

doi: 10.7541/2025.2024.0363

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0363

饲料精氨酸对生长中期镜鲤生长及肌肉品质的影响

高一琪^{1,2*} 范泽^{1*} 程镇燕² 吴迪¹ 王连生¹ 李晋南¹ 李晨辉^{1,3}

(1. 中国水产科学研究院黑龙江水产研究所, 黑龙江省水生动物病害与免疫重点实验室, 哈尔滨 150070; 2. 天津农学院水产学院, 天津市水产生态与养殖重点实验室, 天津 300384; 3. 农业农村部渔业环境及水产品质量检验检测中心(哈尔滨), 哈尔滨 150070)

摘要: 实验旨在研究饲料精氨酸添加量对松浦镜鲤(*Cyprinus carpio* Songpu)生长性能、饲料利用率、肌肉品质及抗氧化能力的影响。以饲料精氨酸水平分别为0.71%、1.06%、1.41%、1.76%、2.11%及2.46%的6种等氮的半精制饲料(粗蛋白含量为28.11%), 投喂初始体质量为(298.89±15.30) g的松浦镜鲤56d。结果表明: 松浦镜鲤的增重率(WRG)、特定生长率(SGR)及蛋白质效率(PER)与饲料中精氨酸水平均呈先上升后下降的变化趋势, 均在精氨酸含量为1.41%时达到峰值。而饲料系数(FCR)趋势与之相反, 1.41%组FCR显著低于除1.76%组外的其余各组($P<0.05$)。在1.41%组, 肌肉的硬度、弹性、咀嚼性及剪切力数值均优于其他各组, 而肌肉在离心和蒸煮过程中水分流失量最少, 其中离心失水率显著低于0.71%和2.46%组($P<0.05$), 但蒸煮损失率未与其余各组产生显著差异($P>0.05$)。与0.71%、2.11%和2.46%三组相比, 肌纤维直径在1.41%组显著降低($P<0.05$), 而肌纤维密度显著高于除1.76%组的其余各组($P<0.05$)。肌肉色泽中 L^* 和 b^* 值呈先下降后上升的变化趋势, L^* 值和 b^* 值分别在1.76%组和1.41%组显著降低($P<0.05$), 而 a^* 值呈现相反变化趋势, 1.41%组数值高于其余各组但无显著差异性($P>0.05$)。肌肉中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽(GSH)和总抗氧化能力(T-AOC)等指标数值均在1.41%组时显著高于其余各组($P<0.05$), 但肌肉中丙二醛(MDA)含量则在此组降至最低, 且差异性不显著($P>0.05$)。在基因水平上, 当精氨酸添加量为1.41%时, 肌肉中雷帕霉素靶蛋白(*tor*)、蛋白激酶B(*akt*)、S6蛋白激酶1(*s6kl*)、4E结合蛋白1(*4ebp1*)及叉头框蛋白O1(*foxo1*)的等基因的表达量得到显著提高($P<0.05$)。综上, 结合松浦镜鲤WRG、SGR及FCR与饲料精氨酸水平进行二次曲线回归分析, 得到生长中期鲤鱼对饲料中精氨酸最适需求量为饲料干物质的1.41%—1.58%。

关键词: L-精氨酸; 生长; 抗氧化; 肌肉品质; 松浦镜鲤

中图分类号: S965.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2025)07-072511-12



蛋白质是保障鱼类基本代谢和生长发育的营养物质, 不仅供给鱼体充足能量, 还提供鱼体合成蛋白质所需氨基酸, 饲料中适宜水平的蛋白质能促进鱼类更好生长^[1]。鱼粉因其良好的适口性、较高的营养价值及易消化的特性被广泛用作水产饲料的动物蛋白质源, 但随着集约化养殖模式的迅猛发展导致鱼粉市场供求关系不平衡, 鱼粉替代和新型

蛋白源的开发已成为新的研究热点。然而, 一般的动植物性蛋白源缺乏一些必需氨基酸, 即限制性氨基酸^[2]。因此在饲料中添加适量限制性氨基酸, 使饲料氨基酸构成更合理是十分必要的。

精氨酸作为限制性氨基酸的一种, 不仅是水生动物机体所需十种必需氨基酸之一, 也是鱼类饲料蛋白中的天然成分, 参与鱼体蛋白质代谢和多种物

收稿日期: 2024-09-20; 修订日期: 2024-11-19

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH-2023C056); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD60); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z22297)资助 [Supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (LH - 2023C056); the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2023TD60); the Postdoctoral Science Foundation of Heilongjiang Province (LBH-Z22297)]

作者简介: 高一琪(1997—), 女, 在读硕士; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 16611619851@163.com 范泽(1992—), 男, 副研究员; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: fanze@hrfri.ac.cn *共同第一作者

通信作者: 王连生(1984—), 男, 研究员, 博士; 主要从事水产动物营养与饲料研究。E-mail: wangliansheng@hrfri.ac.cn

质合成^[3]。据报道,适当的精氨酸补充可以促进鱼类生长和免疫反应,而过量摄入精氨酸会抑制鱼类生长和免疫^[4]。在鲤(*Cyprinus carpio*)^[5]的相关实验中,饲料适量补充精氨酸不仅促进鱼体生长,调节机体免疫功能,提高肝脏抗氧化能力,同时还能加快肠道内营养物质的消化和吸收。因此,饲料中适宜添加精氨酸对鱼体生长、免疫、肠道及肝脏健康等均具有调节作用^[6]。然而,鱼类内源性生物合成精氨酸能力有限,且精氨酸需求量因鱼种和鱼的大小而异。一般来说,相同规格时,肉食性鱼种精氨酸需求量高于杂食性^[7]。在黄鳍石斑(*Epinephelus flavocaeruleus*)和鲤的研究中发现,初始体重约4.23 g的幼年黄石斑鱼最适精氨酸需求量为饲料干物质(DM)的2.8%^[8],而初始体重约6.3 g的鲤幼鱼最适需求量则为DM的1.8%^[9,10]。同样的还有尼罗罗非鱼幼鱼(*Oreochromis niloticus*)^[11]和军曹鱼幼鱼(*Rachycentron canadum*)^[12],精氨酸需求量分别为DM的1.36%和2.85%。相比于大多数杂食性鱼类,肉食性鱼类精氨酸需求量更高。此外,精氨酸需求量还受鱼类生长长期影响,随着鱼类生长长期增加精氨酸需求量显著减少。在Tu等^[13]的研究中,初始体重约51.6 g生长初期银鲤对精氨酸需求量为DM的1.64%,而约147.8 g生长中后期银鲤的需求量则为DM的1.29%。Zhao等^[14]的实验发现,团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)中较小的鱼(52.50±0.18) g和较大的鱼(101.85±1.85) g最佳精氨酸需求量分别为DM的2.03%和1.79%。综上,鱼类对精氨酸的需求量受多因素影响,本文主要针对生长中期鲤展开进一步研究。

肌肉不仅是营养物质积累的部位,还是主要可食用部分。部分营养物质能通过加快肌肉蛋白质沉降速率并促进脂肪沉积、增强肌肉抗氧化能力及改善物理特性达到提高肉质的目的^[15]。然而,饲料氨基酸构成比例不平衡,会使肌肉蛋白质水解过程被激活,蛋白质沉积减少,从而降低鱼类肌肉硬度影响肉质^[16]。因此,平衡饲料氨基酸组成是提升肌肉品质的关键。此外,肌肉的品质还受肌肉纤维结构和氧化损伤等因素的共同作用。研究发现,饲料中适量添加精氨酸可显著提高肌肉剪切力,减少蒸煮失水率,同时加快肌肉蛋白质沉积,提升肌肉品质^[17]。在马禹龙^[18]的研究中,适宜水平(10.51—17.51 g/kg饲料)的精氨酸,显著增加了肌肉pH,提高了剪切力,从而增加了肌肉硬度。以上研究表明,饲料中适量添加精氨酸能有效降低肌肉氧化程度,提升肌肉物理特性,从而显著改善鱼肉品质。

松浦镜鲤(*Cyprinus carpio* Songpu)是由中国水

产科学研究院黑龙江水产研究所研究团队培育而成^[19],后因其优越的抗寒能力及良好的抗逆性和快速生长的特性而备受养殖户青睐,日益成为一种主养鲤品种。松浦镜鲤是典型的杂食性鱼类,随着养殖业的持续发展和饲料资源的短缺,养殖户越来越多的使用高比例动植物蛋白替代鱼粉饲料以降低成本。但动植物蛋白源中仍缺乏精氨酸等一些必需氨基酸,而目前就鲤饲料中不同水平精氨酸添加及其对肌肉品质等方面的影响还没有太多相关报道。因此,本实验主要针对生长中期松浦镜鲤展开,通过设计不同梯度精氨酸添加量,探究其对生长中期松浦镜鲤生长及肌肉品质的作用,以寻求鲤饲料中精氨酸最适需求量。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

本实验饲料中的蛋白源以鱼粉、菜籽粕及玉米蛋白粉为主,主要糖源为玉米淀粉和次粉,豆油作为脂肪源,采用单因素梯度配方分别配制6组等氮等能半精制饲料(表1)。晶体精氨酸(L-精氨酸,99%)购自河南万邦生物技术有限公司。精氨酸添加设计梯度为0、0.35%、0.70%、1.05%、1.40%和1.75% (L-精氨酸等氮替代L-丙氨酸)。精氨酸含量采用(GB/T 18246-2019)法测定^[20]。经检测,精氨酸占饲料百分比分别为0.71%、1.06%、1.41%、1.76%、2.11%和2.46%。饲料氨基酸配比详见表2。将饲料原料充分粉碎过80目筛网,进行配比称重,混匀后挤成条状饲料常温风干,装袋前制成3 mm小颗粒饲料,保存于冰箱(-20℃)。

1.2 实验鱼及饲养管理

实验为期56d,初期挑选540尾初始体质量为(298.89±15.30) g松浦镜鲤饥饿24h,分别置于18个网箱中,规格为1.0 m×2.0 m×2.0 m,随机分成6组,每组3个重复,每个重复30尾鱼,分别投喂不同精氨酸配比饲料持续饲养56d(养殖时间从2021年7月中旬至2021年9月中旬)。实验采用固定日投喂率(日投喂率为4% BW/d)的方法进行。每天定点投喂,分别为08:00 am、13:00 pm和17:30 pm。每两周测定一次实验鱼体质量并调整投喂量。实验期间水温在28—32℃,溶解氧为6.0 mg/L左右,pH为7.6—8.0。

1.3 样本采集

在养殖结束时,禁食24h后进行称重,统计并记录实验鱼成活数量;以养殖箱为单位随机选取3尾鱼,先用30 mg/L的MS-222麻醉,并测量其体质量及体长度,随后取鱼体侧线上方背部肌肉,在液氮

中立即冷冻, 1份储存在 -20°C 用于肌肉质构参数及抗氧化指标测定, 一份储存在 -80°C 用于分子分析。

1.4 实验方法

生长指标计算

增重率(WGR, %)=(末均重-初均重)/初均重 $\times 100$;

蛋白质效率(PER)=(末均重-初均重)/(饲料摄

取干重 $\times$ 饲料蛋白含量);

特定生长率(SGR, %/d)=[ln(末均重)-ln(初均重)]/实验周期 $\times 100$;

饲料系数(FCR)=饲料摄取干重/(末均重-初均重);

肌肉质构参数测定方法 采用质构检测分析仪Food Technology Corporation TPA (美国), 进行肌肉样品质构和剪切力测试。具体TPA 检测参数设置详见说明书。

离心失水: 背白肌0.5 g左右置于离心管, 离心机 4°C , 2000 r/min 离心30min, 擦干水分后称重并计算失水率。

蒸煮损失: 背白肌0.5 g左右置于容器中, 75°C 水浴锅, 水浴10min, 擦干水分后称重并计算蒸煮损失率。

pH测定: 肌肉样品0.5 g左右, 加10 mL蒸馏水

表 1 饲料配方和营养构成(干物质基础, %)

Tab. 1 Feed formulation and nutritional composition (dry matter basis, %)

项目 Item	饲料精氨酸水平 Dietary arginine level					
	0.71	1.06	1.41	1.76	2.11	2.46
鱼粉Fish meal	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
菜籽粕Rapeseed meal	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
玉米淀粉Cornstarch	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
玉米蛋白粉Corn gluten meal	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
次粉Subflour	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
豆油Soybean oil	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	15.59	15.59	15.59	15.59	15.59	15.59
氯化胆碱Choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
磷酸二氢钙Calcium dihydrogen phosphate	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
维生素预混料Vitamin premix	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
微量元素预混料Trace element premix	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
氨基酸预混料Amino acid premix	9.30	9.30	9.30	9.30	9.30	9.30
L-丙氨酸L-alanine	1.75	1.40	1.05	0.70	0.35	0.00
L-精氨酸L-arginine	0.00	0.35	0.70	1.05	1.40	1.75
营养水平Nutrient level						
粗蛋白Crude protein	28.11	28.11	28.11	28.11	28.11	28.11
粗脂肪Crude fat	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63	5.63
粗灰分Crude ash	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74	5.74

注: (1)维生素预混料(每千克饲料提供): 维生素A 8000 IU, 维生素C 500 mg, 维生素D₃ 3000 IU, 维生素E 60 mg, 维生素K₃ 5 mg, 维生素B₂ 30 mg, 维生素B₆ 15 mg, 维生素B₁₂ 0.5 mg, 氯化胆碱 5000 mg, 烟酸 175 mg, D-生物素 2.5 mg, 肌醇 1000 mg, 叶酸 5 mg, 泛酸 50 mg; (2)矿物质预混料(每千克饲料提供): 锌 25 mg, 铜 3 mg, 铁 25 mg, 锰 15 mg, 碘 0.6 mg, 钴 0.1 mg, 硒 0.4 mg; (3)饲料配制标准: 主要参照国家研究委员会(NRC): 鱼和虾的营养需求及本课题组前期研究^[21-23]

Note: (1) Vitamin premix (provided per kg of feed): VA 8000 IU, VC 500 mg, VD₃ 3000 IU, VE 60 mg, VK₃ 5 mg, VB₂ 30 mg, VB₆ 15 mg, VB₁₂ 0.5 mg, choline chloride 5000 mg, nicotinic acid 175 mg, D-biotin 2.5 mg, inositol 1000 mg, folic acid 5 mg, pantothenic acid 50 mg; (2) Mineral premix (provided per kg of feed): zinc (Zn) 25 mg, copper (Cu) 3 mg, iron (Fe) 25 mg, manganese (Mn) 15 mg, Iodine (I) 0.6 mg, cobalt (Co) 0.1 mg, selenium (Se) 0.4 mg; (3) Feed formulation standards: mainly based on the National Research Council (NRC): Nutritional Requirements of Fish and Shrimp and the previous research of the group^[21-23]

表 2 基础饲料氨基酸构成(干物质基础, %)

Tab. 2 Amino acid composition of basal feed (dry matter basis, %)

项目Item	鱼粉-菜籽粕-次粉-玉米蛋白粉提供 Fishmeal-Rapeseed meal-Corn gluten meal provided	氨基酸混合28%肌肉物提供 Amino acid 28% muscle mixture supply	28%肌肉蛋白提供 28% muscle protein supply	基础饲料提供 Basic feed provision
蛋氨酸Methionine	0.49	0.29	0.78	0.71
赖氨酸Lysine	0.51	1.98	2.49	2.49
精氨酸Arginine	0.71	0	1.67	1.05
组氨酸Histidine	0.40	0.65	1.05	1.05
异亮氨酸Isoleucine	0.72	0.15	0.87	0.87
亮氨酸Leucine	2.26	0	1.22	2.26
苯丙氨酸Phenylalanine	1.02	1.23	2.25	2.25
苏氨酸Threonine	0.62	1.67	2.29	2.29
缬氨酸Valine	0.85	0.39	1.24	1.24
丙氨酸Alanine	1.67	0.06	1.54	1.54
谷氨酸Glutamic acid	3.58	0.00	3.58	4.24
甘氨酸Glycine	0.61	0.54	1.15	1.15
天冬氨酸Aspartic acid	1.12	1.71	2.83	2.83
丝氨酸Serine	0.97	0.01	0.98	0.98
半胱氨酸Cysteine	0.21	0.17	0.38	0.38
酪氨酸Tyrosine	0.71	0.25	0.96	0.96
脯氨酸Proline	0.64	0.20	0.84	0.84

研磨成匀浆, 离心机4℃, 4500 r/min 离心10min, 取上清测定pH。

肌肉色泽: 每个网箱采集3块肌肉(1 cm×1 cm×0.5 cm), 用色差仪(GEB-104 Pantone Color-Cue)垂直检测肌肉表面L*、a*和b*值。具体操作见说明书。

肌肉HE染色切片 每个网箱随机采集6尾实验鱼, 用30 mg/L的MS-222麻醉采样品1 cm³, 并做石蜡切片并进行HE染色。使用拍照显微镜(Eclipse Ci-L)对肌纤维直径、肌纤维总面积、肌纤维参数测量分析, 并计算出单个肌纤维的面积和肌纤维密度。

肌肉抗氧化指标测定 粗酶液的制备: 肌肉用冰生理盐水漂洗, 除去血液并擦干水分, 加入9倍肌肉组织块质量的预冷匀浆介质(0.9%生理盐水)进行匀浆处理, 离心机4℃ 4500 r/min离心15min, 取上清后置于一20℃备用。

肌肉中超氧化物歧化酶采用上海酶联生物科技有限公司的试剂盒测定, 其余抗氧化指标包括过氧化氢酶、过氧化物酶、谷胱甘肽及丙二醛均采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定。

1.5 肌肉蛋白合成相关基因表达测定

利用TRIzol法提取各组组织总RNA, 参照说明书将总RNA反转录为cDNA。

根据GenBank中鲤基因序列设计引物(表3), 并

表3 实验用引物

Tab. 3 Primers for experiment

基因名称Gene name	引物序列Primer sequence (5'—3')
雷帕霉素靶蛋白 <i>tor</i>	CCACAACGCAGCCAACAA GCCACAGAATAGCAACCCT
蛋白激酶B <i>akt</i>	GGTGTGTTCAAGTTCACCGTCT TCCTCACCCAGCTCTCCA
S6蛋白激酶1 <i>s6k1</i>	GCCAATCTCAGCGTTCTCAAC CTGCCTAACATCATCCTCCTT
4E结合蛋白1 <i>4ebp1</i>	GCTACCTCAGCACTATTGC3 TTCTTGCTTGTCACCTCTG
叉头框蛋白O1 <i>foxo1</i>	CCAAGAGCAGAGGACGAG CATCAATAAAGGGCGAGA
<i>β-actin</i>	GGCAGGTCATCACCATCGG TTGGCATACAGGTCTTTACGG

表4 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤生长性能及饲料利用的影响

Tab. 4 Effects of dietary arginine level on growth performance and feed utilization of Songpu mirror carp

组别Group	初始体重IBW (g)	终末体重FBW (g)	增重率WGR (%)	特定生长率SGR (%/d)	饲料系数FCR	蛋白质效率PER
0.71%	298.67±20.48	524.55±31.63 ^b	75.71±2.08 ^c	1.01±0.03 ^c	2.37±0.07 ^a	1.17±0.04 ^a
1.06%	306.22±19.51	558.68±19.81 ^{ab}	82.75±8.57 ^{bc}	1.08±0.09 ^{bc}	2.06±0.21 ^{bc}	1.18±0.06 ^a
1.41%	286.22±12.39	564.81±19.79 ^a	97.39±3.15 ^a	1.21±0.03 ^a	1.75±0.06 ^d	1.24±0.02 ^a
1.76%	302.67±6.93	563.66±5.89 ^a	86.27±2.81 ^b	1.11±0.03 ^b	1.95±0.06 ^{cd}	1.20±0.06 ^a
2.11%	295.33±23.67	536.83±19.33 ^{ab}	82.23±8.47 ^{bc}	1.07±0.08 ^{bc}	2.20±0.11 ^{ab}	1.14±0.05 ^{ab}
2.46%	304.22±4.91	539.69±14.69 ^{ab}	77.38±2.33 ^{bc}	1.02±0.03 ^{bc}	2.27±0.04 ^a	1.07±0.07 ^b

注: 表中数据为3个重复的平均值; 同一行相同右上角含有相同英文上标字母或无上标表示无显著差异($P \geq 0.05$); 下同

Note: Data are means of triplicates. Means in each bar sharing the same superscript letter or absence of superscripts indicate no significant difference determined by Tukey's test ($P \geq 0.05$); the same applies below

交由生工生物工程(上海)股份公司合成。实时荧光定量PCR反应根据SYBR[®] Premix Ex Taq[™] (Tli RNaseH Plus)(Code: RR420A)试剂盒说明书进行, 采用SYBR Green染色法, 在Applied Biosystems 7500 Real Time PCR System实时PCR检测系统下进行。

1.6 数据统计

数据均使用SPSS23.0统计软件进行单因素方差分析, 以平均值±标准差表示。当采用Duncan's法多重比较时, 则差异达到显著水平($P < 0.05$)。同时依据生长性能相关指标, 采用二次曲线回归分析方法, 确定生长中期松浦镜鲤饲料最适精氨酸需求量。

2 结果

2.1 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤生长性能及饲料利用的影响

松浦镜鲤的增重率、特定生长率及蛋白质效率随精氨酸添加量增加呈现先上升后下降的变化趋势(表4), 其中1.41%组的增重率及特定生长率显著高于其余各组($P < 0.05$), 蛋白质效率显著高于2.11%和2.46%组($P < 0.05$)。但饲料系数则呈相反趋势, 1.41%组饲料系数显著低于除1.76%组外的其余各组($P < 0.05$)。

对松浦镜鲤的增重率、特定生长率及饲料系数与饲料精氨酸水平进行二次曲线回归分析结果如下(图1):

增重率(y_1)与饲料精氨酸水平(x)的二次回归方程为 $y_1 = -19.12x^2 + 60.195x + 42.951$ ($R^2 = 0.6899$), 当饲料精氨酸水平为1.57%, 增重率最大, 为90.33%。

特定生长率(y_2)与饲料精氨酸水平(x)的二次回归方程为 $y_2 = -0.1848x^2 + 0.5824x + 0.6893$ ($R^2 = 0.7024$), 当饲料精氨酸水平为1.58%, 特定生长率最大, 为1.15%/d。

饲料系数(y_3)与饲料精氨酸水平(x)的二次回归

方程为 $y_3=0.597x^2+1.8861x+3.3791$ ($R^2=0.782$), 当饲料精氨酸水平为1.58%, 饲料系数最低, 为1.89。

2.2 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉营养成分的影响

松浦镜鲤肌肉中的水分和粗蛋白随饲料精氨酸水平的增加呈先升高后降低的变化关系(表 5),

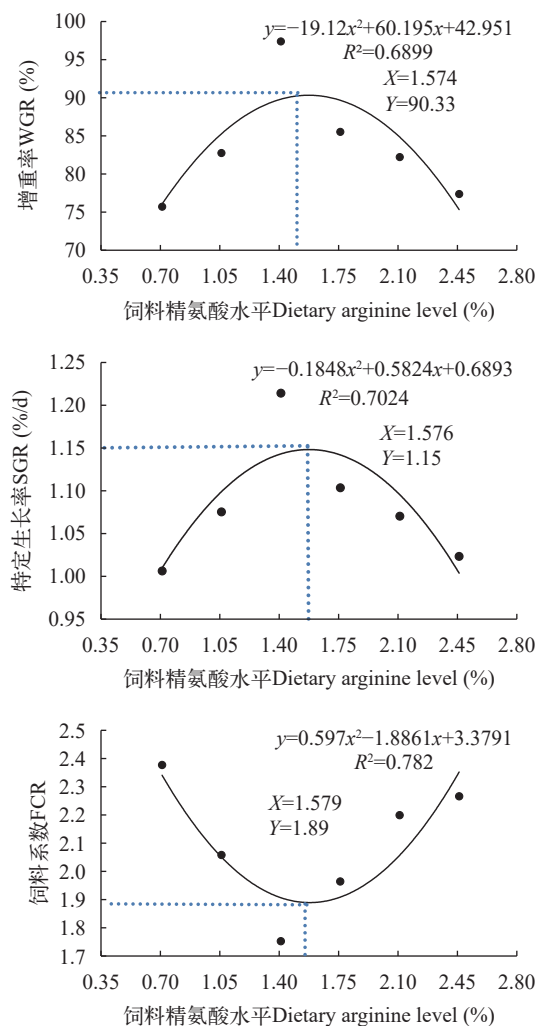


图 1 松浦镜鲤增重率、特定生长率及饲料系数与饲料精氨酸添加量的关系

Fig. 1 Relationship between weight gain rate, specific growth rate and feed coefficient and dietary arginine addition in Songpu mirror carp

具体表现为水分和粗蛋白含量在1.76%和1.41%组较其余各组更高; 粗脂肪的变化趋势与之相反, 1.41%组粗脂肪数值下降最多, 含量最低。肌肉粗灰分含量较其余各组没有显著差异($P>0.05$)。

2.3 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉质构参数及剪切力的影响

松浦镜鲤的肌肉硬度、内聚性、胶黏性、弹性、咀嚼性及剪切力随饲料精氨酸水平的上升与生长性能变化趋势相同(表 6), 具体表现为硬度、弹性、咀嚼性及剪切力等均在1.41%组数值最大, 其中硬度及剪切力显著高于2.46%组($P<0.05$), 而弹性和咀嚼性显著高于0.71%和2.46%组($P<0.05$)。此外, 内聚性和胶黏性则在1.76%组时最佳, 内聚性显著高于0.71%和1.06%组($P<0.05$), 胶黏性显著高于0.71%和2.46%组($P<0.05$)。

2.4 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉失水率及pH的影响

松浦镜鲤的肌肉离心和蒸煮水分流失量随饲料精氨酸添加量升高呈先下降后上升的变化趋势, 并在1.41%组处于最低水平。其中离心失水率显著低于0.71%和2.46%组($P<0.05$), 而蒸煮失水率未与其余各组产生显著差异($P>0.05$)。各组间肌肉pH也无显著差异($P>0.05$; 图 2)。

2.5 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌纤维特性的影响

随着饲料精氨酸水平的上升, 松浦镜鲤的肌纤维直径呈现先下降后上升的变化趋势。添加1.41%

表 5 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉营养成分的影响

Tab. 5 Effect of dietary arginine level on muscle nutrient composition of Songpu mirror carp

组别 Group	水分 Moisture (%)	粗蛋白 Crude protein (%)	粗脂肪 Crude fat (%)	粗灰分 Crude ash (%)
0.71%	78.24±0.08 ^b	9.30±0.41 ^b	1.63±0.32 ^a	1.23±0.07
1.06%	78.89±0.12 ^{ab}	10.27±0.41 ^{ab}	0.98±0.13 ^c	1.27±0.12
1.41%	78.89±0.41 ^{ab}	10.85±0.22 ^a	0.82±0.06 ^c	1.19±0.06
1.76%	79.28±0.16 ^a	10.23±0.36 ^{ab}	0.91±0.10 ^c	1.31±0.07
2.11%	78.88±0.28 ^{ab}	9.27±0.30 ^b	1.18±0.15 ^{ab}	1.27±0.02
2.46%	78.67±0.22 ^{ab}	8.84±0.50 ^c	1.19±0.19 ^{ab}	1.21±0.06

表 6 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉质构参数及剪切力的影响

Tab. 6 Effects of dietary arginine level on muscle texture parameters and shear force of Songpu mirror carp

组别Group	硬度Hardness (N)	内聚性Cohesion	胶黏性Adhesion (N)	弹性Elasticity (mm)	咀嚼性Masticity (J)	剪切力Shear force (N)
0.71%	6.05±1.96 ^{ab}	0.43±0.02 ^b	257.45±84.52 ^{bc}	0.68±0.07 ^c	177.33±73.48 ^c	25.01±4.36 ^{ab}
1.06%	8.13±3.41 ^{ab}	0.43±0.06 ^b	336.04±113.63 ^{abc}	0.83±0.06 ^{ab}	277.56±98.67 ^{ab}	26.78±8.70 ^{ab}
1.41%	8.76±4.41 ^a	0.50±0.04 ^a	420.41±124.07 ^{ab}	0.89±0.09 ^a	376.57±119.51 ^a	30.80±10.57 ^a
1.76%	8.41±2.59 ^a	0.51±0.06 ^a	453.18±262.21 ^a	0.83±0.05 ^{ab}	374.82±217.37 ^a	30.65±13.44 ^a
2.11%	6.84±2.69 ^{ab}	0.46±0.05 ^{ab}	315.17±137.93 ^{abc}	0.81±0.13 ^{ab}	263.19±137.18 ^{ab}	21.18±8.28 ^{ab}
2.46%	4.57±1.47 ^b	0.45±0.06 ^{ab}	207.84±73.34 ^c	0.73±0.08 ^{bc}	152.06±61.25 ^c	16.38±6.28 ^b

精氨酸组肌纤维直径最小, 显著小于0.71%、2.11%和2.46%组各组数值($P<0.05$), 但肌纤维密度变化趋势与之相反, 1.41%组密度较除1.76%组外其余各组明显更大($P<0.05$; 图3)。

2.6 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉色泽的影响

松浦镜鲤肌肉色泽 L^* 和 b^* 值随饲料中精氨酸水平的增加呈先下降后上升的变化趋势, L^* 值和 b^* 值分别在1.76%组和1.41%组显著降低($P<0.05$), 而 a^* 值变化趋势与之相反, 1.41%组数值高于其余各组但无显著差异性($P>0.05$; 图4)。

2.7 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉抗氧化能力的影响

随着饲料精氨酸水平上升, 松浦镜鲤肌肉中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性、谷胱甘肽(GSH)及总抗氧化能力(T-AOC)浓度呈先上升后下降的变化趋势, 均在1.41%组时显著高于其他对照组($P<0.05$)。SOD活性显著高于0.71%和1.06%组($P<0.05$), POD活性显著高于0.71%组($P<0.05$), CAT活性显著高于2.46%组($P<0.05$), GSH活性显著高于其余各组($P<0.05$), T-AOC显著高于0.71%和1.06%组($P<0.05$)。但肌肉中丙二醛(MDA)含量随精氨酸水平提高降低, 1.41%组含量最低, 各组间无显著差异($P>0.05$; 图5)。

2.8 肌肉蛋白合成相关基因表达

随着饲料精氨酸水平的上升, 松浦镜鲤肌肉中雷帕霉素靶蛋白(*tor*)、蛋白激酶B(*akt*)、S6蛋白激酶1(*s6k1*)、4E结合蛋白1(*4ebp1*)及叉头框蛋白O1(*FOXO1*)的基因表达量均在1.41%组达到最高($P<0.05$), 其中*tor*表达量显著高于0.71%和1.06%组($P<0.05$), *akt*和*foxo1*表达量显著高于除1.76%外的其余各组($P<0.05$), *s6k1*表达量显著高于0.71%、1.06%

和2.46%组($P<0.05$), *4ebp1*表达量显著高于其余各组($P<0.05$; 图6)。

3 讨论

3.1 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤生长性能及饲料利用的影响

充足的蛋白质水平是维持松浦镜鲤正常生长的必备条件, 饲料蛋白不足会导致其生长低于正常水平。精氨酸是鱼类必需氨基酸, 对多种鱼类生长起着重要作用^[24]。但水产动物自身精氨酸合成能力较弱, 因此需要在饲料中补充一定水平的精氨酸以维持机体正常需求^[25]。在通常情况下, 精氨酸缺乏会减少机体蛋白质沉积从而减缓水生动物生长速度, 同时还会降低饲料转化率^[26]。本实验中分别以松浦镜鲤的增重率、特定生长率及饲料系数作为评价指标与饲料精氨酸水平进行二次曲线回归分析得出: 精氨酸添加量在1.41%—1.58%时, 对其生长性能影响效果最明显, 同时能够加快饲料转化率, 促进鱼体发育。类似的报道还有很多, 李晋南等^[27]研究发现, 饲料精氨酸添加量在1.8%—2.4%时, 能明显提高幼鱼肠道消化吸收和组织抗氧化能力, 有利于松浦镜鲤的肠道发育。在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[18]的研究中, 饲料中1.53%—1.79%的精氨酸能显著增加草鱼幼鱼的生长和肝脏抗氧化能力。

3.2 饲料精氨酸水平对肌肉营养成分及蛋白合成基因的影响

肌肉是鱼体主要营养物质沉积和可食用部分, 其营养水平是评价肉质的重要指标之一。据相关研究表明, 精氨酸水平能有效改善鱼体代谢, 提高能量利用效率, 促进鱼体内蛋白质合成和积累, 有

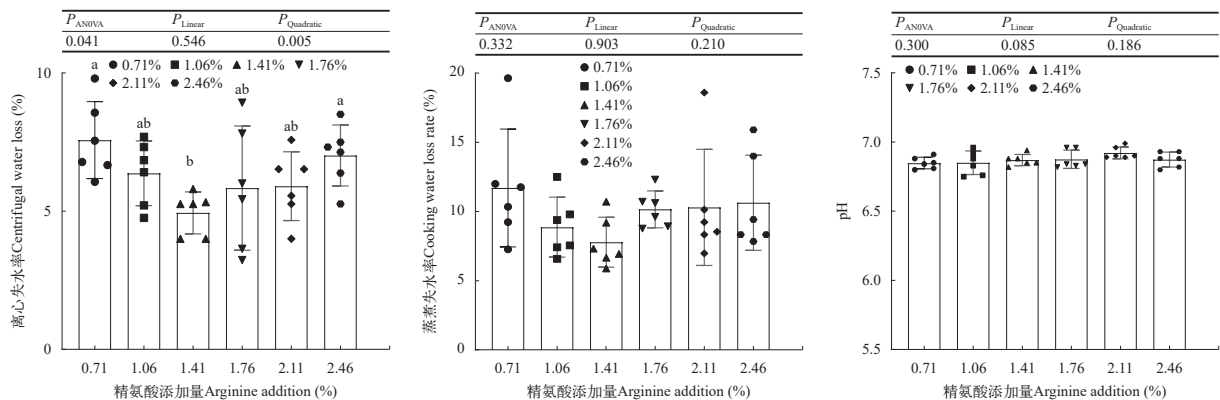


图2 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉失水率及pH的影响

Fig. 2 Effect of dietary arginine level on muscle water loss rate and pH value of Songpu mirror carp

字母不同表示同一时间各实验组之间存在显著性差异($P<0.05$); 下同

Different letters indicate significant differences in different experimental groups at the same time ($P<0.05$); the same applies below

利于鱼体的生长^[28]。黄石斑鱼^[8]的研究发现, 饲料中精氨酸含量低于干物质的2.8%时, 鱼体粗蛋白含量随精氨酸添加量的增加而提高。在印度鲤实验中, 饲料中添加1.67%的精氨酸能显著降低鱼体粗脂肪含量^[29]。在本实验中, 饲料中精氨酸添加水平在1.41%时, 能够明显增加肌肉粗蛋白含量, 降低粗脂肪和粗灰分含量的同时提高肌肉营养物质含量, 这与上述研究结果相近。

肌肉生长与蛋白质沉积密切相关, *tor*信号通路是调节蛋白质合成最重要的信号通路, 可对单细胞和多细胞生物中蛋白质合成和降解之间的平衡起到调节作用^[30]。而精氨酸代谢产生的谷氨酰胺和一氧化氮可能与激活肌肉的*mtor*信号途径相关。

因此, 饲料添加适宜水平精氨酸能够一定程度提高肌肉蛋白质含量^[31]。在本实验中, 1.41%组松浦镜鲤肌肉中*tor*、*akt*、*s6k1*、*4e-bp1*及*foxo1*的基因表达量较其余各组显著提高, 这与马禹龙^[18]研究结论相似, 即饲料中的精氨酸可能通过上调或抑制某些基因的表达水平, 达到促进肌肉蛋白沉淀和纤维生长, 改善肉质的目的。

3.3 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉质构、组织形态、系水力及肉色的影响

鱼类肌肉的质地和结构是重要的新鲜度属性, 其中主要包括硬度、内聚性、黏附性及剪切力等参数^[32]。而肌肉细胞间的结合力的增强可改善鱼体肌肉质构特性, 从而提升鱼肉口感^[33]。相关研究发现, 饲料中适量补充限制氨基酸能提高鲤肌肉质构参数, 改善肌肉品质^[34]。在本研究中, 精氨酸含量为1.41%时, 肌肉的硬度、弹性、咀嚼性及剪切力均高于其余对照组; 而内聚性和胶黏性在1.76%组处于最高水平。即饲料中添加1.41%—1.76%的精氨酸时, 对松浦镜鲤肌肉质构参数影响最明显, 肉质得到显著提高, 表明适量精氨酸可显著增加肌肉剪切力, 改善肌肉硬度, 提升肌肉品质。

肌纤维是骨骼肌的基本构成单位, 包括纤维密度和纤维直径等参数, 其特性很大程度上决定了肌肉品质。在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[35]中, 肌纤维直径与肉质嫩度呈负相关。徐丽媛等^[36]研究发现, 饲料补充精氨酸能显著降低羊肌肉纤维直径, 且使肌肉纤维密度升高。因此, 一定水平精氨酸能够起到降低肌纤维直径, 增大肌纤维密度, 达到提升肌肉嫩度的作用。在本实验中, 当饲料精氨酸水平在1.41%时, 松浦镜鲤的肌纤维直径最小, 而肌纤维密度最大, 鲤肉质较其余各组品质更高。这与Li等^[37]在南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)中的研究结果一致, 饲料中添加适量精氨酸可以降低肌纤维直径, 增加肌纤维密度, 提高虾肉嫩度, 改善虾肉品质。

肌肉系水力和pH也是反映鱼肉品质的重要指标之一, 其对肉的风味及肉色等都有重要的意义^[38]。其中pH与肌肉嫩度密不可分。研究表明, 肌肉中的乳酸产生量增加, pH下降, 则会导致肌肉品质下降^[39]。在杨书慧等^[40]的研究中, 饲料中添加0.5%的精氨酸时, 热应激肉鸡的滴水损失显著降低, 而pH未发生显著改变, 肌肉品质受热应激影响显著降低。本实验结果显示, 饲料精氨酸添加量为1.41%组时失水率最低, 但对肌肉pH并无明显影响, 表明饲料中添加适宜水平的精氨酸可通过降低肌肉失水率, 稳定肌肉pH, 达到改善肉质的目的。

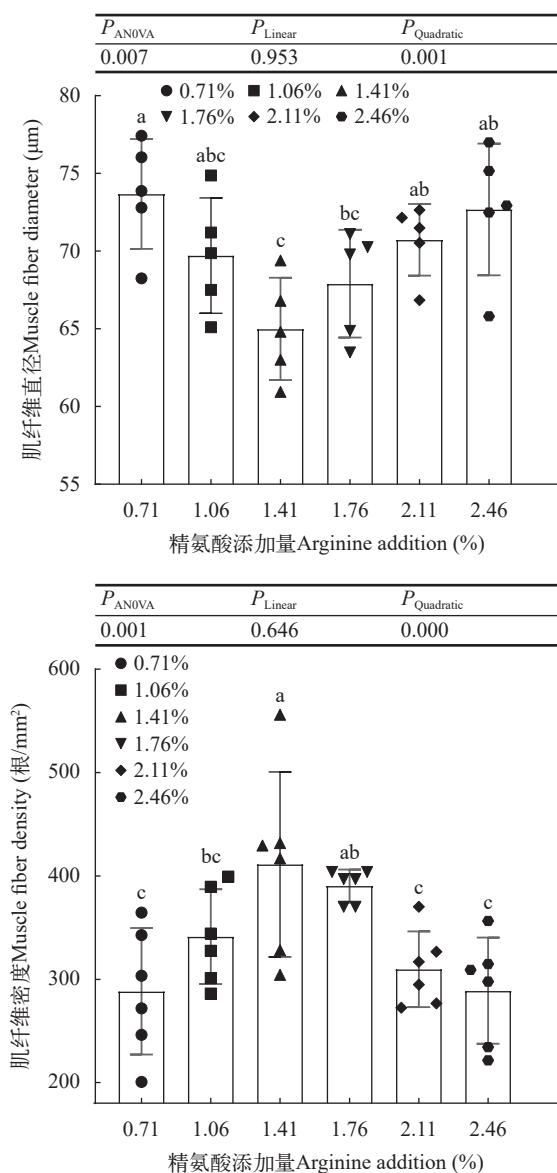


图3 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌纤维特性的影响

Fig. 3 Effect of dietary arginine level on myofiber characteristics of Songpu mirror carp

肉色是能反映肉品质最直观的评价标准,也是非常重要的肉质性状之一^[41]。目前肉色主要以红度(a^*)、黄度(b^*)和亮度(L^*)等参数为评价指标。其中, L^* 值代表肉色苍白程度,越高肉质越差。 a^* 值受肌红蛋白含量影响较大,主要反应肉的鲜红程度^[42],而 b^* 值则受肌肉产生硫化肌红蛋白量的影响,且与肉质呈负相关。精氨酸曾被证实是提高肉质的有效手段,Bao等^[43]的研究发现,在冷冻猪肉保存时,添加适量精氨酸显著增加了 a^* 值,降低了 b^* 值。而这可能与精氨酸可以消除自由基并螯合金属阳离

子,阻碍肌红蛋白氧化有关^[44]。在本研究中, L^* 值在精氨酸添加量为1.76%组时最小, b^* 值在1.41%组时最小,而肌肉 a^* 值在1.41%组时最大,表明当饲料中精氨酸添加水平为1.41%—1.76%时,肌肉色泽最好,品质最佳。

3.4 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉抗氧化能力的影响

鱼体氧化应激损伤程度评价指标主要取决于SOD、CAT、POD等酶的活性^[45]。氧化反应过程中所产生的MDA被视为机体氧化应激损伤的代表

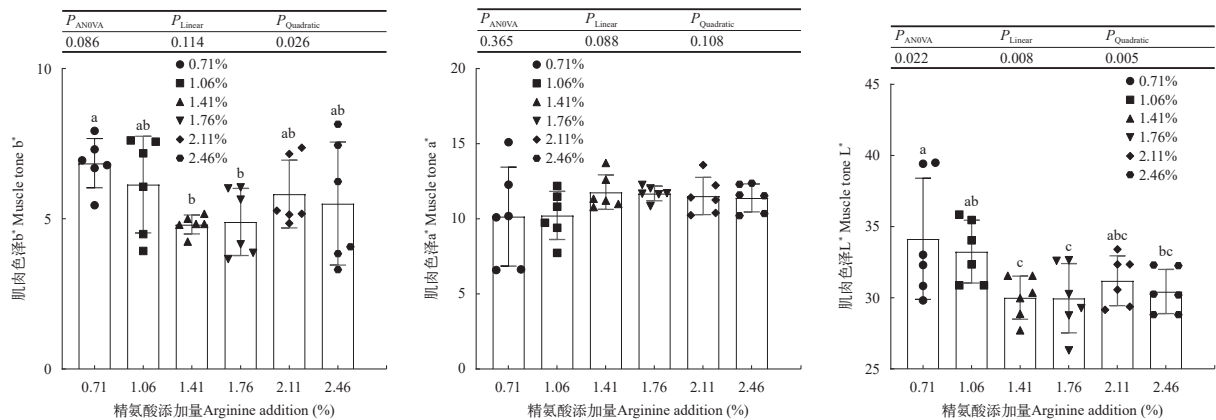


图4 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉色泽的影响

Fig. 4 Effect of dietary arginine level on muscle color of Songpu mirror carp

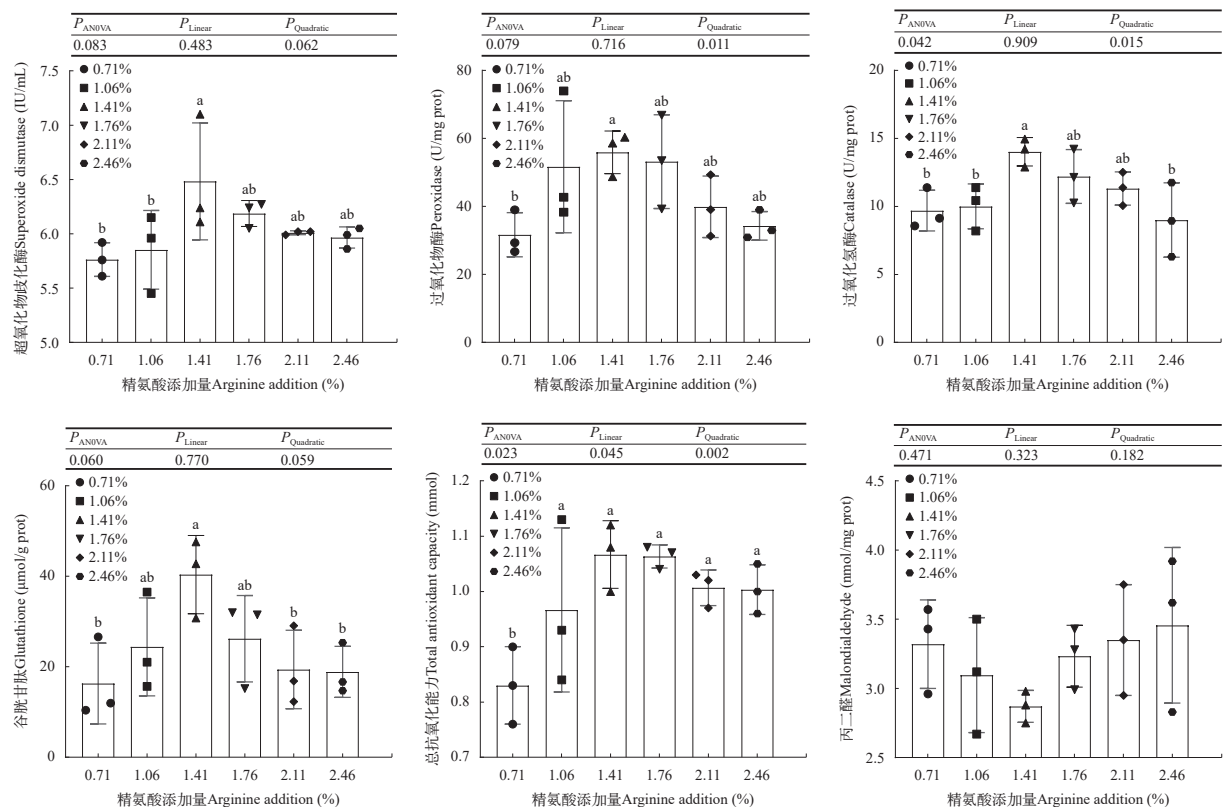


图5 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉抗氧化能力的影响

Fig. 5 Effect of dietary arginine level on the antioxidant capacity of Songpu mirror carp muscle

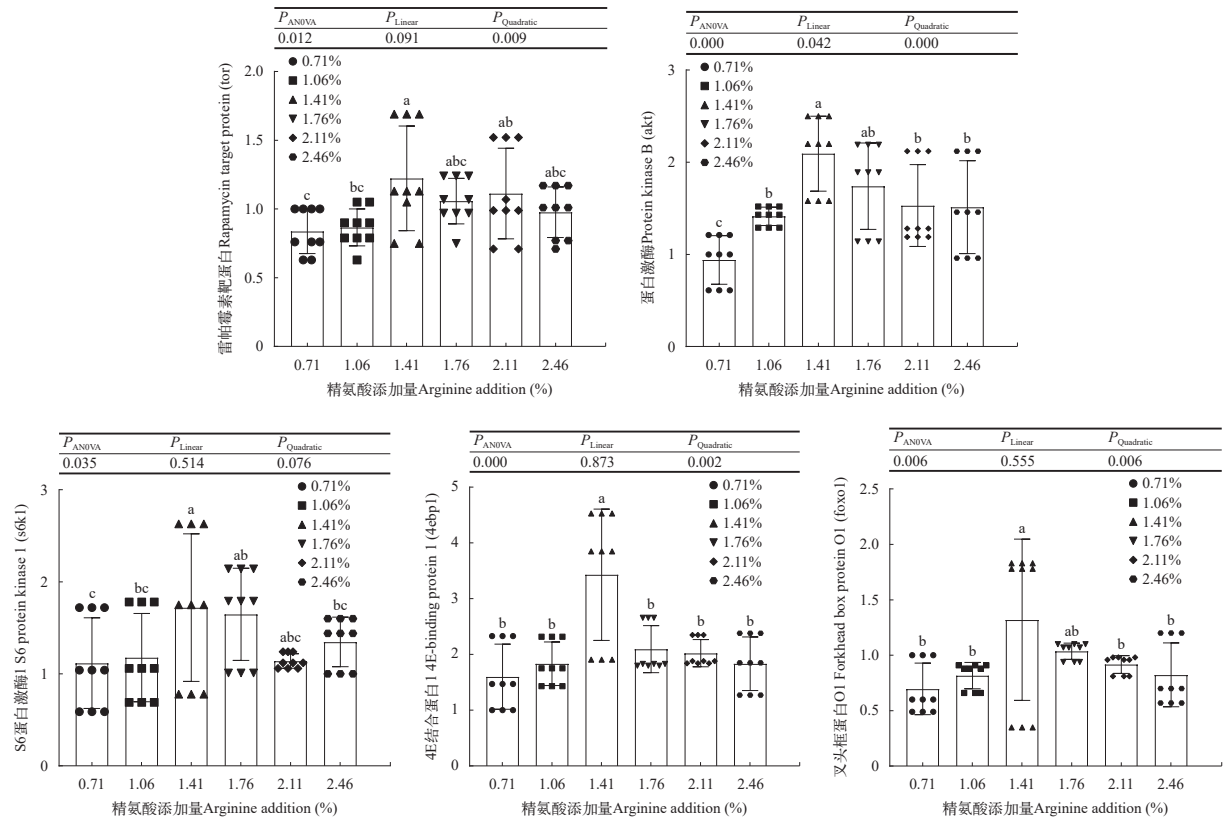


图6 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤肌肉蛋白合成相关基因的影响

Fig. 6 Effect of dietary arginine level on genes related to muscle protein synthesis in Songpu mirror carp

性产物。而细胞及动物机体出现氧化损伤,是由于GSH含量水平降低引起脂质过氧化作用加剧^[46]。研究表明,水生动物缺乏精氨酸会使机体抗氧化能力下降。Wang等^[47]的研究发现,饲喂精氨酸缺乏的饲料引起鱼体生长性能和抗氧化酶活性下降,同时肠道中MDA水平升高。在鲶(*Silurus asotus*)^[48]中,SOD活性随着精氨酸水平的提高而增强。这与本文结论相似,松浦镜鲤肌肉中SOD、POD和CAT活性及GSH、T-AOC浓度均在1.41%组最高,此时肌肉中MDA含量最低,表明饲料中适量补充精氨酸能明显改善生长中期松浦镜鲤肌肉抗氧化能力。目前已有研究证实,精氨酸对水生生物机体抗氧化能力的调控作用主要通过激活Nrf2信号通路实现^[49]。然而,精氨酸对生长中期镜鲤肌肉氧化应激损伤改善的具体作用机制尚不明确,有待展开深层探索。

4 结论

在本实验条件下,生长中期松浦镜鲤饲料中精氨酸的最适需求量为饲料干物质的1.41%—1.58%,此时增重率及特定生长率最大,饲料系数最低,能显著促进饲料蛋白向鱼体蛋白转化,加快肌肉蛋白沉积,促进鱼体生长发育,降低肌肉氧化应激损伤

的同时提高肌肉品质。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Lee S M, Park C S, Bang I C. Dietary protein requirement of young Japanese flounder *Paralichthys olivaceus* fed isocaloric diets [J]. *Fisheries Science*, 2002, **68**(1): 158-164.
- [2] Zhou F, Shao Q J. Research progress on essential amino acid nutrition in fish [J]. *Animal Agriculture*, 2010(8): 20-26. [周凡, 邵庆均. 鱼类必需氨基酸营养研究进展 [J]. 饲料与畜牧, 2010(8): 20-26.]
- [3] Li P J, Hou D Q, Zhao H X, et al. Effects of dietary arginine levels on intestinal morphology, digestive enzyme activity, antioxidant capacity and intestinal flora of hybrid snakehead (*Channa maculata* ♀ × *Channa argus* ♂) [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(25): 101244.
- [4] Azeredo R, Pérez-Sánchez J, Sitjà-Bobadilla A, et al. European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) immune status and disease resistance are impaired by arginine dietary supplementation [J]. *PLoS One*, 2015, **10**(10): e0139967.
- [5] Liu Y S. Effect of arginine on immunity in common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Journal of Aquaculture*, 2021, **42**(12): 43-44. [刘洋生. 精氨酸对鲤免疫力的影响 [J]. 水产养殖, 2021, **42**(12): 43-44.]
- [6] Yu Y Y, Huang D Y, Zhang L, et al. Dietary arginine

- levels affect growth performance, intestinal antioxidant capacity and immune responses in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2023(32): 101703.
- [7] Wang Q C, Xu Z, Ai Q H. Arginine metabolism and its functions in growth, nutrient utilization, and immunonutrition of fish [J]. *Animal Nutrition*, 2021, 7(3): 716-727.
- [8] Zhou Q C, Zeng W P, Wang H L, *et al.* Dietary arginine requirement of juvenile yellow grouper *Epinephelus awoara* [J]. *Aquaculture*, 2012(350): 175-182.
- [9] Chen G F, Feng L, Kuang S Y, *et al.* Effect of dietary arginine on growth, intestinal enzyme activities and gene expression in muscle, hepatopancreas and intestine of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2012, 108(2): 195-207.
- [10] Chen N S, Jin L N, Zhou H Y, *et al.* Effects of dietary arginine levels and carbohydrate-to-lipid ratios on mRNA expression of growth-related hormones in largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *General and Comparative Endocrinology*, 2012, 179(1): 121-127.
- [11] Neu D, Boscolo W, Zaminhan M, *et al.* Growth performance, biochemical responses, and skeletal muscle development of juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed with increasing levels of arginine [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2016, 47(2): 248-259.
- [12] Ren M C, Ai Q H, Mai K S. Dietary arginine requirement of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. *Aquaculture Research*, 2014, 45(2): 225-233.
- [13] Tu Y Q, Xie S, Han D, *et al.* Dietary arginine requirement for gibel carp (*Carassius auratus gibelio* var. CAS III) reduces with fish size from 50g to 150g associated with modulation of genes involved in TOR signaling pathway [J]. *Aquaculture*, 2015(449): 37-47.
- [14] Zhao Z X, Ren M C, Xie J, *et al.* Dietary arginine requirement for blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) with two fish sizes associated with growth performance and plasma parameters [J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017(17): 171-179.
- [15] Zhou X Q. Research Progress on Nutrition and Regulation of Fish Muscle Quality [C]. Animal Nutrition Branch of China Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine. Proceedings of the 10th National Congress and the 12th Academic Symposium of the Animal Nutrition Branch of China Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine. China Agriculture Press, 2016: 7. [周小秋. 营养与鱼类肌肉品质调控研究进展 [C]. 中国畜牧兽医学动物营养学分会. 中国畜牧兽医学动物营养学分会第十届全国代表大会暨十二届学术研讨会论文集. 中国农业大学出版社, 2016: 7.]
- [16] Liu J H, Deng K Y, Pan M Z, *et al.* Dietary carbohydrates influence muscle texture of olive flounder *Paralichthys olivaceus* through impacting mitochondria function and metabolism of glycogen and protein [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 21811.
- [17] Dou L, Sun L N, Liu C, *et al.* Effect of dietary arginine supplementation on protein synthesis, meat quality and flavor in growing lambs [J]. *Meat Science*, 2023(204): 109291.
- [18] Ma Y L. Effects of dietary arginine on growth performance and flesh quality of sub-adult grass carp and its mechanism [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2023: 66. [马禹龙. 饲料精氨酸对生长后期草鱼生产性能与肌肉品质的影响及作用机制 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2023: 66.]
- [19] Yang X L, Zhang Q, Li Z X, *et al.* Summary of the experimental model of high-efficiency cultivation of *Cyprinus carpio* Songpu ponds in the eastern region of Henan province [J]. *Scientific Fish Farming*, 2022(4): 82-83. [杨兴丽, 张芹, 李治勋, 等. 豫东地区松浦镜鲤池塘高效养殖模式试验总结 [J]. *科学养鱼*, 2022(4): 82-83.]
- [20] Chen Q M, Zhao H X, Huang Y H, *et al.* Effects of dietary arginine levels on growth performance, body composition, serum biochemical indices and resistance ability against ammonia-nitrogen stress in juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) [J]. *Animal Nutrition*, 2016, 2(3): 204-210.
- [21] Fan Z, Wu D, Li J N, *et al.* Dietary protein requirement for large-size Songpu mirror carp (*Cyprinus carpio* Songpu) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 26(5): 1748-1759.
- [22] Fan Z, Li J N, Zhang Y Y, *et al.* Excessive dietary lipid affecting growth performance, feed utilization, lipid deposition, and hepatopancreas lipometabolism of large-sized common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2021(8): 694426.
- [23] Jobling M. National research council (NRC): nutrient requirements of fish and shrimp [J]. *Aquaculture International*, 2012, 20(3): 601-602.
- [24] Tian Y, Liu C D, Wang X, *et al.* Effects of leucine and arginine supplements of low-protein diets on growth, digestion, immunity and target of rapamycin signaling pathway of juvenile turbot [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2024, 54(5): 33-43. [田原, 刘成栋, 王旋, 等. 低蛋白饲料添加亮氨酸、精氨酸对大菱鲆幼鱼生长、消化、免疫及mTOR信号通路的影响 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2024, 54(5): 33-43.]
- [25] Wilson R P. Amino Acids and Proteins [M]. Fish Nutrition. Amsterdam: Elsevier, 2003: 143-179.
- [26] Fagbenro O A, Nwanna L C, Adebayo O T. Dietary arginine requirement of the African catfish, *Clarias gariepinus* [J]. *Journal of Applied Aquaculture*, 1999, 9(1): 59-64.
- [27] Li J N, Zhang Y Y, Fan Z, *et al.* Effects of dietary arginine level on growth, antioxidant capacity, and intestinal digestive enzyme activity and histological structure in juvenile songpu mirror carp (*Cyprinus carpio* Songpu)

- [J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2021, **34**(5): 32-39. [李晋南, 张圆圆, 范泽, 等. 饲料精氨酸水平对松浦镜鲤幼鱼生长、抗氧化能力和肠道消化酶活性及其组织结构的影响 [J]. *水产学杂志*, 2021, **34**(5): 32-39.]
- [28] Deng H J, Liang W X, Zhang J C, *et al.* The effect of arginine on intestinal development and dietary protein utilization efficiency of *Plectropomus leopardus* [J]. *China Feed*, 2024(19): 90-96. [邓红进, 梁伟兴, 张佳程, 等. 精氨酸对豹纹鳃棘鲈肠道发育和饲料蛋白质利用效率的影响 [J]. *中国饲料*, 2024(19): 90-96.]
- [29] Zehra S, Khan M A. Dietary arginine requirement of fingerling Indian major carp, *Catla catla* (Hamilton) [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2013, **44**(3): 363-373.
- [30] Xiong Y, Sheen J. Rapamycin and glucose-target of rapamycin (TOR) protein signaling in plants [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2012, **287**(4): 2836-2842.
- [31] Li P, Yin Y L, Li D F, *et al.* Amino acids and immune function [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2007, **98**(2): 237-252.
- [32] Cheng J H, Sun D W, Han Z, *et al.* Texture and structure measurements and analyses for evaluation of fish and fillet freshness quality: a review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, **13**(1): 52-61.
- [33] Wang Y F, Wang M, Yin Y, *et al.* Effect of resveratrol on growth performance, muscle texture characteristics and physicochemical indices of Furong crucian carp [J]. *China Feed*, 2024(1): 113-118. [王永芳, 王敏, 尹月, 等. 白藜芦醇对芙蓉鲤生长性能、肌肉质构特性及其理化指标的影响 [J]. *中国饲料*, 2024(1): 113-118.]
- [34] Peng Z X, Yan L, Wei L B, *et al.* Effect of supplementation of fish meal-free diets with restrictive amino acids on flesh content, muscle nutrient composition and quality characteristics of comcarp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Feed Research*, 2022, **45**(16): 59-65. [彭祖想, 严林, 卫力博, 等. 无鱼粉饵料中补充限制性氨基酸对鲤含肉率、肌肉营养成分及质构特性的影响 [J]. *饲料研究*, 2022, **45**(16): 59-65.]
- [35] Hou C, Yang S M, Zhou Y, *et al.* Study on the histological features of muscle fiber in rainbow trout [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, **41**(9): 3902-3904. [侯粲, 杨曙明, 周宇, 等. 虹鳟肌肉纤维组织学特性研究 [J]. *安徽农业科学*, 2013, **41**(9): 3902-3904.]
- [36] Xu L Y. Effects of dietary arginine supplementation on muscle fiber characteristics and meat quality of sheep [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2022: 56. [徐丽媛. 日粮添加精氨酸对羊肉肌纤维特性及肉品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022: 56.]
- [37] Li M F, Wen H, Huang F, *et al.* Role of arginine supplementation on muscular metabolism and flesh quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) reared in freshwater [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022(9): 980188.
- [38] Zhang Y W, Luo H L, Jia H N, *et al.* Effect factors of water holding capacity of meats and its potential mechanism [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2012, **24**(8): 1389-1396. [张玉伟, 罗海玲, 贾慧娜, 等. 肌肉系水力的影响因素及其可能机制 [J]. *动物营养学报*, 2012, **24**(8): 1389-1396.]
- [39] Chen S, Feng Y R, Cao S P. Effects of pH value on quality of slaughter meat [J]. *Meat Industry*, 2009(6): 21-23. [陈松, 冯月荣, 曹淑萍. pH值对屠宰肉品质的影响 [J]. *肉类工业*, 2009(6): 21-23.]
- [40] Yang S H, Tan L L, Zhou J, *et al.* Effects of L-arginine on meat quality, antioxidative function, and energy metabolism of broilers under heat stress [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2014, **50**(19): 37-41. [杨书慧, 谭灵琳, 周建, 等. L-精氨酸对热应激肉鸡肌肉品质和抗氧化功能及能量代谢的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2014, **50**(19): 37-41.]
- [41] Fu L L, Guo X F, He Y T. A study on the assessment of meat colour of pork by spectrophotometric method and naked eye scoring method [J]. *Contemporary Animal Husbandry*, 2006(6): 45-46. [付亮亮, 郭雪峰, 何永涛. 分光光度法与肉眼评分法评定猪肉肉色的研究 [J]. *当代畜牧*, 2006(6): 45-46.]
- [42] Zheng M D, Liu X K, Feng M, *et al.* Detection and evaluation of muscle and egg quality of Liyang chicken [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2022, **54**(8): 20-26. [郑明德, 刘喜魁, 冯敏, 等. 溧阳鸡肌肉和鸡蛋品质的检测与分析评价 [J]. *畜牧与兽医*, 2022, **54**(8): 20-26.]
- [43] Bao P Q, Chen L, Wang Y, *et al.* Quality of frozen porcine Longissimus lumborum muscles injected with L-arginine and L-lysine solution [J]. *Meat Science*, 2021(179): 108530.
- [44] Xu P, Zheng Y, Zhu X, *et al.* L-lysine and L-arginine inhibit the oxidation of lipids and proteins of emulsion sausage by chelating iron ion and scavenging radical [J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018, **31**(6): 905-913.
- [45] Zhou K, Wu L F, Qu Z H, *et al.* Research progress on the effects of dietary lipid levels on the growth, antioxidant activities and fatty acid composition of fish [J]. *Feed Industry*, 2018, **39**(8): 26-31. [周锴, 吴莉莉, 瞿子惠, 等. 饲料脂肪水平对鱼类生长、抗氧化及脂肪酸组成影响的研究 [J]. *饲料工业*, 2018, **39**(8): 26-31.]
- [46] Wang L S, Li J N, Wu D, *et al.* Effects of air exposure and antioxidants on serum biochemical profiles, and antioxidant ability and quality of muscle of Songpu mirror carp *Cyprinus carpio* Songpu [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, **34**(6): 785-791. [王连生, 李晋南, 吴迪, 等. 空气暴露及抗氧化剂对鲤血清生化、肌肉抗氧化及品质的影响 [J]. *大连海洋大学学报*, 2019, **34**(6): 785-791.]

- [47] Wang L S, Li J N, Wang C A, *et al.* Effect of N-carbamoylglutamate supplementation on the growth performance, antioxidant status and immune response of mirror carp (*Cyprinus carpio*) fed an arginine-deficient diet [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019(84): 280-289.
- [48] Buentello J A, Reyes-Becerril M, de Jesús Romero-Geraldo M, *et al.* Effects of dietary arginine on hematological parameters and innate immune function of channel catfish [J]. *Journal of Aquatic Animal Health*, 2007, 19(3): 195-203.
- [49] Wang B, Liu Y, Feng L, *et al.* Effects of dietary arginine supplementation on growth performance, flesh quality, muscle antioxidant capacity and antioxidant-related signalling molecule expression in young grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Food Chemistry*, 2015(167): 91-99.

DIETARY ARGININE ON GROWTH AND MUSCLE QUALITY OF SONGPU MIRROR CARP (*CYPRINUS CARPIO* SONGPU) IN MID-GROWTH STAGE

GAO Yi-Qi^{1,2}, FAN Ze¹, CHENG Zhen-Yan², WU Di¹, WANG Lian-Sheng¹, LI Jin-Nan¹ and LI Chen-Hui^{1,3}

(1. Key Laboratory of Aquatic Animal Diseases and Immune Technology of Heilongjiang Province, Heilongjiang River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin 150070, China; 2. Tianjin Key Lab of Aqua-Ecology and Aquaculture, College of Fisheries, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. Inspection and Testing Center for Fishery Environment and Aquatic Products(Harbin), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150070, China)

Abstract: The study assessed the impact of dietary arginine supplementation on the growth performance, feed efficiency, muscle attributes, and antioxidant potential of Songpu mirror carp (*Cyprinus carpio* Songpu) during the mid-growth stage. Six semi-refined diets containing 28.11% crude protein were formulated with dietary arginine levels of 0.71%, 1.06%, 1.41%, 1.76%, 2.11%, and 2.46%. Each diet was fed to three replicate groups of carp with an initial body weight of (298.89±15.30) g for 56d. Results indicated that the weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR), and protein efficiency ratio (PER) exhibited an initial increase followed by a decrease as arginine levels in the feed rose, with the most pronounced enhancement occurring at 1.41% arginine. Conversely, the feed conversion ratio (FCR) demonstrated an opposite trend, showing significantly lower FCR ($P<0.05$) in the 1.41% group compared to the other groups except the 1.76% group. In the 1.41% arginine group, value in hardness, elasticity, chewiness, and shear force metrics were superior to the other groups. Furthermore, water loss rates for centrifugation and cooking in the 1.41% arginine group were the minimal and centrifugation water loss was significantly lower than those in the 0.71% and 2.46% groups ($P<0.05$). However, cooking loss rates did not vary significantly amongst groups ($P>0.05$). Myofibre diameter was notably reduced ($P<0.05$) in the 1.41% arginine group compared to those with 0.71%, 2.11%, and 2.46%, whereas myofibre density was significantly augmented ($P<0.05$) in other groups except for the 1.76% group. For muscle color, L^* value in the 1.76% group and b^* value in the 1.41% group were significantly lower than those in other groups ($P<0.05$). The a^* values exhibited an increasing trend, and highest value occurred in the 1.41% group ($P>0.05$). The activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), catalase (CAT) and contents of glutathione (GSH), and total antioxidant capacity (T-AOC) were significantly elevated ($P<0.05$) in the 1.41% cohort in contrast to the other groups, whereas malondialdehyde (MDA) content in the muscle reached the lowest level in the 1.41% group, showing no significant differences ($P>0.05$). The expression of rapamycin target protein (*tor*), protein kinase B (*akt*), S6 protein kinase 1 (*s6k1*), 4E-binding protein 1 (*4ebp1*), and forkhead box O1 (*foxo1*) was substantially upregulated in muscle in the 1.41% arginine group ($P<0.05$). Based on WGR, SGR and FCR as evaluation indexes, binomial regression model analysis showed that dietary arginine requirements for Songpu mirror carp in growth mid-stage were 1.41% to 1.58% of feed dry matter.

Key words: L-arginine; Growth; Antioxidant; Muscle quality; Songpu mirror carp