHA-Ca并不影响黄鳝脂肪沉积,但对肉食性的黄鳝而言,有利于食糜消化和蛋白质沉积^[29]。

3.2 不同形式蛋氨酸对黄鳝血清和肝脏生化指标的影响

葡萄糖是机体代谢的直接能量来源,血糖能反映机体生理状况和代谢能力,本试验添加E-Met、MHA-Ca和MHA血清葡萄糖含量均比对照组显著升高,这与在黄颡鱼^[7]和虹鳟^[30]上的研究结果类似,合理添加蛋氨酸有利于提高鱼类对葡萄糖的吸收和转运,减少因蛋白质供能带来的消耗。血清总胆固醇是机体代谢的重要脂类物质,胆汁酸能乳化脂肪颗粒,脂蛋白由脂蛋白载体和脂质结合形成,是脂类物质在体内的一种运输方式,高密度胆固醇脂蛋白是肝脏外组织中的胆固醇运送至肝脏的载体,低密度胆固醇脂蛋白是肝脏中的胆固醇转运至其他组织的载体,可反映出机体脂质代谢状况。与对照组相比,本试验所添加蛋氨酸均显著提高了黄鳝血清总胆固醇和胆汁酸含量,这与在凡纳滨对虾^[18]上的研究结果类似。与此同时,本试验E-Met、MHA-Ca和MHA组高密度脂蛋白胆固醇含量相比对照组显著升高,且E-Met与MHA-Ca组血清低密度脂蛋白胆固醇含量显著上升,与在凡纳滨对虾上的研究结果不同^[18]。蛋氨酸可能提高了黄鳝脂肪代谢能力,增强机体对脂质的吸收,并有助于肝脏中胆固醇排出,从而减少脂肪在肝脏中蓄积^[30],导致黄鳝肝体比下降。

氨基酸主要通过合成蛋白质参与生命活动,多余的氨基酸则主要分解为氨和碳骨架,氨进一步代谢为尿素氮^[31],本试验所添加蛋氨酸均显著提高了黄鳝血清总蛋白、尿素氮和血氨含量,可能是蛋氨酸的添加,机体蛋白质合成效率提高,多余氨基酸则被分解。在正常状态下,肝脏GPT活力升高表明氨基酸代谢旺盛,合成代谢加快,蛋白质分解能力

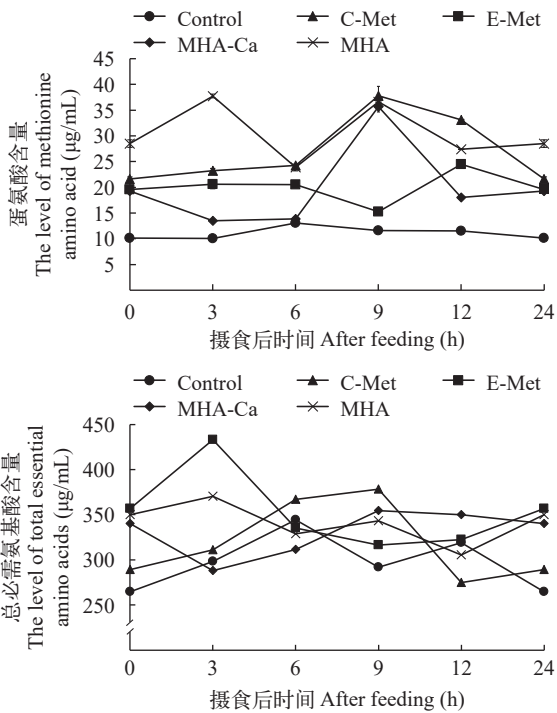


图 1 黄鳝摄食不同时间点血清蛋氨酸和总必需氨基酸吸收图
Fig. 1 Absorption map of methionine and serum essential amino acids at different time points of *Monopterus albus*

下降; 肝脏GOT活性升高, 表明机体多余的氨基酸生成尿素氮的过程加快。当肝细胞受损, 转氨酶会大量进入到血液中, 故而血清中转氨酶含量能反映肝脏健康状况。与对照组相比, 本试验E-Met、MHA-Ca和MHA组肝脏GOT活力均显著提高, C-Met组GOT活力显著降低, 且C-Met、E-Met和MHA-Ca组肝脏GPT活力均显著提高, 这与在幼建鲤^[21]上的研究结果类似; 与此同时, E-Met、MHA-Ca和MHA组血清GOT活力均比对照组显著下降, 这与在花鲢^[27]和建鲤^[32]上的研究结果类似。其原因可能是: (1) 所添加蛋氨酸与机体蛋白质态氨基酸吸收同步有利于肝脏健康, 提高机体氨基酸代谢效率, 进而提高蛋白质合成效率^[30]; (2) MHA-Ca和MHA不但能促进无机氮代谢, 并且由于没有氨基, 在代谢过程中不会发生脱氨基反应, 有利于减少有害无机氮在机体蓄积。

3.3 不同形式蛋氨酸对黄鳝肌肉质构参数的影响

硬度、胶黏性、咀嚼性、黏附性、内聚性及弹性等是用来评价肌肉质构的物理性指标^[33], 硬度越大, 其抵抗牙齿咬力的能力越大, 弹性也越大, 胶黏性用来描述评价力作用下物体流动性参数, 咀嚼性由硬度、内聚性和弹性相乘所得^[34]。研究表明, 在高植物蛋白替代鱼粉后, 建鲤肌肉硬度、弹性、咀嚼性和胶黏性等肌肉质构参数显著下降^[35]。本试验结果表明, 在低鱼粉饲料中添加蛋氨酸可提高肌肉黏附性和胶黏性, 其中, E-Met、MHA-Ca和MHA可显著提高肌肉硬度、弹性和咀嚼性, 其原因可能与氨基酸平衡且同步吸收有利于蛋白质合成, 提高肌肉发育有关; 另一方面, 本试验为解决饲料中等氮问题, 各处理组均加入了一定量的谷氨酸, 且E-Met、MHA-Ca和MHA组饲料中谷氨酸含量实测值比对照组更低, 肌肉硬度、弹性和咀嚼性仍显著高于对照组, 而谷氨酸可显著提高草鱼肌肉硬度、弹性、咀嚼性和胶黏性^[36], 由此可推测, 蛋氨酸比谷氨酸对提高肌肉质构效果更佳, 原因可能是蛋氨酸中的巯基对肌肉发育起了一定的作用^[37], 具体原因有待进一步研究。

4 结论

在低鱼粉饲料中添加C-Met、E-Met、MHA-Ca及MHA均有提高黄鳝代谢、促进生长的趋势, 其中MHA与MHA-Ca效果显著, 且MHA效果最佳。

参考文献:

- [1] Chen J, Li X, Xu H, *et al.* Substitute of soy protein concentrate for fish meal in diets of white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone) [J]. *Aquaculture International*, 2017, **25**(3): 1303—1315
- [2] Leng X J, Tian J, Chen B A, *et al.* Comparison study on utilizing crystalline or coated methionine by tilapia (*Oreochromis niloticus*×*O. aureus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(2): 235—242 [冷向军, 田娟, 陈丙爱, 等. 罗非鱼对晶体蛋氨酸、包膜蛋氨酸利用的比较研究. 水生生物学报, 2013, **37**(2): 235—242]
- [3] Chi S Y. Effects of supplementation microcapsule or crystalline methionine in diets with low fish meal on growth performance, of cobia (*Rachycentron canadum*) and Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [D]. Qingdao: Ocean University of China. 2009 [迟淑艳. 低鱼粉饲料中添加微胶囊蛋氨酸或晶体蛋氨酸对军曹鱼和凡纳滨对虾生长性能的影响. 青岛: 中国海洋大学. 2009]
- [4] Belghit I, Skiba-Cassy S, Geurden I, *et al.* Dietary methionine availability affects the main factors involved in muscle protein turnover in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *British Journal of Nutrition*, 2014, **112**(4): 493—503
- [5] Facanha F N, Oliveira-Neto A R, Figueiredo-Silva C, *et al.* Effect of shrimp stocking density and graded levels of dietary methionine over the growth performance of *Litopenaeus vannamei* reared in a green-water system [J]. *Aquaculture*, 2016, **463**: 16—21
- [6] Jia P, X M, Zhu X, *et al.* Effects of dietary methionine levels on the growth performance of juvenile gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(2): 217—226 [贾鹏, 薛敏, 朱选, 等. 饲料蛋氨酸水平对异育银鲫幼鱼生长性能影响的研究. 水生生物学报, 2013, **37**(2): 217—226]
- [7] 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
- [8] Chen B A, Leng X J, Li X Q, *et al.* Study on the effect of crystalline or coated amino acids for *Cyprinus carpio* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(5): 774—778 [陈丙爱, 冷向军, 李小勤, 等. 晶体或包膜氨基酸对鲤鱼的作用效果研究. 水生生物学报, 2008, **32**(5): 774—778]
- [9] Alam M S, Teshima S, Koshio S, *et al.* Supplemental effects of coated methionine and/or lysine to soy protein isolate diet for juvenile kuruma shrimp, *Marsupenaeus japonicus* [J]. *Aquaculture*, 2005, **248**(1—4): 13—19
- [10] Yuan Y, Gong S, Yang H, *et al.* Effects of supplementation of crystalline or coated lysine and/or methionine on growth performance and feed utilization of the Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus* [J]. *Aquaculture*, 2011, **316**(1—4): 31—36
- [11] Zhang Y Q, Ji W X, Wu Y B, *et al.* Effects of crystalline and capsulated DL-methionine on fish meal replacement with soybean meal in diets for Japanese seabass *Lateolabrax japonicus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, **39**(2): 224—232 [张艳秋, 纪文秀, 吴玉波, 等. 添加晶体或包膜DL-蛋氨酸对利用豆粕替代花鲈饲料中鱼粉的影响]

- 影响. 水产学报, 2015, **39**(2): 224—232]
- [12] Leng X J, Li X Q, Chen B A, *et al.* Recent advance of utilizing crystalline amino acids by fish [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, **33**(1): 119—123 [冷向军, 李小勤, 陈丙爱, 等. 鱼类对晶体氨基酸利用的研究进展. 水生生物学报, 2009, **33**(1): 119—123]
- [13] Leng X J, Wang G, Li X Q, *et al.* Supplemental effects of crystalline or coated amino acids on growth performance and serum free amino acids of allogynogenetic crucian carp [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2007, **31**(6): 743—748 [冷向军, 王冠, 李小勤, 等. 饲料中添加晶体或包膜氨基酸对异育银鲫生长和血清游离氨基酸水平的影响. 水产学报, 2007, **31**(6): 743—748]
- [14] Liu Y J, Tian L X, Liu D H, *et al.* Influence of practical diet supplementation with free or coated lysine on the growth, plasma free amino acids and protein synthesis rates in the muscle of *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, **26**(3): 252—258 [刘永坚, 田丽霞, 刘栋辉, 等. 实用饲料补充结晶或包膜赖氨酸对草鱼生长、血清游离氨基酸和肌肉蛋白质合成率的影响. 水产学报, 2002, **26**(3): 252—258]
- [15] Shan L L, Li X Q, Zheng X M, *et al.* Effects of different forms of dietary methionine on the growth and free amino acids in serum of jian carp [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, **39**(2): 259—266 [单玲玲, 李小勤, 郑小森, 等. 不同形式蛋氨酸对建鲤生长性能及血清游离氨基酸含量的影响. 水生生物学报, 2015, **39**(2): 259—266]
- [16] Zhang J Z, Liu Z P, Tian Q Q, *et al.* Effects of different replacement ratio of fish meal by soybean protein concentrate on growth, digestive enzymes activities and partial hematology indices of rice filed eel (*Monopterus albus*) [C]. 2014 Annual Meeting of the Chinese Fisheries Society, Hunan Changsha China. 2014 [张俊智, 刘庄鹏, 田芊芊, 等. 不同比例大豆浓缩蛋白替代鱼粉对黄鳝生长、消化酶及部分血液学指标的影响. 2014年中国水产学会学术年会, 中国湖南长沙. 2014]
- [17] Zhang J Z, Lü F, Huan Z L, *et al.* Effects of fish meal replacement by different proportions of dextruded soybean meal on growth performance, body composition, intestinal digestive enzyme activities and serum biochemical indices of rice filed eel (*Monopterus albus*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, **27**(11): 3567—3576 [张俊智, 吕富, 郇志利, 等. 膨化豆粕替代不同比例鱼粉对黄鳝生长性能、体成分、肠道消化酶活力及血清生化指标的影响. 动物营养学报, 2015, **27**(11): 3567—3576]
- [18] Huang W W, Huo Y W, Wang M Q, *et al.* A comparative study of feeding effects of crystalline methionine and methionine hydroxy analogue calcium supplemented in low fish meal diets for pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, **27**(6): 1722—1732 [黄文文, 霍雅文, 王猛强, 等. 低鱼粉饲料中补充晶体蛋氨酸和羟基蛋氨酸钙在凡纳滨对虾上饲喂效果的比较研究. 动物营养学报, 2015, **27**(6): 1722—1732]
- [19] Chen J, Li X, Huan D, *et al.* Comparative study on the utilization of crystalline methionine and methionine hydroxy analogue calcium by Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei* Boone) [J]. *Aquaculture Research*, 2018, **49**(9): 3088—3096
- [20] Duka A, Ahearn G A. l-leucine, l-methionine, and l-phenylalanine share a Na^+/K^+ -dependent amino acid transporter in shrimp hepatopancreas [J]. *Journal of Comparative Physiology B*, 2013, **183**(6): 763—771
- [21] Xiao W W, Feng L, Liu Y, *et al.* Effects of dietary methionine hydroxy analogue supplement on growth, protein deposition and intestinal enzymes activities of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, **17**(4): 408—417
- [22] Pan F, Wu P, Feng L, *et al.* Methionine hydroxy analogue improves intestinal immunological and physical barrier function in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, **64**: 122—136
- [23] Powell C D, Chowdhury M A K, Bureau D P. Assessing the bioavailability of L-methionine and a methionine hydroxy analogue (MHA-Ca) compared to DL-methionine in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(1): 332—346
- [24] Thomas T, Thomas T J. Polyamines in cell growth and cell death: molecular mechanisms and therapeutic applications [J]. *Cellular & Molecular Life Sciences Cmls*, 2001, **58**(2): 244—258
- [25] Fang T T, Liu G M, Jia G, *et al.* Polyamines: Regulation on intestinal homeostasis and possible mechanisms [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(11): 3400—3407 [方婷婷, 刘光芒, 贾刚, 等. 多胺对动物肠道稳态的调控作用及可能机制. 动物营养学报, 2016, **28**(11): 3400—3407]
- [26] Kuang S, Xiao 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
- [27] 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 [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. 水产学报, 2017, **41**(12): 1908—1918]
- [28] Zeng D, Ye Y T, Su P. Study on histology of the stomach and intestine of the swamp eel *Monopterus albus* [J]. *Fisheries Science & Technology Information*, 2000, (2): 63—66 [曾端, 叶元土, 苏平. 黄鳝胃和肠道的组织学研究. 水产科技情报, 2000, (2): 63—66]
- [29] Hu Y J, Hu Y, Huan Z L, *et al.* Effects of fish meal replacement by different compound protein on growth, amino acid composition in muscle and serum biochemical indices of rice filed eel (*Monopterus albus*) [J]. *Feed Industry*, 2017, (20): 20—26 [胡亚军, 胡毅, 郇志利, 等. 几种复合蛋白源对黄鳝生长、肌肉氨基酸组成及血清部分生化指标的影响. 饲料工业, 2017, (20): 20—26]

- [30] Skiba-Cassy S, Geurden I, Panserat S, *et al.* Dietary methionine imbalance alters the transcriptional regulation of genes involved in glucose, lipid and amino acid metabolism in the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2016, **454**(3): 56—65
- [31] National Research Council of the American Academy of Sciences. Nutrient Requirement of Fish and Shrimp [M]. Beijing: Science Press, 2015, 64—68 [美国科学院国家研究委员会. 鱼类与甲壳类营养需要. 北京: 科学出版社, 2015, 64—68]
- [32] 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
- [33] Lin W, Zeng Q, Zhu Z, *et al.* Relation between protein characteristics and tpa texture characteristics of crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C. ET V) and grass carp (*Ctenopharyngodon inellus*) [J]. *Journal of Texture Studies*, 2012, **43**(1): 1—11
- [34] Yang H, Wang Y, Jiang M, *et al.* 2-Step Optimization of the extraction and subsequent physical properties of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) skin gelatin [J]. *Journal of Food Science*, 2007, **72**(4): C188—C195
- [35] Jiang J, Hu Y, Zhou X Q, *et al.* Effects of replacement ratio of fish meal by soybean meal in extruded diets on muscle quality of Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, **27**(2): 623—630 [姜俊, 胡肄, 周小秋, 等. 膨化饲料中豆粕替代鱼粉比例对建鲤肌肉品质的影响. 动物营养学报, 2015, **27**(2): 623—630]
- [36] Zhao Y, Zhou X Q, Hu Y, *et al.* Effects of dietary glutamate on muscle quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) during middle growth period [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, **26**(11): 3452—3460 [赵叶, 周小秋, 胡肄, 等. 饲料中添加谷氨酸对生长中期草鱼肌肉品质的影响. 动物营养学报, 2014, **26**(11): 3452—3460]
- [37] Alami-durante H, Bazin D, Cluzeaud M, *et al.* Effect of dietary methionine level on muscle growth mechanisms in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2018, **483**(2018): 273—285

EFFECTS OF DIETARY METHIONINE ON GROWTH, SERUM BIOCHEMICAL INDEXES, SERUM FREE AMINO ACID AND MUSCLE TEXTURE OF RICE FIELD EEL (*MONOPTERUS ALBUS*)

HU Ya-Jun^{1,2}, HU Yi^{1,2}, SHI Yong^{1,2}, DAI Zhen-Yan^{1,2} and ZHONG Lei^{1,2}

(1. College of Animal Science and Technology, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China; 2. Collaborative Innovation Center for Efficient and Health Production of Fisheries in Hunan Province, Changde 415000, China)

Abstract: To investigate the effects of different forms of dietary methionine on rice field eel (*Monopterus albus*) [initial weight (30±0.45) g], Crystalline methionine (C-Met), encapsulated methionine (E-Met), methionine hydroxyl analog calcium salt (MHA-Ca) and methionine hydroxy analogue (MHA), whose effective Met content was 2 g/kg, were added in basal diet to form five experimental diets for a 10-week trial. Results showed that methionine in all forms improved weight gain rate and protein efficiency ratio and decreased feed conversion rate of rice field eels with significant change in groups of MHA-Ca and MHA compared with control group ($P<0.05$). Methionine addition significantly improved activity of trypsin, the contents of serum bile acid, total cholesterol, total protein, urea nitrogen and ammonia, muscle gumminess and adhesiveness ($P<0.05$). MHA-Ca and MHA addition improved the contents of serum glucose and HDL, activity of intestinal amylase, hepatosomatic GOT, crude protein of whole fish, muscle hardness, springiness and chewiness significantly ($P<0.05$), but reduced hepatosomatic index and serum glutamic oxalacetic transaminase activity significantly ($P<0.05$). The peak level of serum methionine appeared at 6h in control group after feeding, but at 9h in C-Met and MHA-Ca groups, at 12h in E-Met group, and at 3h and 9h in MHA group. These results revealed that methionine addition improved growth performance of rice field eels with better effects for MHA-Ca and MHA.

Key words: *Monopterus albus*; Crystal methionine; Encapsulated methionine; Methionine hydroxyl analog calcium salt; Methionine hydroxy analogue; Growth; Amino acid metabolism