

文章编号: 1674-5566(2026)01-0072-12

DOI:10.12024/jsou.20241004658

无鱼粉饲料中添加Ala-Gln对施氏鲟幼鱼生长和能量代谢的影响

刘烱廷^{1,2}, 王常安², 郭忠宝³, 王吟雅¹, 王佳豪², 陆绍霞², 韩世成², 刘红柏²

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所 黑龙江省水产动物病害与免疫重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150070; 3. 广西水产科学研究院 广西遗传育种和健康养殖重点实验室, 广西南宁 530021)

摘要: 旨在探究无鱼粉饲料中添加不同水平二肽丙氨酰谷氨酰胺(Ala-Gln)后对施氏鲟(*Acipenser schrenckii*)幼鱼的生长性能、氨基酸代谢、能量收支的影响。将450尾初始体质量(21.66±1.02)g的施氏鲟幼鱼饲养在循环水养殖车间, 随机分为5组(每组3个重复, 每个重复30尾)。对照组饲喂基础饲料, 试验组饲喂分别添加0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%Ala-Gln的试验饲料, 试验期56 d。结果表明: 当饲料中添加0.50%~1.00%Ala-Gln时, 其末重、肥满度显著高于对照组($P<0.05$); 饲料中添加0.25%~1.00%Ala-Gln后, 施氏鲟生长能G和代谢能R与对照组相比有显著差异($P<0.05$); 饲料中添加0.75%Ala-Gln后, 鱼体的半胱氨酸显著高于其他各组($P<0.05$)。饲料中添加0.50%Ala-Gln后, 鱼体的甘氨酸含量显著高于其他各组($P<0.05$); 摄食5 h后, 血液中谷氨酰胺和丙氨酸含量显著升高($P<0.05$)。饲料中添加0.50%Ala-Gln时, 天门冬氨酸含量显著高于其他各组($P<0.05$), 对其主成分PLA分析表明, 影响其血液代谢谱最主要的氨基酸为谷氨酰胺。综上所述, 在无鱼粉饲料中添加0.75%~1.00%Ala-Gln可显著提高施氏鲟幼鱼生长性能, 可能是因为Ala-Gln吸收后提高了机体谷氨酰胺的含量, 从而影响机体代谢促进蛋白质合成。本研究可为Ala-Gln应用于植物蛋白饲料替代鱼粉对鲟鱼生长性能和相关代谢影响研究提供实际参考。

关键词: 无鱼粉; 施氏鲟; Ala-Gln; 生长; 氨基酸代谢; 能量收支

中图分类号: S 968

文献标志码: A

我国目前淡水鱼养殖产量已经达到2 771.59万t, 其中鲟鱼总产量14.93万t^[1]。在施氏鲟(*Acipenser schrenckii*)养殖过程中, 其仔、稚鱼饲料中蛋白质含量要求在45%~55%, 商品鱼在36%~40%。

谷氨酰胺在动物体内含量丰富, 在生物合成和代谢过程中有重要的生理作用^[2], 其可以被肠黏膜分解和利用, 是维持肠黏膜结构完整性和功能的必需营养素^[3]。同时, 谷氨酰胺可以在代谢应激期间被大量利用, 以缓解氧化应激反应^[4]。谷氨酰胺通过调节mTOR、翻译和自噬以协调细胞生长和增殖, 不仅可以作为氨基酸供应, 还具有抗炎和

细胞保护的生理作用, 最终改善机体生长性能^[5]。

近年来, 研究发现在大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[6]、红鼓鱼(*Sciaenops ocellatus*)^[7]、军曹鱼(*Rachycentron canadum*)^[8]、斑马鱼(*Danio rerio*)^[9]饲喂Ala-Gln可缓解其应激反应, 在肠道修复、营养代谢、免疫反应等方面提高生长性能, 或与其他氨基酸协同作用改善生长性能。先前研究在40%鱼粉中添加0.75%~1.00%Ala-Gln对施氏鲟的生长和能量代谢改善方面有促进作用^[10]; 然而, 关于Ala-Gln应用于植物蛋白饲料替代鱼粉的报道较少, Ala-Gln可以缓解植物蛋白源带来的不良影响。通过给施氏鲟幼鱼饲喂不

收稿日期: 2024-10-12

修回日期: 2025-04-29

基金项目: 现代农业产业技术体系(特色淡水鱼)(CARS-46); 中央级公益性科研机构基本业务费项目(HSY202202M); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD60, 2023TD96); 黑龙江省自然科学基金(LH2023C057); 中国博士后基金(2022MD713817)

作者简介: 刘烱廷(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: qingtengsuxing@163.com

通信作者: 刘红柏, E-mail: liuhongbai@hrfri.ac.cn

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>

同水平的 Ala-Gln,探究 Ala-Gln 应用于植物蛋白饲料的适宜添加量及其对施氏鲟生长、体成分、氨基酸代谢及能量收支的影响,研究结果可为 Ala-Gln 应用于植物蛋白饲料替代鱼粉对施氏鲟生长性能和相关代谢影响研究提供实际参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验配制 5 种无鱼粉等氮等脂饲料,添加

Ala-Gln(上海旭新化工科技有限公司,纯度>98%)的水平分别为 0(G1)、0.25%(G2)、0.50%(G3)、0.75%(G4)、1.00%(G5),添加量参照预试验研究及文献[10-11]。基础饲料组成及营养成分见表 1。饲料蛋白源主要是大豆分离蛋白、次粉,脂肪源为鱼油和大豆磷脂。饲料原料经过 60 目粉碎后,混合、制粒(颗粒直径为 1.5 mm)。颗粒饲料置于封口袋中,保存于 -20 °C 冰箱。

表 1 基础饲料组成及营养成分(风干基础)
Tab. 1 Composition and nutrients levels of diets (air-dry basis)

| 项目 Items | G1(0) | G2(0.25%) | G3(0.50%) | G4(0.75%) | G5(1.00%) |
|--|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 次粉 Wheat flour middlings | 26.50 | 26.50 | 26.50 | 26.50 | 26.50 |
| 大豆分离蛋白 Soy protein isolate | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 60.00 |
| 磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| 牛磺酸 Taurine | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| 鱼油 Fish oil | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 | 7.00 |
| 大豆磷脂 Soy lecithin | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| L-丙氨酸-L-谷氨酰胺 L-Ala-Gln | 0 | 0.25 | 0.50 | 0.75 | 1.00 |
| 甘氨酸 Glycine(99%) | 1.00 | 0.75 | 0.50 | 0.25 | 0 |
| 三氧化二铬 Cr_2O_3 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.10 |
| 预混剂 Premix | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 | 0.90 |
| 合计 Total | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 总能 DE/(MJ/kg) | 16.89 | 17.06 | 16.98 | 17.03 | 17.22 |
| 水分 Moisture | 9.88 | 9.90 | 9.85 | 9.93 | 9.91 |
| 粗蛋白质 Crude protein | 43.52 | 43.85 | 43.39 | 43.06 | 43.32 |
| 粗脂肪 Crude lipid | 9.13 | 9.26 | 9.21 | 9.02 | 9.12 |

注:预混剂成分:胆碱 0.2%, 防腐剂 0.02%, 甜菜碱 0.1%, 复合维生素 0.3%, 复合微量元素 0.2%。维生素: V_C 100 mg/kg, V_E 60 mg/kg, V_{K_3} 5 mg/kg, V_A 15 000 IU/kg, V_{D_3} 3 000 IU/kg, V_{B_1} 15 mg/kg, V_{B_2} 30 mg/kg, V_{B_6} 15 mg/kg, $\text{V}_{\text{B}_{12}}$ 0.5 mg/kg, 烟酸 175 mg/kg, 叶酸 5 mg/kg, 肌醇 1 000 mg/kg, 生物素 2.5 mg/kg, 泛酸钙 50 mg/kg, 微量元素: Fe 25 mg/kg; Cu 3 mg/kg; Mn 15 mg/kg; Zn 60 mg/kg; I 0.6 mg/kg; Co 0.5 mg/kg; Se 0.2 mg/kg。

Notes: Premix components: Choline 0.2%, fungicide 0.02%, betaine 0.1%, complex vitamins 0.3%, complex trace elements 0.2%. The vitamin premix provided the following per kg of diets: V_C 100 mg, V_E 60 mg, V_{K_3} 5 mg, V_A 15 000 IU, V_{D_3} 3 000 IU, V_{B_1} 15 mg, V_{B_2} 30 mg, V_{B_6} 15 mg, $\text{V}_{\text{B}_{12}}$ 0.5 mg, nicotinic acid 175 mg, folic acid 5 mg, inositol 1 000 mg, biotin 2.5 mg, calcium pantothenate 50 mg. The mineral premix provided the following per kg of diets: Fe 25 mg, Cu 3 mg, Mn 15 mg, Zn 60 mg, I 0.6 mg, Co 0.5 mg, Se 0.2 mg.

1.2 试验鱼与饲养管理

试验施氏鲟购于中国水产科学院鲟鱼养殖工程技术中心,本试验在中国水产科学研究院黑龙江水产研究所(哈尔滨)循环水养殖车间进行。养殖试验开始前暂养 2 周并进行饲喂驯化。随机挑选大小均一、体质健壮的 450 尾鲟鱼幼鱼[初始体质量为 (21.66 ± 1.02) g]均分到 15 个缸中。试验鱼分为 5 个处理组,每个处理组 3 个重复,每个重复中放 30 尾试验鱼。水族箱规格为 220 L,试验水为曝气自来水,水温 22.5~23.5 °C,溶氧 > 6.0 mg/L, pH 7.8~8.0,氨氮 < 0.1 mg/L,日换水量为 1/3 以保证水质。每天 08:30 和 16:30 各投喂 1

次,近饱食投喂,养殖试验共进行 56 d。

本动物研究经中国水产科学研究院黑龙江水产研究所实验动物福利与伦理委员会审查批准(20200615)。

1.3 样品采集及指标测定

1.3.1 生长性能

在 56 d 的养殖试验结束后,试验鱼在取样前禁食 24 h,以排空消化道内容物。先用麻醉剂(MS-222, 100 mg/L)将鱼完全麻醉,称重测体长计数。计算增重率(Weight gain rate, WGR)、饲料系数(Feed conversion ratio, FCR)、肥满度(Condition factor, CF)、肝体比(Hepatosomatic

index, HSI)、脏体比(Viscerasomatic index, VSI)。计算公式:

$$R_{WGR}=100\% \times (W_t - W_0) / W_0 \quad (1)$$

$$R_{FCR}=W_f / (W_t - W_0) \quad (2)$$

$$I_{CF}=100 \times W_t / L_t^3 \quad (3)$$

$$I_{VSI}=100\% \times (W_l / W_t) \quad (4)$$

$$I_{HSI}=100\% \times (W_2 / W_l) \quad (5)$$

式中: R_{WGR} 为增重率,%; R_{FCR} 为饲料系数; I_{CF} 为肥满度, g/cm^3 ; I_{VSI} 为脏体比,%; I_{HSI} 为肝体比,%; W_0 为鱼体初始体质量,g; W_t 为鱼体终末体质量,g; W_f 为摄入饲料量,g; L_t 为最终体长,cm; W_l 为脏器质量,g; W_2 为肝脏质量,g。

1.3.2 成分测定方法

采用国标法测定水分(GB/T6435—2014)、粗脂肪(GB/T6433—2006)和粗灰分(GB/T6438—2007)含量。使用自动定氮仪(Rapid N exceed, Elementar, Langensfeld, Germany)测定粗蛋白质含量,粗脂肪含量采用索氏抽提系统(Extraction system-811, BUCHI, Switzerland)测定,粗灰分用马弗炉中灼烧法(550 °C)测定。GE含量按国际标准ISO 9831:1998的方法,采用全能氧弹量热仪(IKA C-200, Staufen, Germany)测定。

1.3.3 全鱼氨基酸的检测

样品前处理:采用盐酸水解法。将风干样粉碎至过0.125 mm网筛,称取试样50~100 mg,置于安瓿管中,加盐酸水解,抽真空,用喷灯封口,放入(110±1) °C的恒温箱中水解22 h,将水解液转入100 mL容量瓶,用NaOH溶液中和,并定容至100 mL,溶液过滤后用日立L-8900型氨基酸自动分析仪测定。由于酸水解破坏了样品中色氨酸,故色氨酸未测定。

1.3.4 血液中氨基酸的检测

样品前处理:采集的血样1 530 g离心15 min,取上清液至另一离心管,9 568 g离心30 min,上清液用0.45 μm滤膜过滤后上机分析。谷氨酰胺用南京建成生物工程有限公司试剂盒(A047-1-1)测定,原理是谷氨酰胺和羟胺在谷氨酰胺合成酶的作用下生成Y-谷氨酰氧肟酸和氨,通过显色反应可测定谷氨酰氧肟酸的含量,从而计算谷氨酰胺的含量。

1.3.5 血液指标检测

每处理组每重复分别随机取3尾鱼,每尾为独立样品,尾静脉采血,用600 IU肝素钠抗凝制

血浆,置于1.5 mL离心管中,-80 °C冷冻保存。根据Ala-Gln与茚三酮反应后溶液在570 nm处有最大吸收的原理,Ala-Gln含量采用茚三酮柱后衍生法测定^[12]。

1.3.6 能量收支测定

试验开始时,鱼饥饿2 d后称重。同时取10尾鱼作为对照,65 °C下烘干,用以估算试验开始时鱼体的干物质含量及其能量含量。试验期间,投喂1 h后回收所剩饵料并烘干称重。计算残饵回收率,并以此校正摄食量。每天用吸管收集鱼粪两次,烘干后供分析用。试验第一周测定水中氨氮和尿素氮排泄量,即用CHANEY等^[13]的方法测定该周换水前后水中的氨氮和尿素氮浓度,同时测量各鱼缸中水的体积,计算氮排泄量。

能量收支计算公式^[14]:

$$C=F+R+U+G \quad (6)$$

式中: C 为摄食能,J; F 为排粪能,J; U 为排泄能,J; R 为代谢能,J; G 为生长能,J。 C 根据摄入的饲料量及饲料的能量含量计算; F 根据表观消化率计算; U 通过各鱼缸中氨及尿素氮的排泄量计算,按照24.83 J/mg氨氮及23.03 J/mg尿素氮转换成能量^[15]; G 按实验期间鱼体总能量的变化来计算,假定对照鱼代表实验开始时鱼的干物质及其能量含量; R 根据摄食能与能量收支其他组分之差来计算,即 $R=C-F-U-G$ 。

1.4 统计分析方法

试验数据用平均值±标准差(Mean±SD)表示,方差齐次性检验。单因素方差分析和Duncan's多重比较用SPSS 23.0软件进行,显著性水平 P 为0.05。血清氨基酸代谢谱主成分分析采用软件SIMCA-P 11进行分析和绘图。

2 结果

2.1 无鱼粉饲料中添加Ala-Gln对施氏鲟幼鱼生长性能的影响

无鱼粉饲料中添加Ala-Gln后对施氏鲟幼鱼生长性能具有一定的改善效果。当饲料中添加0.50%~1.00% Ala-Gln时,其末重相较于对照组显著升高($P<0.05$)。饲料中添加0.25%~1.00% Ala-Gln后,增重率和饲料效率呈现升高的趋势,但未达到显著差异水平($P>0.05$)。饲料中添加0.75%及1.00% Ala-Gln后,肥满度显著高于对照组($P<0.05$)。饲料中添加0.25%~1.00% Ala-Gln

后,肝体指数和脏体指数未表现显著差异($P>0.05$)。见表2。

2.2 无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 对施氏鲟幼鱼体成分的影响

无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 后对鱼体的水

分、粗蛋白和粗脂肪无显著影响($P>0.05$)。饲料中添加 0.25% Ala-Gln 时,灰分含量显著低于其他各组($P<0.05$),见表3。

表2 无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 对施氏鲟幼鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effects of Ala-Gln supplementation on growth performance of juvenile Amur sturgeon in fishmeal free diets

| 项目 Items | G1(0) | G2(0.25%) | G3(0.50%) | G4(0.75%) | G5(1.00%) |
|---|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 初始体质量 Initial body mass/g | 21.53±0.56 | 21.54±0.58 | 21.40±0.53 | 21.93±0.46 | 21.91±0.45 |
| 终末体质量 Final body mass/g | 84.04±3.84 ^a | 86.10±1.87 ^a | 90.21±0.95 ^b | 90.98±1.26 ^b | 91.49±1.43 ^b |
| 增重率 Weight gain rate/% | 290.76±26.66 | 299.94±15.94 | 321.68±14.17 | 314.89±2.91 | 317.87±15.08 |
| 饲料系数 Feed conversion ratio | 1.23±0.03 | 1.21±0.02 | 1.21±0.01 | 1.20±0.05 | 1.19±0.02 |
| 肥满度 Condition factor/(g/cm ³) | 0.33±0.02 ^a | 0.34±0.01 ^{ab} | 0.34±0.01 ^{abc} | 0.36±0.00 ^c | 0.35±0.01 ^{bc} |
| 肝体比 Hepatosomatic index/% | 3.49±0.03 | 3.49±0.03 | 3.50±0.07 | 3.47±0.06 | 3.41±0.02 |
| 脏体比 Viscerosomatic index/% | 8.58±0.22 | 8.51±0.23 | 8.37±0.17 | 8.35±0.10 | 8.34±0.21 |

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: Values in the same line with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same letter or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

表3 无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 对施氏鲟幼鱼体成分的影响(湿重)

Tab. 3 Effects of Ala-Gln supplementation on body composition of juvenile Amur sturgeon in fish meal free diet(wet mass)

| 项目 Items | G1(0) | G2(0.25%) | G3(0.50%) | G4(0.75%) | G5(1.00%) | % |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| 水分 Moisture | 77.50±1.02 | 77.78±1.39 | 77.61±0.83 | 77.73±1.26 | 77.62±1.09 | |
| 粗蛋白质 Crude protein | 13.23±0.10 | 13.28±0.14 | 13.22±0.13 | 13.06±0.16 | 13.28±0.05 | |
| 粗脂肪 Crude lipid | 5.34±0.05 | 5.51±0.07 | 5.34±0.15 | 5.40±0.19 | 5.39±0.20 | |
| 灰分 Ash | 3.88±0.14 ^b | 3.38±0.23 ^a | 3.79±0.08 ^b | 3.77±0.21 ^b | 3.67±0.13 ^{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: Values in the same line with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same letter or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

2.3 无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 对施氏鲟幼鱼能量收支的影响

无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 后改变了施氏鲟幼鱼的能量收支模式。其代谢能占摄食能的比列最大,生长能次之。其中饲料中添加 0.25%~1.00% Ala-Gln 后,粪能 F 和排泄能 U 未呈现明显变化($P>0.05$)。饲料中添加 0.25%~1.00% Ala-Gln 后,生长能 G 显著高于对照组,代谢能 R 显著低于对照组($P<0.05$),见表4。

2.4 无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 对施氏鲟幼鱼氨基酸组成的影响

无鱼粉饲料中添加 0.25%~1.00% Ala-Gln 后基本未改变施氏鲟的氨基酸组成模式,仅有个别氨基酸发生明显的改变。饲料中添加 0.75% Ala-Gln 后,鱼体的半胱氨酸显著高于其

他各组($P<0.05$)。饲料中添加 0.50% Ala-Gln 后,鱼体的甘氨酸显著高于其他各组($P<0.05$),见表5。

无鱼粉饲料中添加 0.25%~1.00% Ala-Gln 后,施氏鲟血液的氨基酸代谢谱发生改变。摄食 5h 后,血液的谷氨酰胺和丙氨酸呈升高的趋势,且血液中未检测到 Ala-Gln,当添加水平为 0.75% 和 0.50% 时,分别达到显著差异水平($P<0.05$)。饲料中添加 0.50% Ala-Gln 时,天门冬氨酸显著高于其他各组($P<0.05$),见表6。

通过对其血液氨基酸代谢谱的主成分分析表明,摄食 5 h 后,饲料中添加 0.25%~1.00% Ala-Gln 影响血液代谢谱的氨基酸最主要的氨基酸为谷氨酰胺。

表4 无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 对施氏鲟幼鱼能量收支的影响

Tab. 4 Effects of Ala-Gln supplementation on the energy budget of juvenile Amur sturgeon in fishmeal free diets

| 项目 Items | G1(0) | G2(0.25%) | G3(0.50%) | G4(0.75%) | G5(1.00%) |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 粪能 Fecal energy(F) | 3.56±0.09 | 3.69±0.02 | 3.62±0.04 | 3.66±0.02 | 3.57±0.16 |
| 排泄能 Energy in urine(U) | 3.15±0.07 | 3.12±0.02 | 3.13±0.10 | 3.25±0.10 | 3.14±0.08 |
| 生长能 Growth energy(G) | 22.89±0.31 ^a | 23.44±0.15 ^b | 23.77±0.28 ^b | 23.65±0.12 ^b | 23.77±0.14 ^b |
| 代谢能 Metabolizable energy(R) | 70.40±0.42 ^b | 69.75±0.18 ^a | 69.48±0.15 ^a | 69.44±0.19 ^a | 69.52±0.20 ^a |
| 能量收支 Energy budget equation | 100C=3.56F+3.15U+ 22.89G+70.40R | 100C=3.69F+3.12U+ 23.44G+69.75R | 100C=3.62F+3.13U+ 23.77G+69.48R | 100C=3.66F+3.25U+ 23.65G+69.44R | 100C=3.57F+3.14U+ 23.77G+69.52R |

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: Values in the same line with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same letter or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

表5 无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 对全鱼氨基酸组成的影响(风干基础)

Tab. 5 Effects of Ala-Gln supplementation on amino acid composition of whole fish in fishmeal free diets (air-dry basis)

| 项目 Items | G1(0) | G2(0.25%) | G3(0.50%) | G4(0.75%) | G5(1%) |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 天冬氨酸 Asp | 4.12±0.02 | 3.96±0.04 | 3.89±0.10 | 4.00±0.11 | 3.82±0.41 |
| 苏氨酸 Thr | 3.04±0.02 | 2.90±0.10 | 2.90±0.06 | 2.98±0.06 | 2.95±0.12 |
| 丝氨酸 Ser | 3.39±0.02 | 3.26±0.09 | 3.32±0.04 | 3.36±0.02 | 3.27±0.16 |
| 谷氨酸 Glu | 11.48±0.03 | 11.21±0.08 | 11.38±0.41 | 11.71±0.21 | 11.59±0.42 |
| 甘氨酸 Gly | 4.70±0.02 ^a | 4.92±0.27 ^a | 5.29±0.10 ^b | 5.04±0.30 ^{ab} | 4.72±0.04 ^a |
| 丙氨酸 Ala | 4.17±0.02 | 4.29±0.09 | 4.33±0.08 | 4.19±0.01 | 4.20±0.04 |
| 半胱氨酸 Cys | 1.06±0.04 ^a | 1.21±0.28 ^a | 1.14±0.38 ^a | 1.42±0.28 ^b | 1.21±0.18 ^{ab} |
| 缬氨酸 Val | 3.40±0.02 | 3.48±0.07 | 3.40±0.04 | 3.38±0.03 | 3.45±0.03 |
| 蛋氨酸 Met | 2.05±0.01 | 2.30±0.34 | 2.13±0.12 | 2.20±0.12 | 2.26±0.31 |
| 异亮氨酸 Ile | 3.22±0.02 | 3.24±0.09 | 3.22±0.07 | 3.18±0.05 | 3.20±0.12 |
| 亮氨酸 Leu | 5.94±0.02 | 5.79±0.38 | 5.79±0.49 | 5.48±0.40 | 5.72±0.38 |
| 酪氨酸 Tyr | 2.62±0.02 | 2.65±0.07 | 2.63±0.10 | 2.75±0.10 | 2.64±0.08 |
| 苯丙氨酸 Phe | 2.94±0.02 | 3.06±0.17 | 2.91±0.03 | 2.96±0.01 | 3.04±0.12 |
| 赖氨酸 Lys | 6.05±0.03 | 5.96±0.30 | 5.85±0.62 | 5.47±0.49 | 5.88±0.28 |
| 组氨酸 His | 1.76±0.02 | 1.78±0.18 | 1.66±0.25 | 1.87±0.09 | 1.82±0.03 |
| 精氨酸 Arg | 4.46±0.02 | 4.47±0.15 | 4.50±0.18 | 4.32±0.13 | 4.39±0.12 |
| 脯氨酸 Pro | 2.15±0.02 | 2.22±0.10 | 2.37±0.27 | 2.48±0.28 | 2.42±0.47 |
| 总计 Total | 66.59±0.29 | 66.72±0.13 | 66.73±0.13 | 66.78±0.12 | 66.60±0.27 |

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: Values in the same line with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same letter or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

表 6 无鱼粉饲料中添加Ala-Gln对血液氨基酸组成的影响(摄食 5 h后)
Tab. 6 Effects of Ala-Gln on blood amino acid composition in fishmeal free diets (5 h after ingestion) nmol/mL

| 项目 Items | G1(0) | G2(0.25%) | G3(0.50%) | G4(0.75%) | G5(1.00%) |
|----------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 精氨酸 Arg | 124.48±3.64 | 123.12±0.56 | 124.50±1.91 | 122.81±0.64 | 123.01±2.15 |
| 缬氨酸 Val | 77.55±3.82 | 75.57±0.55 | 76.99±2.61 | 75.66±0.56 | 76.01±2.26 |
| 苯丙氨酸 Phe | 66.62±3.85 | 64.51±0.53 | 66.43±1.23 | 64.60±0.74 | 65.34±2.30 |
| 亮氨酸 Leu | 52.52±3.82 | 50.19±0.35 | 52.57±2.30 | 50.51±0.72 | 51.17±2.20 |
| 赖氨酸 Lys | 48.48±3.46 | 47.04±0.92 | 49.28±1.14 | 47.40±1.01 | 47.98±2.14 |
| 异亮氨酸 Ile | 38.11±2.86 | 36.70±0.64 | 39.34±1.21 | 37.10±1.14 | 37.56±2.14 |
| 苏氨酸 Thr | 31.31±3.17 | 29.75±1.07 | 32.92±2.31 | 30.15±0.93 | 30.67±2.09 |
| 蛋氨酸 Met | 32.31±3.56 | 30.44±1.14 | 33.77±1.78 | 31.12±0.69 | 31.56±1.94 |
| 组氨酸 His | 28.25±3.52 | 26.54±0.93 | 29.76±1.40 | 27.04±0.91 | 27.52±2.08 |
| 半胱氨酸 Cys | 13.60±3.39 | 12.26±1.52 | 14.13±0.97 | 12.04±1.02 | 12.58±2.09 |
| 天冬氨酸 Asp | 135.44±0.92 ^a | 135.58±0.73 ^{ab} | 137.58±0.48 ^b | 135.72±0.80 ^{ab} | 136.16±1.81 ^{ab} |
| 丝氨酸 Ser | 120.39±3.75 | 118.87±1.41 | 121.66±2.25 | 118.87±1.05 | 119.07±1.77 |
| 谷氨酰胺 Gln | 134.52±3.62 ^a | 133.16±1.27 ^a | 138.98±7.11 ^a | 162.97±10.80 ^b | 166.69±7.73 ^b |
| 丙氨酸 Ala | 88.63±1.02 ^a | 89.93±1.24 ^{ab} | 92.20±2.32 ^b | 100.54±1.88 ^c | 100.03±1.99 ^c |
| 谷氨酸 Glu | 56.61±3.88 | 54.74±1.23 | 57.68±1.46 | 55.09±1.02 | 55.47±2.03 |
| 甘氨酸 Gly | 35.40±4.03 | 34.02±1.37 | 37.56±2.74 | 33.98±0.93 | 34.40±1.96 |
| 脯氨酸 Pro | 31.63±3.66 | 29.60±1.06 | 32.51±0.83 | 30.01±0.96 | 30.57±2.15 |
| 酪氨酸 Tyr | 22.21±3.61 | 20.76±1.24 | 23.56±1.48 | 20.80±1.37 | 21.54±2.26 |

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: Values in the same line with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), while with the same letter or no letter superscripts mean no significant difference ($P>0.05$).

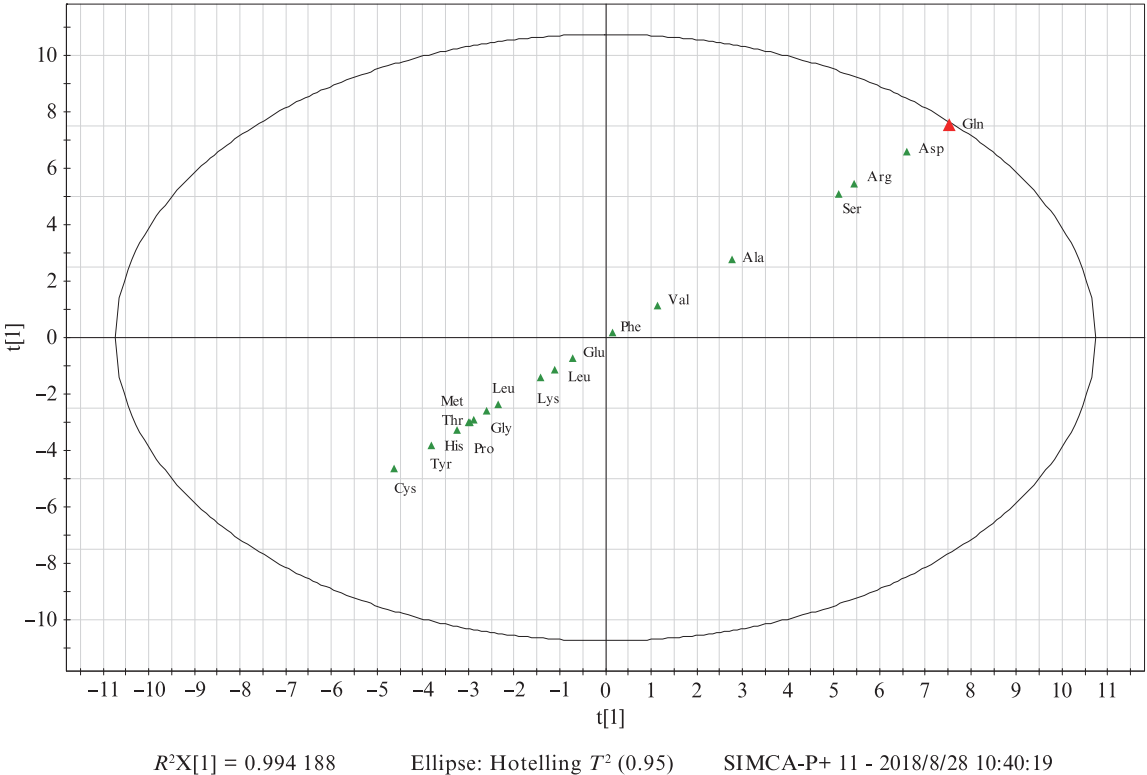


图 1 Ala-Gln对血液氨基酸代谢谱的PLA分析
Fig. 1 PLA analysis of the metabolic profile of blood amino acids by Ala-Gln

3 讨论

3.1 Ala-Gln 对施氏鲟生长性能的影响

本试验中饲料添加 0.75%~1.00% Ala-Gln 可以显著提高施氏鲟末重和肥满度 ($P<0.05$), 其增重率和饲料效率随着 Ala-Gln 的添加呈现升高的趋势 ($P>0.05$), 大鳞副泥鳅 (*Paramichthys sinensis*)^[16]、鳊 (*Siniperca chuatsi*)^[17]、大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*)^[18]、海洋青鲙鱼 (*Oryzias melastigma*)^[19]、罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)^[20] 等研究结果也表明添加 0.75% Ala-Gln 显著提高其增重率、特定生长率和蛋白质效率。本研究结果与先前试验结果相似, 可见饲料中添加 0.75%~1.00% Ala-Gln 可以改善鱼类生长性能。这可能是由于 Ala-Gln 可以增加肌肉和肝脏谷氨酰胺储存, 促进肌肉蛋白质合成, 改善肠道健康^[21]。NICKLIN 等^[22]研究发现, 在必需氨基酸 (EAA) 存在下, L-谷氨酰胺的细胞摄取及其随后的快速外排是激活 mTOR 的限速步骤。双向转运蛋白 SLC1A5 可调节 L-谷氨酰胺流出细胞和 L-亮氨酸或 EAA 转运入细胞。因此, L-谷氨酰胺通过调节 mTOR、翻译和自噬以协调细胞生长和增殖, 最终改善机体生长性能。LIN 等^[6]发现饲喂含 0.9% Ala-Gln 的基础饲料减轻了双重胁迫下引起的应激刺激。ZHOU 等^[23]研究发现 Ala-Gln 和生长素释放肽的添加会影响 Ghrelin、PepT1 和 mTOR 的表达, 促进了草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 幼鱼的肠道细胞增殖。FUENTES-QUESADA 等^[24]对石首鱼 (*Totoaba macdonaldi*) 的研究发现, 低鱼粉饲料中添加 Gln 可以通过减少鱼粉依赖性和改善肠道健康, 提高其生长性能, CARVALHO 等^[25]在罗非鱼的研究中也证实了这点, 与本研究结果相似, Ala-Gln 可以促进施氏鲟对植物蛋白的吸收, 缓解应激反应, 改善肠道健康, 从而促进生长性能。

3.2 Ala-Gln 对施氏鲟蛋白质合成的影响

本试验结果显示, 饲料中添加 0.25%~1.00% Ala-Gln 对施氏鲟幼鱼体成分没有显著影响 ($P>0.05$)。本试验中, 饲料中添加大量大豆分离蛋白, 饲喂添加适量 Ala-Gln 的饲料并不会对鱼体成分有较大影响。WANG 等^[26]证明随着日粮谷氨酰胺水平的增加, 黄尾密鲷 (*Xenocypris davidi*) 全身粗蛋白含量上升, 与镜鲤 (*Cyprinus*

carpio)^[27] 的研究类似, 这可能与 Ala-Gln 调节鱼体的代谢水平有关。Gln 是机体内合成生物大分子如氨基酸、蛋白质、嘌呤、嘧啶及核苷酸等的重要前体, 也是机体生长发育或组织或细胞分化的重要能源物质^[28]。Gln 可通过细胞膜上溶质载体超家族成员 (Solute carrier family, SLC) 转运到细胞内, 在谷氨酰胺酶 (Glutaminase, GLS) 和谷氨酰胺合成酶 (Glutamine synthetase, GS) 的催化下与谷氨酸相互转化, 谷氨酸在细胞内转化为 α -酮戊二酸参与三羧酸循环代谢后产生糖类、蛋白质和脂肪酸。另外, Gln 在体内可转化为精氨酸, 随着精氨酸浓度的上升, 进而促进生长激素 (GH) 的分泌, GH 通过增强 DNA 聚合酶活性, 促进 mRNA 转录水平, 从而加速机体蛋白质的表达。CHEN 等^[29]给镜鲤交替饲喂含 Ala-Gln 的基础日粮后增加了生长性能, 其糖皮质激素受体 1 (GR1) 明显高于未添加 Ala-Gln 的对照组; 先前研究^[9]也发现饲料中添加 Ala-Gln 显著影响斑马鱼 (*Danio rerio*) 氨基酸和肽转运蛋白的 mRNA 表达水平, 上调糖酵解和脂肪合成相关因子的 mRNA 表达水平, 显著降低 AMP 活化蛋白激酶 (AMPK) 活性, 刺激雷帕霉素靶标 (TOR) 活性, 促进机体的蛋白质合成, 进而提高生长性能。因此, Gln 可通过脱氨基和转氨基过程合成多种氨基酸来促进鱼体蛋白质合成。

3.3 Ala-Gln 对施氏鲟氨基酸代谢的影响

鱼类对晶体氨基酸的利用程度有限, 且 Gln 对酸性环境敏感, 遇热不稳定, 限制了其应用效果。Ala-Gln 具有在水溶液中溶解度高、耐高温、性质较为稳定等优点。此外, 鱼类肠道和肾脏中分别存在小肽转运载体 (PepT1) 和二肽转运载体 (PepT2), 能将 Ala-Gln 以完整形式转运到细胞内, 再被水解利用, 而且转运载体 PepT-1 转运二肽的效率远高于游离氨基酸^[30]。在施氏鲟的研究中, WANG 等^[31]发现大豆分离蛋白饲料中添加 0.75% 和 1.00% Ala-Gln 后, 肝脏转录组分析表明其调节生长、脂类和氨基酸代谢信号通路发生了变化, 提高了生长性能。在本研究中, 以大豆分离蛋白替代鱼粉, Ala-Gln 作为 Gln 稳定形式添加, 检测其血液中没有 Ala-Gln 存在, 说明施氏鲟对 Ala-Gln 的利用并不是以小肽的形式发挥生理功能, 从全鱼的氨基酸组成来看, 其氨基酸模式并没有发生明显的变化, 摄食 5 h 后, 添加 0.50%~

1.00% Ala-Gln 的试验组血液中的谷氨酰胺和丙氨酸的含量显著提高($P<0.05$)。因此 Ala-Gln 被吸收后主要通过谷氨酰胺和丙氨酸这两种氨基酸来调节机体代谢。饲料中添加 0.75% Ala-Gln 后,鱼体的半胱氨酸显著高于其他各组($P<0.05$)。饲料中添加 0.50% Ala-Gln 后,鱼体的甘氨酸显著高于其他各组($P<0.05$)。谷氨酰胺是谷胱甘肽的合成原料以及 TCA 循环中 α -酮戊二酸的来源^[32]。谷氨酰胺通过特定的转运蛋白转运到胞质溶胶中后,在谷氨酰胺酶催化下转化为谷氨酸和氨。除此之外,谷氨酸还可以与甘氨酸和半胱氨酸在谷氨酸-半胱氨酸连接酶的催化下合成谷胱甘肽,而胱氨酸/谷氨酸逆向转运体可以通过排出谷氨酸和转入半胱氨酸调控谷胱甘肽的合成,为甘氨酸和脂质合成提供大分子物质,交换必需氨基酸(EAA)以激活 mTOR 并促进细胞生长^[33]。在本试验中,摄食 5 h 后,饲料中添加 0.50% Ala-Gln 的试验组血液中天门冬氨酸显著高于其他各组($P<0.05$),这可能是谷氨酸经谷草转氨酶催化生成天冬氨酸^[34],或者通过谷氨酸转运蛋白家族(Excitatory amino acid transporters, EAATs)转运谷氨酸/天冬氨酸,提高神经系统兴奋性^[35]。因此,试验结果中鱼体和血液中氨基酸的显著变化说明在无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 可以通过调节机体氨基酸代谢来改善鲟鱼的生长性能。

3.4 Ala-Gln 对施氏鲟能量收支的影响

本试验的研究结果表明,无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 后通过改变施氏鲟幼鱼的生长能和代谢能来改变其能量收支模式。粪能 F 和排泄能 U 未呈现明显变化($P>0.05$),生长能 G 显著高于对照组,代谢能 R 显著低于对照组($P<0.05$)。此前在低鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 方面的研究多集中在植物蛋白的替代比、氨基酸的利用以及酶活等方面,很少从能量学角度阐明 Ala-Gln 对施氏鲟能量收支的影响差异。周萌等^[36]对异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)研究表明植物蛋白源替代鱼粉会导致其摄食率和代谢能差异,从而影响生长性能。在对石首鱼^[24]、罗非鱼^[25]的研究中也表明了 Ala-Gln 可以通过提高植物蛋白的利用来缓解应激进而提高鱼体生长性能。在本研究中,从能量收支的角度也可以证明无鱼粉饲料中添加 Ala-Gln 后其生长能和代谢能发生显著变化

从而改善施氏鲟的生长性能。

3.5 Ala-Gln 对提高大豆分离蛋白利用率的作用

大豆蛋白的氨基酸组成不平衡,用大豆蛋白替代饲料中的鱼粉常诱发鱼体肠炎,发生黏膜炎症反应,致使消化吸收能力下降,生长性能降低^[37]。因此,可以通过 Ala-Gln 来缓解环境应激,满足机体生长需求^[38]。在对鲤幼鱼的研究中,ZHANG 等^[39]证明 Gln 可以保护鱼肠免受大豆抗营养因子 β -伴大豆球蛋白(β -conglycinin)诱导的氧化损伤。大豆分离蛋白替代鱼粉后,施氏鲟的生长性能下降。添加 0.50%~1.00% Ala-Gln 可改善生长性能,这与石首鱼^[24]、大菱鲆^[40]、建鲤^[41]等研究基本一致,原因可能是谷氨酰胺通过抑制 MyD88/NF- κ B 通路来增强肠道免疫防御以缓解肠炎并改变肠道菌群^[42]。KAUSHIK 等^[43]研究证实大豆浓缩蛋白完全替代鱼粉不会影响虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)生长性能和营养物质的利用。本研究结果显示,大豆分离蛋白饲料中添加 Ala-Gln 可以改善施氏鲟生长和代谢性能,减弱了植物蛋白替代鱼粉的不利影响,这与本实验室先前研究相似,在 40% 鱼粉中添加 0.75%~1.00% Ala-Gln 对施氏鲟的生长和能量代谢改善方面有促进作用,在无鱼粉饲料中采用大豆浓缩蛋白代替豆粕可以有效降低抗营养因子水平,减轻施氏鲟对大豆制品的不良反应,但饲喂的施氏鲟生长速度较慢,尽管植物副产品相比于鱼粉便宜,但在高水平替代的情况下也需要在饲料中补充氨基酸以平衡饲料营养成分,在本研究结果中,添加 0.75%~1.00% Ala-Gln 时施氏鲟生长良好,为未来研究鲟鱼低成本饲料配方和开发植物蛋白替代鱼粉饲料方面提供参考。

4 结论

总之,在本试验中,相比于对照组,无鱼粉饲料中添加 0.75%~1.00% Ala-Gln 显著提高施氏鲟末重和肥满度,改变其能量收支模式,提高鱼体半胱氨酸和甘氨酸含量,而饲料中添加的 Ala-Gln 在血液中主要通过谷氨酰胺调节机体代谢。研究表明在无鱼粉的施氏鲟饲料中 Ala-Gln 的最佳添加水平是 0.75%~1.00%。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs Fishery Administration Bureau. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024.
- [2] ZHANG J, PAVLOVA N N, THOMPSON C B. Cancer cell metabolism: the essential role of the nonessential amino acid, glutamine[J]. The EMBO Journal, 2017, 36(10):1302-1315.
- [3] KIM M H, KIM H. The roles of glutamine in the intestine and its implication in intestinal diseases [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(5):1051.
- [4] 彭洁, 曹猛, 孙慕涵, 等. 谷氨酰胺代谢在机体免疫调控中作用的研究进展[J]. 癌变·畸变·突变, 2023, 35(3): 231-235, 239.
PENG J, CAO M, SUN M H, et al. Research progress on the role of glutamine metabolism in the body's immune regulation [J]. Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis, 2023, 35(3):231-235, 239.
- [5] RAIZEL R, LEITE J S M, HYPÓLITO T M, et al. Determination of the anti-inflammatory and cytoprotective effects of *L*-glutamine and *L*-alanine, or dipeptide, supplementation in rats submitted to resistance exercise [J]. British Journal of Nutrition, 2016, 116(3): 470-479.
- [6] LIN Y, CHEN J, CHEN X, et al. Effects of Ala-Gln on growth, biochemical indicators and stress-related gene expression of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) under dual stress of flow rate and density[J]. Aquaculture Reports, 2024, 35:101961.
- [7] Cheng Z, Buentello A, Gatlin III D M. Effects of dietary arginine and glutamine on growth performance, immune responses and intestinal structure of red drum, *Sciaenops ocellatus*[J]. Aquaculture, 2011, 319(1-2): 247-252.
- [8] 温震威, 黄建盛, 陈有铭, 等. *L*-丙氨酰-*L*-谷氨酰胺对低氧胁迫后军曹鱼幼鱼生长性能、血清生化与抗氧化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(4):2503-2513.
WEN Z W, HUANG J S, CHEN Y M, et al. Effects of *L*-alanyl-*L*-glutamine on growth performance, serum biochemical and antioxidant index of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(4):2503-2513.
- [9] TIAN J, HE G, MAI K, et al. Dietary Ala-Gln ameliorated growth suppression and intestinal injury induced by soya saponin in zebrafish [J]. Aquaculture, 2020, 529:735748.
- [10] RAHMAT I, JUSADI D, SETIAWATI M, et al. Evaluation of glutamine supplementation in the diet on the structure and function of the intestine and the growth performance of African catfish, *Clarias gariepinus* (Burchell 1822) juvenile [J]. Jurnal Iktiologi Indonesia, 2021, 21(2):131-149.
- [11] 王常安, 李晋南, 王连生, 等. *L*-丙氨酰-*L*-谷氨酰胺对杂交鲟体成分、肠道形态的影响[J]. 水产学杂志, 2017, 30(2):12-16.
WANG C A, LI J N, WANG L S, et al. Effects of dietary *L*-alanyl-*L*-Glutamine supplementation on body composition and intestinal morphology of hybrid Sturgeon *Acipenser schrenckii*♀×*A. baerii*♂ [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2017, 30(2):12-16.
- [12] 诸敏, 黄明法. 茚三酮柱后衍生法测定丙氨酰-谷氨酰胺的含量[J]. 中国现代应用药学, 2011, 28(7):669-670.
ZHU M, HUANG M F. Determination of N(2)-*L*-alanyl-*L*-glutamine by post-column derivatization with ninhydrin [J]. Journal of Modern Applied Pharmacy in China, 2011, 28(7):669-670.
- [13] CHANEY A L, MARBACH E P. Modified reagents for determination of urea and ammonia [J]. Clinical Chemistry, 1962, 8(2):130-132.
- [14] BRETT J R, GROVES T D D. Physiological energetics [M]// HOAR W S, RANDALL D J. Fish Physiology. New York: Academic Press, 1979, 8:279-352.
- [15] ELLIOTT J M. The energetics of feeding, metabolism and growth of brown trout (*Salmo trutta* L.) in relation to body weight, water temperature and ration size [J]. The Journal of Animal Ecology, 1976, 45:923-948.
- [16] 李佑杰, 陈琪, 袁志文, 等. 饲料中添加丙氨酰-谷氨酰胺对大鳞副泥鳅生长性能、血清生化指标、肝脏抗氧化能力以及肠道消化酶活性和形态结构的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(5):3219-3230.
LI Y J, CHEN Q, YUAN Z W, et al. Effects of dietary alanyl-glutamine supplementation on growth performance, serum biochemical indices, liver antioxidant capacity, intestinal digestive enzyme activities and morphological structure of *Paramichthys sinensis* [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 36(5):3219-3230.
- [17] 方揽月, 许耀升, 刘天骥, 等. 饲料中谷氨酸, 谷氨酰胺和谷氨酸钠对鳊摄食、生长、胃肠及肝功能的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(4):592-599.
FANG L Y, XU Y S, LIU T J, et al. Dietary glutamic acid, glutamine and monosodium glutamate on feeding, growth, gastrointestinal and liver function of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(4):592-599.
- [18] 仲茜, 许丹丹, 王旋, 等. 饲料中添加亮氨酸和谷氨酰胺对大菱鲆幼鱼生长和肠道健康的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(4): 8-17.
ZHONG Q, XU D D, WANG X, et al. Effect of dietary leucine and glutamine on growth and intestinal health of

- juvenile turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(4): 8-17.
- [19] LI W, XU Y, LIU F, et al. Growth performance, antioxidant indexes, and the expression of genes were considerably promoted by dietary supplementation of alanyl-glutamine and vitamin E in juvenile marine medaka in seawater acidification by carbon dioxide[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2023, 54(6): 1592-1606.
- [20] HUANG Y, WANG M, PAN J, et al. Dietary glutamine supplementation improves the osmoregulatory capacity and reduces oxidative stress induced by hyperosmotic stress in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Aquaculture Reports, 2024, 37: 102267.
- [21] WANG C A, XU Q Y, XU H, et al. Dietary L-alanyl-L-glutamine supplementation improves growth performance and physiological function of hybrid sturgeon *Acipenser schrenckii* ♀ × *A. baerii* ♂ [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2011, 27(2): 727-732.
- [22] NICKLIN P, BERGMAN P, ZHANG B, et al. Bidirectional transport of amino acids regulates mTOR and autophagy[J]. Cell, 2009, 136(3): 521-534.
- [23] ZHOU Y, GUO M, LI Y, et al. Effects of Ghrelin on intestinal cell proliferation, the expression of protein absorption and metabolism factors in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Aquaculture Reports, 2022, 22: 100928.
- [24] FUENTES-QUESADA J P, VIANA M T, MATA-SOTRES J A, et al. Dietary glutamine enhances growth performance and gut integrity of *Totoaba macdonaldi* juveniles fed low fishmeal diets but has limited synergetic effects in combination with a prebiotic[J]. Aquaculture, 2023, 576: 739834.
- [25] CARVALHO P L P F, XAVIER W S, GUIMARÃES M G, et al. Dietary glutamine improves growth and intestinal morphology of juvenile GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*) but has limited effects on innate immunity and antioxidant capacity [J]. Aquaculture, 2023, 563: 738976.
- [26] WANG Y, PENG Z, YAN L, et al. Effects of dietary glutamine supplementation on growth performance, intestinal digestive ability, antioxidant status and hepatic lipid accumulation in *Xenocypris davidi* (Bleeker, 1871) [J]. Aquaculture International, 2024, 32(1): 725-743.
- [27] 朱青,徐奇友,王长安,等. 丙氨酰-谷氨酰胺对德国镜鲤幼鱼(*Cyprinus carpio* L.)血清生化指标及体组成的影响[J]. 水产学杂志,2009,22(4):12-15.
- ZHU Q, XU Q Y, WANG C A, et al. Effect of alanyl-glutamine on serum biochemical index and body composition of juveniles German mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(4):12-15.
- [28] XI P, JIANG Z, ZHENG C, et al. Regulation of protein metabolism by glutamine: implications for nutrition and health[J]. Front Biosci, 2011, 16(1): 578-597.
- [29] CHEN X M, GUO G L, SUN L, et al. Effects of Ala-Gln feeding strategies on growth, metabolism, and crowding stress resistance of juvenile *Cyprinus carpio* var. Jian [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 51: 365-372.
- [30] ROMANO A, BARCA A, STORELLI C, et al. Teleost fish models in membrane transport research: the PEPT1 (SLC15A1) H⁺-oligopeptide transporter as a case study [J]. The Journal of Physiology, 2014, 592(5): 881-897.
- [31] WANG C, SUN X, LU S, et al. Transcriptome analyses profiles of dietary l-alanyl-l-glutamine supplementation in Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*, liver [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2023, 54(3): 734-748.
- [32] LI X, ZHENG S, WU G. Nutrition and metabolism of glutamate and glutamine in fish [J]. Amino Acids, 2020, 52(5): 671-691.
- [33] CHEN L, CUI H. Targeting glutamine induces apoptosis: a cancer therapy approach [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(9): 22830-22855.
- [34] NEWSHOLME P, DINIZ V L S, DODD G T, et al. Glutamine metabolism and optimal immune and CNS function [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2023, 82(1): 22-31.
- [35] PAJARILLO E, RIZOR A, LEE J, et al. The role of astrocytic glutamate transporters GLT-1 and GLAST in neurological disorders: Potential targets for neurotherapeutics [J]. Neuropharmacology, 2019, 161: 107559.
- [36] 周萌,崔奕波. 豆粕和土豆蛋白替代饲料中鱼粉对异育银鲫生长及能量收支的影响[J]. 水生生物学报,2002(4):370-377.
- ZHOU M, CUI Y B. Effect of replacement of fish meal by Soybean meal and potato protein concentrate in the diet for gibel carp on growth and energy budget [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002(4): 370-377.
- [37] JIA S, LI X, HE W, et al. Protein-sourced feedstuffs for aquatic animals in nutrition research and aquaculture [J]. Recent Advances in Animal Nutrition and Metabolism, 2022: 237-261.
- [38] HE Y, DONG X, YANG Q, et al. Glutamine improves growth and intestinal health in juvenile hybrid groupers fed high-dose glycine [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2023, 141: 109003.
- [39] ZHANG J X, GUO L Y, FENG L, et al. Soybean

- β -conglycinin induces inflammation and oxidation and causes dysfunction of intestinal digestion and absorption in fish[J]. Plos One, 2013, 8(3): e58115.
- [40] LIU Y, CHEN Z, DAI J, et al. The protective role of glutamine on enteropathy induced by high dose of soybean meal in turbot, *Scophthalmus maximus* L [J]. Aquaculture, 2018, 497: 510-519.
- [41] ZHANG J X, ZHOU X Q, LIU Y. Effects of soybean meal on the growth and intestinal immunity of juvenile Jian carp[J]. Aquacult Science, 2007, 2: 315-320.
- [42] HE Y, LIANG J, DONG X, et al. Glutamine alleviates β -conglycinin-induced enteritis in juvenile hybrid groupers *Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂ by suppressing the MyD88/NF- κ B pathway [J]. Aquaculture, 2022, 549: 737735.
- [43] KAUSHIK S J, CRAVEDI J P, LALLES J P, et al. Partial or total replacement of fish meal by soybean protein on growth, protein utilization, potential estrogenic or antigenic effects, cholesterolemia and flesh quality in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. Aquaculture, 1995, 133(3-4): 257-274.

Effects of Ala-Gln supplementation in soybean protein isolate feed on juvenile Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*)

LIU Yangting^{1,2}, WANG Chang'an², GUO Zhongbao³, WANG Hanya¹, WANG Jiahao², LU Shaoxia², HAN Shicheng², LIU Hongbai²

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Aquatic Animal Diseases and Immunity of Heilongjiang, Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, Heilongjiang, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Aquatic Genetic Breeding and Healthy Aquaculture, Guangxi Academy of Fishery Sciences, Nanning 530021, Guangxi, China)

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of different gradients of Ala-Gln added to fishmeal-free diets on the growth performance, amino acid metabolism and energy budget of juvenile *Acipenser schrenckii*. In this study, 450 juvenile sturgeon with initial body weight of (21.66 ± 1.02) g were raised in a recirculating water culture facility and randomly divided into 5 groups (3 replicates per group with 30 fish per replicate). The control group was fed a basal diet, while the experimental groups were fed diets supplemented with 0, 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1.00% Ala-Gln, respectively. The experiment lasted for 56 days. The results were as follows: (1) The final weight and condition factor of sturgeon were significantly higher in the groups receiving 0.50%–1.00% Ala-Gln compared to the control group ($P < 0.05$). Weight gain rate, feed efficiency, dry matter intake, crude protein, and crude lipid content increased with Ala-Gln supplementation, though these increases did not reach statistical significance ($P > 0.05$). (2) Fecal energy (F), excretion energy (U), showed no significant differences ($P > 0.05$), but growth energy (G) and metabolizable energy (R) were significantly different from the control group ($P < 0.05$). (3) The cysteine content of fish supplemented with 0.75% Ala-Gln was significantly higher than that of other groups ($P < 0.05$). The glycine content of fish supplemented with 0.50% Ala-Gln was significantly higher than that of other groups ($P < 0.05$). The glycine content of fish supplemented with 0.50% Ala-Gln was significantly higher than that of other groups ($P < 0.05$). (4) Glutamine and alanine levels in the blood were significantly increased 5 hours after ingestion ($P < 0.05$). After 0.25%–1.00% Ala-Gln supplementation, glutamine was the most important amino acid affecting the blood metabolic profile. The addition of 0.50% Ala-Gln resulted in significantly higher aspartic acid levels compared to other groups ($P < 0.05$). Analysis of PLA, a key component of aspartic acid, indicated that glutamine was the most important amino acid influencing the blood metabolic profile. The results indicate that exogenous supplementation of 0.75% to 1.00% Ala-Gln can significantly improve the growth performance of juvenile sturgeon, likely due to increased absorption of Ala-Gln, which elevates the levels of glutamine and alanine in the body, thereby affecting metabolism and promoting protein synthesis.

Key words: fishmeal-free diets; Amur sturgeon; Ala-Gln; growth; amino acid metabolism; energy budget