



核黄素对齐口裂腹鱼生长性能、体组成、免疫及抗氧化能力的影响

杨理想¹, 向 泉^{1*}, 周兴华¹, 陈 建¹, 罗 莉²

(1. 西南大学动物科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室,
水产科学重庆市市级重点实验室, 重庆 402460;
2. 西南大学动物科技学院, 重庆 400715)

摘要: 实验旨在探究不同核黄素水平对齐口裂腹鱼生长性能、体组成及免疫指标的影响; 以540尾健康的齐口裂腹鱼[体质量(10.54±0.01)g]为实验对象, 随机分为6组, 每组3个重复, 每个重复30尾。分别投喂核黄素水平为0.67、2.96、5.83、9.05、11.58和23.42 mg/kg的6种等氮等能的实验饲料, 养殖时间56 d。结果显示, 齐口裂腹鱼的增重率(WGR)、特定生长率(SGR)以及蛋白质效率(PER)均随核黄素添加水平升高呈先升后降趋势, 并均在5.83 mg/kg组达到最大且显著高于其余组; 饲料系数(FCR)呈先降后升趋势, 5.83 mg/kg组达到最低且显著低于其余组; 核黄素可显著影响实验鱼的成活率(SR)、肝体指数(HSI)和脏体指数(VSI); 核黄素可显著影响实验鱼全鱼粗脂肪含量, 但对其粗蛋白质、水分和粗灰分含量无明显影响。肝胰脏核黄素沉积量随着饲料核黄素水平的增加而升高; 肝胰脏D- α -氨基氧化酶(DAAO)活性在5.83 mg/kg组时达到最高。血清溶菌酶(LYZ)及过氧化氢酶(CAT)活性均随核黄素添加水平的提高而呈先升高后稳定的变化趋势。丙二醛(MDA)含量则随核黄素添加水平的提高而呈先降低后稳定的变化趋势。说明核黄素可有效地提高齐口裂腹鱼随饲料的消化利用率, 提高免疫及抗氧化能力, 促进其生长。综合考虑, 齐口裂腹鱼核黄素添加水平为5.32~5.89 mg/kg。

关键词: 齐口裂腹鱼; 核黄素; 生长性能; 体组成; 免疫; 抗氧化能力

中图分类号: S 963.73⁺¹

文献标志码: A

核黄素(维生素B₂)是一种B族水溶性维生素, 在鱼类的生长发育过程中具有重要作用。其辅酶形式为黄素单核苷酸(FMN)和黄素腺嘌呤二核苷酸(FAD), 它们在体内主要作为琥珀酸脱氢酶、脂酰辅酶A脱氢酶、谷胱甘肽还原酶等氧化还原酶的辅酶, 催化机体许多重要的氧化—还原反应, 完成底物和黄素蛋白之间1个或2个电子的转移^[1]。同时, 黄素腺嘌呤二核苷酸与特定蛋白结合形成黄素蛋白酶, 催化体内脱氢反应、羟化反应、氧化脱羧反应和双加氧反应等

许多生化反应, 影响动物体内蛋白质、脂肪和碳水化合物的代谢^[1]; 核黄素在少血管的组织(如眼部角膜和晶体)细胞能量代谢反应中发挥重要作用, 且在对光的适应性调节过程中, 核黄素对眼睛视网膜上色素的变化起重要作用^[1]。研究表明, 缺乏核黄素的鱼类一般会出现食欲减退和生长缓慢的症状^[2]。鲑属(*Salmo*)鱼类缺乏核黄素时, 生长缓慢, 出现畏光、白内障、出血及角膜新生血管等症状^[3-5]; 大鳞大麻哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)、虹鳟(*O. mykiss*)核黄素缺乏时体色

收稿日期: 2019-05-07 修回日期: 2019-10-11

资助项目: 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2013cyjA80033); 2015年西南大学青年基金

通信作者: 向泉, E-mail: xiangx@126.com

变深和身体平衡失调等情况^[4,6]。然而, Woodward^[7]在虹鳟幼鱼缺乏核黄素实验中并未发现以上症状, 但幼鱼缺乏核黄素却表现出严重的鳍部侵蚀、体色变浅和高死亡率的情况。Dupree^[8]发现斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)缺乏核黄素时会出现单侧及两侧的白内障。Murai等^[9]研究报道, 核黄素的缺乏仅会导致斑点叉尾鲷生长迟缓和体长变短。说明核黄素的缺乏症状与养殖鱼类的种类、生长阶段、环境、食性等有着密切的联系。目前, 核黄素对鲤(*Cyprinus carpio*)^[5], 虹鳟^[5,10-11]、杂交罗非鱼(*Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*)^[12]、斑点叉尾鲷^[13]、花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[14]、异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)^[15]、宝石鲈(*Scortum barcoo*)^[16]等的影响及其最适需求量已有相关研究。

齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)是长江上游的底栖冷水性鱼类, 以肉嫩味美著称, 其肌肉营养丰富, 是我国重要的经济鱼类。目前对于齐口裂腹鱼在蛋白质、脂肪等方面的需求已有一定研究^[17-18]。本实验旨在研究核黄素对齐口裂腹鱼生长性能、体组成、免疫及抗氧化能力的影响, 以补充和完善齐口裂腹鱼的营养学参数, 为配制健康高效的齐口裂腹鱼维生素预混料及其全价配合饲料提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用齐口裂腹鱼购自四川峨眉冷水渔场, 选用健康、无伤病的600尾鱼, 购回后用4%的食盐消毒后暂养备用; 实验用核黄素购自上海谱振生物有限公司, 其有效成分的质量分数为98%(以C₁₇H₂₀N₄O₆计)。

1.2 实验饲料

以酪蛋白(无维生素)和明胶作为饲料蛋白源, 鱼油和大豆油作为脂肪源, α-淀粉和玉米淀粉作为糖源设计不含核黄素的齐口裂腹鱼基础饲料配方, 在基础饲料中分别添加0、3、6、9、12、24 mg/kg核黄素, 配成6种等氮等能(蛋白质含量38.62%, 能量15.57 MJ/kg)的实验饲料。所有原料均过40目筛。按配方准确称重, 逐级放大并完全混匀后, 加适量水, 用实验室小型绞肉机(JR-22, 山东诸城市汇丰食品机械有限公司)制成1 mm的颗粒饲料, 于-20 °C条件下干燥密封保

存备用。经测定, 6种实验饲料中核黄素含量分别为0.67、2.96、5.83、9.05、11.58和23.42 mg/kg。基础饲料配方及营养成分见表1。

表1 基础饲料配方及营养成分含量(风干基础)

Tab. 1 Composition and nutrient level of foundation diets(air-dry basis)

原料 ingredient	风干重/% air-dry weight
酪蛋白 casein	34
明胶 gelatin	7
糊精 dextrin	9
α-淀粉 α-starch	15
玉米淀粉 maize starch	12
鱼油 fish oil	4
大豆油 soybean oil	4
纤维素 cellulose	10
维生素预混料(不含VB ₂) ¹ vitamin premix(no VB ₂)	1
矿物质预混料 ² mineral premix	1
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	2
氯化胆碱 choline chloride	1
营养成分 nutrition composition	
能量/(MJ/kg) energy	15.57
水分/% moisture	10.42
粗蛋白/% crude protein	38.62
粗脂肪/% crude lipid	8.51
粗灰分/% crude ash	5.26

注: 1. 预混料为每1 kg日粮提供的维生素, VA 30 000 IU, VC 200 mg, VD₃ 25 000 IU, VE 600 mg, VK 100 mg, VB₁ 5 mg, 烟酸 100 mg, 泛酸钙 120 mg, VB₆ 40 mg, VB₁₂ 0.2 mg, 生物素 7 mg, 叶酸 20 mg, 肌醇 250 mg。2. 预混料为每1 kg日粮提供的微量元素, FeSO₄·7H₂O 121.83 mg, CuSO₄·5H₂O 7.20 mg, MnSO₄·H₂O 5.16 mg, ZnSO₄·7H₂O 15.56 mg, KI 6.58 mg, NaSeO₃ 2.10 mg
Notes: 1. the premix provides vitamin for a kilogram of diets, VA 30 000 IU, VC 200 mg, VD₃ 25 000 IU, VE 600 mg, VK 100 mg, VB₁ 5 mg, nicotinic acid 100 mg, calcium pantothenate 120 mg, VB₆ 40 mg, VB₁₂ 0.2 mg, biotin 7 mg, folic acid 20 mg, inositol 250 mg. 2. the premix provides mineral for a kilogram of diets, FeSO₄·7H₂O 121.83 mg, CuSO₄·5H₂O 7.20 mg, MnSO₄·H₂O 5.16 mg, ZnSO₄·7H₂O 15.56 mg, KI 6.58 mg, NaSeO₃ 2.10 mg

1.3 实验设计

养殖实验设计 使用基础饲料(无核黄素)暂养7 d后, 选择无病无伤的齐口裂腹鱼540条[体质量(10.54±0.01)g], 随机分为6个实验组, 设1个对照组和5个处理组, 每个实验组设3个重复, 每个重复投放30尾鱼, 以重复为单位随机放

养于18个水池(长×宽×高=150 cm×100 cm×50 cm)中。分别投喂不同核黄素水平的实验饲料, 养殖时间共56 d。实验期间, 每天按实验鱼体质量的3%~5%(根据齐口裂腹鱼的摄食情况来调节投喂率)投喂饲料, 每天08:00、13:00、17:00各投喂1次。待实验鱼摄食结束后, 收集残饵, 烘干并称重; 实验期间保持微流水, 各实验水体每天的交换量为30%。实验期间平均水温为15~20 °C, 溶解氧高于6.0 mg/L, pH为7.0~7.5, 氨氮含量低于0.10 mg/L, 亚硝酸盐氮含量低于0.01 mg/L。

1.4 样品采集

实验结束后对实验鱼饥饿24 h, 对每实验组进行计数、称重。分别在各实验组中随机取10尾齐口裂腹鱼, 用50 mg/L的MS-222溶液麻醉, 分别测定其体长和体质量后, 取5尾实验鱼放入自封袋密封, 保存于-20 °C冰箱, 用于测定其体成分。其余5尾实验鱼用1 mL无菌注射器从鱼体尾静脉取血, 转移至1.5 mL的EP管中并离心(3 000 r/min)10 min后, 分离出血清, 在液氮中速冻后转移至-80 °C冰箱保存, 用于免疫指标及抗氧化指标的分析, 再将取血后的5尾实验鱼解剖, 分离出肠道和肝胰脏并称重, 用于计算脏体指数、肝体指数及肥满度等指标, 同时将肝胰脏在液氮中速冻后转移至-80 °C冰箱保存, 用于测定肝胰脏中核黄素含量及肝胰脏D-α-氨基氧化酶活性。

1.5 指标测定

生长及形体指标的测定 根据测定的数据计算实验鱼的增重率(weight gain rate, WGR)、特定生长率(specific growth rate, SGR)、蛋白质效率(protein efficiency ratio, PER)、饲料系数(feed conversion ratio, FCR)、肥满度(condition factor, CF)、肝体指数(hepatosomatic index, HSI)、脏体指数(viscerosomatic index, VSI), 根据统计的实验鱼死亡情况计算成活率(survival rate, SR)。计算公式:

$$\text{增重率(WGR, \%)} = (W_t - W_0) / W_0 \times 100\%$$

$$\text{特定生长率(SGR, \% / d)} = (\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$$

$$\text{蛋白质效率(PER, \%)} = (W_t - W_0) / F \times P \times 100\%$$

$$\text{饲料系数(FCR)} = F / (W_t - W_0)$$

$$\text{成活率(SR, \%)} = N_f / N_i \times 100\%$$

$$\text{肥满度(CF, g / cm}^3\text{)} = W_t / L^3 \times 100$$

$$\text{肝体指数(HSI, \%)} = W_h / W_t \times 100\%$$

$$\text{脏体指数(VSI, \%)} = W_v / W_t \times 100\%$$

式中, W_0 、 W_t 分别为实验鱼的初始体质量和终

末体质量(g); F 为饲料摄入量(g); P 为饲料粗蛋白质含量(%); L 为体长(cm); W_h 为鱼体肝质量(g), W_v 为鱼体内脏质量(g)。 N_f 、 N_i 分别为实验开始和结束时实验鱼的尾数; t 为养殖天数(d)。

体组成测定 饲料、组织的水分含量采用105 °C烘干法测定, 粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定, 粗脂肪含量采用索氏抽提法测定, 粗灰分含量采用550 °C灼烧法测定。

肝胰脏核黄素沉积量测定参考Callmer等^[19]的方法测定; 肝胰脏D-α-氨基氧化酶(DAAO)活性采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定。

非特异性免疫及抗氧化指标测定 血清溶菌酶(LYZ)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)及丙二醛(MDA)含量采用南京建成生物工程研究所的试剂盒测定。

1.6 数据分析

所有数据采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行分析, 若差异显著($P < 0.05$), 则进行Duncan氏多重比较。实验数据以平均值±标准差(mean±SD)表示。分别以核黄素的添加量为自变量(x), 齐口裂腹鱼SGR、FCR、PER及DAAO活性为因变量(y), 通过折线法(Broken-line analysis)确定齐口裂腹鱼对核黄素的最适需求量。

2 结果

2.1 核黄素对齐口裂腹鱼生长性能的影响

核黄素对齐口裂腹鱼生长性能影响显著, 随着核黄素添加水平的增加, 齐口裂腹鱼的WGR、SGR、PER均呈先升后降趋势, 并在5.83 mg/kg组达到最高(分别为472.17%、3.11%/d和184.38%) ($P < 0.05$), 分别较对照组(0.67 mg/kg组)提高了147.18%、62.83%和47.20% ($P < 0.05$)。随着核黄素添加水平的增加, FCR的变化趋势则与WGR、SGR、PER的变化相反, 当核黄素添加水平为5.83 mg/kg时, FCR达到最低值(1.39) ($P < 0.05$), 较对照组降低了32.20%。添加核黄素可显著提高齐口裂腹鱼的成活率, 且在核黄素添加水平为5.83 mg/kg时最高, 除与11.58 mg/kg组差异不显著外 ($P > 0.05$), 显著高于其余各实验组 ($P < 0.05$)。随着核黄素添加水平的增加, 实验鱼的HSI、VSI和CF均呈先上升后趋于稳定的趋势。且均在核黄素添加水平大于5.83 mg/kg后的差异不显著 ($P > 0.05$), 但明显高于0.67和2.96 mg/kg组 ($P < 0.05$) (表2)。

表2 饲料中核黄素含量对齐口裂腹鱼生长性能、饲料效率及形体指标的影响

Tab. 2 Effects of dietary riboflavin content on growth performance, feed efficiency rate and body profile indices of *S. prenanti*

项目 items	核黄素含量/(mg/kg) riboflavin content					
	0.67	2.96	5.83	9.05	11.58	23.42
初体质量/g IBW	10.56±0.02	10.57±0.03	10.53±0.02	10.51±0.02	10.53±0.02	10.53±0.03
末体质量/g FBW	30.72±0.23 ^a	43.69±0.51 ^b	60.23±1.12 ^c	53.86±0.34 ^d	50.37±1.4 ^{cd}	48.5±0.54 ^e
增重率/% WGR	191.02±1.69 ^a	313.52±5.35 ^b	472.17±10.69 ^c	412.45±4.11 ^d	378.19±13.76 ^{cd}	360.57±5.5 ^c
特定生长率/(%/d) SGR	1.91±0.01 ^a	2.53±0.02 ^b	3.11±0.03 ^c	2.92±0.01 ^d	2.79±0.05 ^{cd}	2.73±0.02 ^e
饲料系数 FCR	2.05±0.04 ^e	1.78±0.02 ^c	1.39±0.02 ^a	1.49±0.01 ^b	1.53±0.03 ^b	1.88±0.04 ^d
蛋白质效率/% PER	125.25±2.47 ^a	144.21±1.65 ^b	184.38±3.07 ^d	171.93±1.33 ^c	167.15±2.83 ^c	136.4±3.14 ^b
成活率/% SR	95.33±0.19 ^a	98.13±0.22 ^b	99.10±0.13 ^c	98.12±0.49 ^b	99.03±0.33 ^c	97.18±0.32 ^b
肝体指数/% HSI	1.06±0.03 ^a	1.23±0.03 ^b	1.42±0.05 ^c	1.37±0.05 ^c	1.38±0.03 ^c	1.33±0.03 ^c
脏体指数/% VSI	1.85±0.62 ^a	2.09±0.06 ^a	3.25±0.07 ^b	3.13±0.04 ^b	3.04±0.04 ^b	3.07±0.04 ^b
饱满度/(g/cm ³) CF	1.41±0.04 ^a	1.5±0.01 ^a	1.59±0.03 ^b	1.56±0.02 ^b	1.52±0.03 ^b	1.54±0.04 ^b

注: 同列肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 下同

Notes: in the same row, different small letter superscripts mean significant differences ($P<0.05$), the same below

通过折线模型分析齐口裂腹鱼的SGR、FCR、PER最优时饲料中核黄素的添加水平。齐口裂腹鱼获得最佳SGR时饲料的核黄素添加水平为5.32 mg/kg(图1); 齐口裂腹鱼获得最佳FCR时饲料的核黄素添加水平为5.89 mg/kg(图2); 齐口裂腹鱼获得最佳PER时饲料的核黄素添加水平为5.85 mg/kg(图3)。因此满足齐口裂腹鱼SGR、FCR、PER的最佳核黄素添加水平应为5.32~5.89 mg/kg。

2.2 核黄素对齐口裂腹鱼体组成的影响

实验鱼全鱼粗脂肪含量呈现明显的先升后降的变化趋势($P<0.05$)。且在5.83 mg/kg组达到最

高, 较对照组提高了32.51%。显著高于其余实验组($P<0.05$)。饲料中核黄素添加水平对齐口裂腹鱼全鱼的粗蛋白、水分、粗灰分的影响不显著($P>0.05$)。但在核黄素添加水平为5.83 mg/kg时, 实验鱼粗蛋白含量达到最高($P>0.05$)(表3)。

2.3 核黄素对齐口裂腹鱼肝胰脏核黄素沉积量及DAAO活性的影响

随着核黄素添加水平的提高, 齐口裂腹鱼的肝胰脏核黄素沉积量及DAAO活性均呈先上升后稳定的变化趋势(表4)。实验鱼肝胰脏核黄素沉积量在核黄素添加水平大于11.58 mg/kg后差异

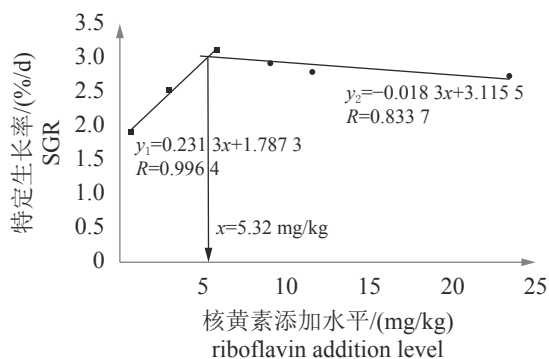


图1 齐口裂腹鱼特定生长率与核黄素添加水平的关系

Fig. 1 Relationship between *S. prenanti* specific growth rate and riboflavin addition level

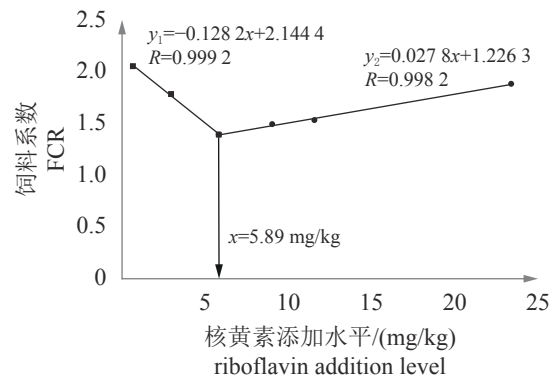


图2 齐口裂腹鱼饲料系数与核黄素添加水平的关系

Fig. 2 Relationship between *S. prenanti* feed conversion ratio and riboflavin addition level

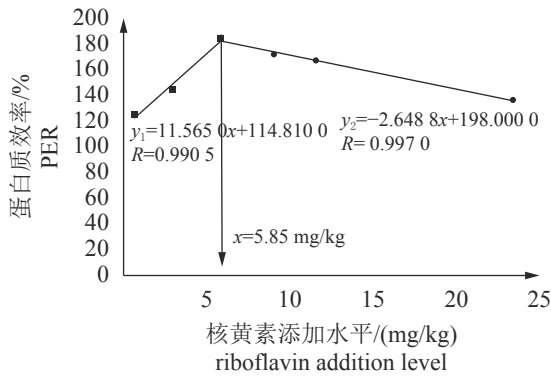


图3 齐口裂腹鱼蛋白质效率与核黄素添加水平的关系

Fig. 3 Relationship between *S. prenanti* protein efficiency ratio and riboflavin addition level

不显著 ($P>0.05$), 但明显高于其余各实验组 ($P<0.05$)。DAAO活性在核黄素添加水平大于5.83 mg/kg后差异不显著 ($P>0.05$), 但显著高于对照组和2.96 mg/kg组 ($P<0.05$)。以齐口裂腹鱼的DAAO活性为评价指标, 通过折线模型分析了其与核黄素水平之间的关系。其回归方程为 $y=0.4902(x-5.8333)+5.8978$ ($R=0.9979$), 当核黄素添加水平为5.83 mg/kg时, 齐口裂腹鱼肝胰脏DAAO活性最强(图4)。

2.4 核黄素含量对齐口裂腹鱼抗氧化能力及非特异性免疫指标的影响

随着核黄素添加水平的提高, 齐口裂腹鱼

LYZ及CAT活性均呈先升高后稳定的变化趋势。LYZ活性在5.83 mg/kg组达到最高, 且在核黄素添加水平大于5.83 mg/kg后无显著差异 ($P>0.05$), 但显著高于0.67~2.96 mg/kg组 ($P<0.05$)。CAT活性则在9.05 mg/kg组达到最高, 对5.83 mg/kg组及11.56~23.42 mg/kg组均无显著差异 ($P>0.05$), 而显著高于0.67~2.96 mg/kg组 ($P<0.05$)。实验鱼SOD活性则随着核黄素添加水平的提高而呈先升高后降低的变化趋势。且在5.83 mg/kg组达到最高, 除与9.05 mg/kg组差异不显著 ($P>0.05$)外, 显著高于其余各实验组 ($P<0.05$)。实验鱼血清MDA含量则随核黄素添加水平的提高呈先降低后稳定的变化趋势, 在核黄素添加水平大于5.83 mg/kg时差异不显著 ($P>0.05$), 但显著低于0.67~2.96 mg/kg组 ($P<0.05$) (表5)。

3 讨论

3.1 核黄素对齐口裂腹鱼生长性能的影响

核黄素缺乏会导致鱼类出现一系列缺乏症, Takeuchi等^[5]发现, 草鱼核黄素缺乏表现为增重率显著低于核黄素添加组, 并随着核黄素添加呈现先升后降的趋势。Halver^[1]发现核黄素缺乏的大鳞大麻哈鱼出现生长不良、皮肤发黑的现象。Woodward^[20]没有发现虹鳟体色变化, 但观察到有体色异常变浅的现象, 本实验中, 核黄素缺乏时齐口裂腹鱼增重率、饲料转化率

表3 饲料中核黄素含量对齐口裂腹鱼体成分的影响
Tab. 3 Effects of dietary riboflavin content on body composition of *S. prenanti*

项目 items	核黄素含量/(mg/kg) riboflavin content					
	0.67	2.96	5.83	9.05	11.58	23.42
水分 moisture	72.27±0.31	72.69±0.22	72.95±0.21	72.73±0.24	72.67±0.38	73.03±0.2 ^a
粗蛋白 crude protein	17.58±0.25	17.49±0.45	18.13±0.34	17.70±0.36	17.33±0.36	17.68±0.54
粗脂肪 crude lipid	7.66±0.07 ^a	8.50±0.24 ^{bc}	10.15±0.36 ^c	9.17±0.11 ^d	8.9±0.08 ^{cd}	8.12±0.14 ^{ab}
粗灰分 crude ash	2.49±0.12	2.32±0.11	2.49±0.05	2.31±0.1	2.35±0.11	2.49±0.09

表4 饲料添加不同核黄素水平对齐口裂腹鱼肝胰脏中核黄素含量及DAAO的影响
Tab. 4 Effects of dietary riboflavin content on hepatopancreas D-amino acid oxidase and riboflavin content in liver of *S. prenanti*

项目 items	核黄素含量/(mg/kg) riboflavin content					
	0.67	2.96	5.83	9.05	11.58	23.42
VB ₂ /(μg/g)	0.62±0.03 ^a	0.74±0.03 ^{ab}	0.78±0.03 ^b	0.95±0.06 ^c	1.18±0.05 ^d	1.22±0.03 ^d
DAAO/(U/g prot)	3.46±0.08 ^a	4.73±0.3 ^b	6.00±0.53 ^c	5.93±0.34 ^{bc}	5.7±0.42 ^c	5.95±0.25 ^c

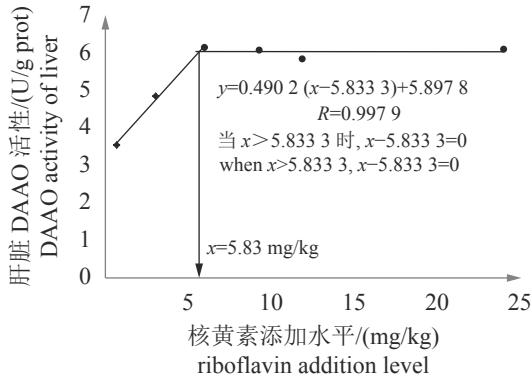


图4 齐口裂腹鱼肝脏DAAO活性与核黄素添加水平的关系

Fig. 4 Relationship between DAAO activity of liver and the addition level of riboflavin

和蛋白质效率显著低于添加组,但未出现体色差异,推测与实验鱼种类和生长阶段不同有关。鱼类缺乏核黄素导致生长缓慢的同时还会引起饲料系数下降和成活率降低,类似的结果也在虹鳟^[4]、斑点叉尾鲷^[8]、异育银鲫^[15]的相关研究中得到一致证实。说明适量的核黄素可提高饲料的转化率,促进鱼类生长。

有研究发现核黄素缺乏会导致小鼠的肝脏增大^[21-22]。Hughes等^[10]认为核黄素对虹鳟肝体指数、脏体指数无显著影响。本实验中,添加核黄素可使实验鱼的肝体指数和脏体指数增加,与上述研究结果有一定的差异。但Murai等^[9]在斑点叉尾鲷中的研究结果与本实验结果相似。核黄素对鱼体肝体指数、脏体指数的影响还有待于进一步的研究。

本实验齐口裂腹鱼生长性能最优时对核黄素的需求量为5.32~5.83 mg/kg,这与研究得出的宝石鲈(*Scortum barcoo*)(5.73 mg/kg)^[16]的最佳生长需求量相近,高于异育银鲫(3.76 mg/kg)^[15]、斑点叉尾鲷(4.30 mg/kg)^[13]及花鲈(4.89 mg/kg)^[14],略低

于大黄鱼(*Larimichthys crocea*)(6.23 mg/kg)^[14]。可能因为鱼类生长过程中所需的核黄素量与品种、规格、实验条件及评价指标等因素有关。

3.2 核黄素对齐口裂腹鱼肝胰脏核黄素沉积量及DAAO的影响

肝脏核黄素的沉积量是衡量鱼类核黄素需求量的一个重要指标^[1]。本实验结果表明,饲料核黄素水平显著影响齐口裂腹鱼肝胰脏核黄素的含量,而饲料中核黄素水平高于11.58 mg/kg时,对齐口裂腹鱼肝胰脏核黄素的含量没有显著影响。这与在虹鳟^[11]、斑节对虾(*Penaeus monodon*)^[23]中的研究结果相似,说明饲料中高添加水平的核黄素不会在肝脏累积。

DAAO具有广泛的底物特异性,除了酸性氨基酸D-谷氨酸和D-天门冬氨酸外,能使其余所有的D-氨基酸发生不同程度的氧化脱氨作用,从而完成氨基酸代谢^[11]。Woodward^[24]在对虹鳟的研究中发现,DAAO活性是评价核黄素需求量的更为敏感且稳定的指标。对奥利亚罗非鱼(*Oreochromis aureus*)^[12]、虹鳟^[5]、斑点叉尾鲷^[13]、大黄鱼^[14]及异育银鲫^[15]的研究发现,鱼类饲料中核黄素添加量与其肝脏D-氨基酸DAAO活性能较好地符合折线模型。本实验利用折线回归模型分析表明,实验鱼肝胰脏中DAAO最高时核黄素添加量为5.83 mg/kg,高于其特定生长率最高时的需求量(5.32 mg/kg)。这与对宝石鲈^[16]和阳光鲈(*Morone chrysops*♀×*M. saxatilis*♂)^[25]的研究结果相似。说明保证齐口裂腹鱼生理平衡所需的核黄素含量高于维持最佳生长所需的核黄素。

3.3 核黄素对齐口裂腹鱼抗氧化指标及非特异性免疫指标的影响

机体在呼吸和代谢过程中会产生氧自由基,当氧自由基过量时,机体会出现不同程度的氧

表5 饲料中核黄素含量对齐口裂腹鱼免疫能力的影响

Tab. 5 Effects of dietary riboflavin content on biochemical indexes of *S. prenanti*

项目 items	核黄素含量/(mg/kg) riboflavin content					
	0.67	2.96	5.83	9.05	11.58	23.42
溶菌酶/(U/mL) LYZ	25.44±11.68 ^a	44.62±1.4 ^{ab}	66.51±6.61 ^c	64.8±5.26 ^{bc}	62.78±3.48 ^{bc}	62.7±4.8 ^{bc}
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	58.33±0.48 ^a	61.55±0.42 ^b	65.65±0.96 ^c	64.67±0.77 ^c	60.49±0.94 ^{ab}	60.61±0.62 ^{ab}
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	1.87±0.09 ^a	1.96±0.11 ^{ab}	2.44±0.14 ^c	2.52±0.2 ^c	2.36±0.13 ^{bc}	2.27±0.14 ^{abc}
丙二醛/(nmol/mL) MDA	2.01±0.04 ^b	2.27±0.18 ^b	1.64±0.04 ^a	1.7±0.07 ^a	1.83±0.06 ^a	1.88±0.1 ^a

化损伤^[26-27],及时清除过量的自由基可降低氧化损伤程度。SOD、CAT等抗氧化酶是动物机体内消除氧自由基的重要酶,在机体的氧化与抗氧化平衡中发挥重要作用;LYZ活性是非特异性免疫的重要指标。良好的溶菌酶活性有助于鱼类抵抗水域中各种病原的侵袭,适宜的核黄素添加量可显著提高大黄鱼^[14]及建鲤(*Cyprinus carpio* var. *jian*)^[28]血清中SOD、CAT的活性。本实验中,适量的核黄素添加量可显著提高齐口裂腹鱼CAT、SOD及LYZ的活性。MDA为机体内脂质过氧化的产物,其含量的高低能间接反映出氧自由基的含量及机体细胞脂质过氧化的强度。随着核黄素添加水平的提高,斑点叉尾鲷^[13]、花鲈^[14]等血清中的MDA含量均呈现下降趋势。本实验中,添加核黄素可显著降低齐口裂腹鱼血清MDA含量,与上述结果相一致。这说明饲料中适宜的核黄素添加水平有助于提高鱼类特异性免疫及抗氧化能力。

4 结论

本实验条件下,饲料中添加适量的核黄素可显著提高齐口裂腹鱼对饲料的转化利用率,有效地促进其生长,增强其免疫及抗氧化能力。齐口裂腹鱼生长性能最优时核黄素适宜添加水平为5.32~5.89 mg/kg。

参考文献:

- [1] Halver J E. The vitamins[M]//Halver J E, Hardy R W. Fish Nutrition. 3rd ed. New York: Academic Press, 2002: 66-98.
- [2] National Research Council. Nutrient requirements of fish and shrimp[M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2011.
- [3] McLaren B A, Keller E. The nutrition of rainbow trout; studies of vitamin requirements[J]. Archives of Biochemistry, 1947, 15(2): 169-178.
- [4] Halver J E. Nutrition of salmonoid fishes: III. Water-soluble vitamin requirements of chinook salmon[J]. The Journal of Nutrition, 1957, 62(2): 225-243.
- [5] Takeuchi L, Takeuchi T, Ogino C. Riboflavin requirements in carp and rainbow trout[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1980, 46: 733-737.
- [6] Kitamura S, Suwa T, Ohara S, et al. Studies on vitamin requirements of rainbow trout, *Salmo gairdneri*: II. The deficiency symptoms of fourteen kinds of vitamins[J]. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 1967, 33: 1120-1125.
- [7] Woodward B. Symptoms of severe riboflavin deficiency without ocular opacity in rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. Aquaculture, 1984, 37(3): 275-281.
- [8] Dupree H K. Vitamins essential for growth of Channel catfish, *Ictalurus punctatus*: Technical Paper No.7[R]. Washington, DC: US Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, 1966: 7.
- [9] Murai T, Andrews J W. Riboflavin requirement of channel catfish fingerlings[J]. The Journal of Nutrition, 1978, 108(9): 1512-1517.
- [10] Hughes S G, Rumsey G L, Nickum J G. Riboflavin requirement of fingerling rainbow trout[J]. The Progressive Fish-Culturist, 1981, 43(4): 167-172.
- [11] Amezaga M R, Knox D. Riboflavin requirements in on-growing rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*[J]. Aquaculture, 1990, 88(1): 87-98.
- [12] Lim C, Leamaster B, Brock J A. Riboflavin requirement of fingerling red hybrid tilapia grown in seawater[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1993, 24(4): 451-458.
- [13] Serrini G, Zhang Z, Wilson R P. Dietary riboflavin requirement of fingerling channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. Aquaculture, 1996, 139(3-4): 285-290.
- [14] 张春晓. 大黄鱼、鲈鱼主要B族维生素和矿物质-磷的营养生理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 45-56.
Zhang C X. Studies on nutritional physiology of major B vitamins and mineral-phosphorus for large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R. and Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006: 45-56 (in Chinese).
- [15] 王锦林. 异育银鲫对维生素B2、维生素B6和烟酸的需求量的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007: 34-44.
Wang J L. Studies on riboflavin, pyridoxine and niacin requirements of *Carassius auratus gibelio*[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, China, 2007: 34-44 (in Chinese).
- [16] 宋理平. 宝石鲈营养需求的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009: 96-104.
Song L P. Study of nutritional requirement of jade perch 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- (*Scortum barcoo*)[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2009: 96-104 (in Chinese).
- [17] 段彪, 向泉, 周兴华, 等. 齐口裂腹鱼饲料中适宜脂肪需要量的研究[J]. *动物营养学报*, 2007, 19(3): 232-236.
- Duan B, Xiang X, Zhou X H, *et al.* The optimal lipid content of feed for *Schizothorax prenanti*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2007, 19(3): 232-236(in Chinese).
- [18] 向泉, 周兴华, 陈建, 等. 饲料蛋白水平及鱼粉蛋白含量对齐口裂腹鱼生长、体组成及消化酶活性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(5): 74-80, 106.
- Xiang X, Zhou X H, Chen J, *et al.* Effects of dietary protein and animal protein levels on growth, body composition and digestive enzyme activities of juvenile *schizothoracin* (*Schizothorax prenanti*)[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2012, 27(5): 74-80, 106(in Chinese).
- [19] Callmer K, Davies L. Separation and determination of vitamin B₁, B₂, B₆ and nicotinamide in commercial vitamin preparations using high performance cation-exchange chromatography[J]. *Chromatographia*, 1974, 7(11): 644-650.
- [20] Woodward B. Dietary vitamin requirements of cultured young fish, with emphasis on quantitative estimates for salmonids[J]. *Aquaculture*, 1994, 124(1-4): 133-168.
- [21] Guggenheim K, Diamant E J. Body composition of rats in B-vitamin deficiencies[J]. *British Journal of Nutrition*, 1959, 13(1): 61-67.
- [22] Mookerjea S, Hawkins W W. Some anabolic aspects of protein metabolism in riboflavin deficiency in the rat[J]. *The British Journal of Nutrition*, 1960, 14: 231-238.
- [23] Chen H Y, Hwang G. Estimation of the dietary riboflavin required to maximize tissue riboflavin concentration in juvenile shrimp (*Penaeus monodon*)[J]. *The Journal of Nutrition*, 1992, 122(12): 2474-2478.
- [24] Woodward B. Sensitivity of hepatic D-amino acid oxidase and glutathione reductase to the riboflavin status of the rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. *Aquaculture*, 1983, 34(3-4): 193-201.
- [25] Deng D F, Wilson R P. Dietary riboflavin requirement of juvenile sunshine bass (*Morone chrysops*♀×*Morone saxatilis*♂)[J]. *Aquaculture*, 2003, 218(1-4): 695-701.
- [26] Qian Y, Li X F, Sun C X, *et al.* Dietary biotin requirement of juvenile blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2014, 20(6): 616-622.
- [27] Lackner R. "Oxidative stress" in fish by environmental pollutants[M]//Braunbeck T, Hinton D E, Streit B. Fish ecotoxicology. Birkhäuser, Basel: Springer, 1998: 203-224.
- [28] Li W, Zhou X Q, Feng L, *et al.* Effect of dietary riboflavin on growth, feed utilization, body composition and intestinal enzyme activities of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. *jian*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2010, 16(2): 137-143.

Effects of riboflavin on growth performance, body composition, immunity and antioxidant capacity of *Schizothorax prenanti*

YANG Lixiang¹, XIANG Xiao^{1*}, ZHOU Xinghua¹, CHEN Jian¹, LUO Li²

(1. Key Laboratory of Aquaculture Science of Chongqing, Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education, College of Animal Science, Southwest University, Chongqing 402460, China;

2. College of Animal Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The purpose of the experiment was to explore the effects of different riboflavin levels on the growth performance, body composition, and immune parameters of *Schizothorax prenanti*. Six purified diets were formulated to contain 0.67、2.96、5.83、9.05、11.58 and 23.42 mg/kg riboflavin, respectively. *S. prenanti* with an average initial body weight of (10.54±0.01) g were fed the diets for 8 weeks and each diet had 3 replicates with 30 fish per replicate. The results showed as follows: the weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and protein efficiency ratio (PER) of the fish increased first and then decreased with the increase of riboflavin level, and reached the maximum and significantly higher in the 5.83 mg/kg group than those of the other groups; the feed coefficient ratio (FCR) decreased first and then increased, the lowest in the 5.83 mg/kg group and significantly lower than the other groups; riboflavin significantly affected the survival rate of the test fish (SR), liver index (HSI) and visceral index (VSI); riboflavin significantly affected the crude fat content of whole fish, but had no significant effect on crude protein, moisture and ash content. The amount of riboflavin in the liver increased with the increase of the riboflavin level; the liver D- α -amino oxidase (DAAO) activity reached the highest in the 5.83 mg/kg group. The activities of serum lysozyme (LYZ) and catalase (CAT) increased first and then stabilized with the increase of riboflavin. The content of malondialdehyde (MDA) decreased first and then stabilized with the increase of riboflavin level. It indicated that riboflavin can effectively improve the digestibility of feed, improve the immunity and antioxidant capacity, and promote its growth. Considering the best growth performance and immune ability of *S. prenanti*, 5.32-5.89 mg/kg of riboflavin would be the suitable level.

Key words: *Schizothorax prenanti*; riboflavin; growth performance; body composition; immunity; antioxidant capacity

Corresponding author: XIANG Xiao. E-mail: xiangx@126.com

Funding projects: Basic and Advanced Research Projects in Chongqing (cstc2013jcyj80033); Youth Fund Project of Southwestern University in 2015