

饲料锌水平对星斑川鲷幼鱼生长、组织积累和抗氧化功能的影响

崔立娇^{1,2}, 张利民^{2*}, 王际英², 丁立云^{1,2},
孙丽慧^{1,2}, 帅继祥^{1,2}, 孙永智²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;

2. 山东省海洋水产研究所, 山东 烟台 264006)

摘要:以酪蛋白和明胶为蛋白源,七水硫酸锌为锌源,在基础饲料中分别添加锌0,50,100,150,200,400 mg/kg,制成6种含有不同锌水平的精制饲料(19.95,71.06,118.50,174.00,226.10和411.20 mg/kg),投喂初始体重为(62.89±0.51)g的星斑川鲷幼鱼66d,研究饲料锌水平对星斑川鲷幼鱼生长、体成分、组织锌积累及抗氧化能力的影响。结果表明,随着饲料锌水平的增加,星斑川鲷的增重率(WGR)显著升高($P<0.05$),在174.00 mg/kg 锌饲料组达最大值,而锌水平高于174.00 mg/kg 时,其增重率和特定生长率(SGR)变化不显著($P>0.05$),SGR和WGR的变化趋势相同,且SGR的最大值及饲料系数(FCR)的最小值均出现在174.00 mg/kg 锌饲料组;全鱼营养成分各处理组间均无显著差异($P>0.05$),锌添加量为0 mg/kg 饲料组的肌肉脂肪含量显著高于其它各组($P<0.05$);411.20 mg/kg 锌饲料组的全鱼、脊椎骨和肌肉中锌积累量显著高于其它各组($P<0.05$),当饲料锌水平为118.50~411.20 mg/kg 时,全鱼、脊椎骨和血清中锌积累量显著高于19.95 mg/kg 和71.06 mg/kg 锌饲料组($P<0.05$),饲料锌水平对肝脏锌含量无影响($P>0.05$);血清总抗氧化能力和超氧化物歧化酶(SOD)活力随着饲料锌水平的增加均显著升高($P<0.05$),而锌水平高于174.00 mg/kg 时,上述指标维持在相对稳定水平。综上所述,饲料中添加适量锌可以显著提高星斑川鲷的生长性能和组织锌积累量、增强机体的抗氧化功能。以WGR为评价指标,折线回归分析表明,星斑川鲷幼鱼对饲料中锌的最适需要量为167.88 mg/kg。

关键词:星斑川鲷; 锌; 生长; 组织积累; 抗氧化

中图分类号: S 963

文献标识码: A

锌是动物机体必需的微量元素,它参与多种代谢过程,并在骨骼发育、生殖、免疫、生物膜稳定和凝血等生理机能中起重要作用^[1]。锌分布于动物机体所有器官、组织和体液中,是许多酶的组成成分或激活剂。水产动物缺锌可引起生长缓慢,骨骼受损,白内障、皮肤糜烂和短躯症等明显缺锌症状,并且影响免疫功能和代谢等^[2-4]。由于水体中含锌量低,不能满足鱼类生长的需要,为使水产动物获得最佳生长、免疫力和抗病力,饲料中添加锌是十分必要的。有关虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[5]、

真鲷(*Sciaenops ocellatus*)^[6]、大西洋鲑(*Salmo salar*)^[7]和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[8]等对饲料中锌的需要量已有报道。

星斑川鲷(*Platichthys stellatus*)隶属鲷形目、鲷科、星鲷属,其肉质细嫩,味道鲜美,营养价值高,深受国内外市场欢迎;具有生长速度快、出肉率高、广温、广盐、适宜于集约化养殖、抗病力强、易于养殖管理、耐运输、耐冷藏等优点,被认为是继牙鲆(*Paralichthys olivaceus*)、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)之后最有发展前景的海

收稿日期:2010-05-28 修回日期:2010-07-05

资助项目:国家重点行业公益项目(农业部,nyhyzx07-046);国家科技部农转资金项目(03EFN213700155);山东省水生动物营养与饲料泰山学者岗位经费资助

通讯作者:张利民,Tel:0535-6117088,E-mail:ytzlm@139.com

水养殖鱼类之一。目前,国内外有关星斑川鲷营养需求方面的研究已有报道^[9-12],但在微量元素方面还未见报道。本试验旨在通过研究饲料锌水平对星斑川鲷幼鱼生长、体成分、组织锌积累量及抗氧化能力的影响,确定星斑川鲷对饲料中锌的最适需要量,为全面研究星斑川鲷的营养生理,并在此基础上设计合理配方,开发优质高效的星斑川鲷人工配合饲料提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验饲料的配制

以酪蛋白和明胶为蛋白源,鱼油为脂肪源,淀粉和 α -淀粉为糖源,配制成含粗蛋白 51.2%,粗

脂肪 12.4% 的基础饲料(表 1)。以硫酸锌($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$,分析纯)为锌源,分别在每千克基础饲料中添加 0、50、100、150、200、400 mg 锌配制成 6 种试验饲料。经原子吸收分光光度计(AA800 型,PerkinElmerTM)测得实际锌含量分别为 19.95、71.06、118.50、174.00、226.10 和 411.20 mg/kg。制作饲料时,所有原料分析营养成分后,粉碎过 80 目筛,采取逐级扩大法混合微量组分,按配比称量后加入新鲜鱼油均匀混合,然后加入适量的水揉匀,经螺旋挤压机加工成直径为 3.5 mm 的颗粒,70 °C 烘干,置于通风干燥处保存、使用。

表 1 试验饲料配比及营养组成
Tab. 1 Formulation and nutrient compositions of the experimental diets

原料 ingredient	锌添加量(mg/kg) supplemental zinc level					%
	0	50	100	150	200	
酪蛋白 casein	47	47	47	47	47	47
明胶 gelatin	10	10	10	10	10	10
淀粉 starch	10	10	10	10	10	10
α -淀粉 α -starch	8	8	8	8	8	8
α -纤维素 α -cellulose	5.54	5.52	5.50	5.47	5.45	5.36
鱼油 fish oil	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5
乌贼内脏粉 squid visceral meal	5	5	5	5	5	5
复合矿物质(不含锌) ^a mineral mixture(zinc free)	2	2	2	2	2	2
复合维生素 ^b vitamin mixture	1	1	1	1	1	1
诱食剂(甜菜碱) attractant(betaine)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
氯化胆碱 choline chloride	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
抗氧化剂 antioxidant	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (mg/kg DM) (zinc sulfate heptahydrate)	0	221.2	442.4	663.6	884.8	1769.6
营养组成(%干物质) nutrient composition						
粗蛋白 crude protein	51.20	50.84	51.13	50.76	50.83	51.07
粗脂肪 crude lipid	12.40	12.28	12.39	11.99	12.16	12.20
能量(MJ/kg DM) gross energy	20.19	20.18	20.22	20.26	20.11	20.16
饲料锌水平(mg/kg DM) dietary zinc level	19.95	71.06	118.50	174.00	226.10	411.20

注:a.复合矿物质(mg/kg 饲料), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$,5 068 mg; KCl ,3 020.5 mg; $KAl(SO_4)_2$,12.3 mg; $CoCl_2$,40.0 mg; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$,10.0 mg; KI ,8.0 mg; $MnSO_4 \cdot 4H_2O$,73.1 mg; Na_2SeO_3 ,2.5 mg; $C_6H_5O_7Fe \cdot 5H_2O$,1633.0 mg; $NaCl$,100.0 mg; NaF ,4.0 mg。

b.复合维生素(mg/kg 饲料),维生素 A,38.0 mg; 维生素 D_3 ,13.2 mg; α -生育酚,210.0 mg; 硫胺素,115.0 mg; 核黄素,380.0 mg; 盐酸吡哆醇,88.0 mg; 泛酸,368.0 mg; 烟酸,1 030.0 mg; 生物素,10.0 mg; 叶酸,20.0 mg; 维生素 B_{12} ,1.3 mg; 肌醇,4 000.0 mg; 抗坏血酸,500.0 mg。

Notes:a. Mineral mixture(mg/kg diet), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$,5 068 mg; KCl ,3 020.5 mg; $KAl(SO_4)_2$,12.3 mg; $CoCl_2$,40.0 mg; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$,10.0 mg; KI ,8.0 mg; $MnSO_4 \cdot 4H_2O$,73.1 mg; Na_2SeO_3 ,2.5 mg; $C_6H_5O_7Fe \cdot 5H_2O$,1633.0 mg; $NaCl$,100.0 mg; NaF ,4.0 mg。

b. Vitamin mixture(mg/kg diet), retinol acetate,38.0 mg; cholecalciferol,13.2 mg; alpha-tocopherol,210.0 mg; thiamin,115.0 mg; riboflavin,380.0 mg; pyridoxine HCl,88.0 mg; pantothenic acid,368.0 mg; niacin acid,1 030.0 mg; biotin,10.0 mg; folic acid,20.0 mg; vitamin B_{12} ,1.3 mg; inositol,4 000.0 mg; ascorbic acid,500.0 mg。

1.2 试验用鱼与饲养管理

试验鱼购自荣成港西水产养殖场,为当年人工繁殖的同一批鱼苗,初始体重为(62.89 ±

0.51)g。养殖试验在山东省海洋水产研究所水循环系统中进行。试验鱼体质健壮,体重相近。正式试验前,先用基础饲料驯化 2 周,待星斑川鲷

幼鱼完全适应精制饲料和试验条件后,再进行随机分组。试验共6个处理,每个处理设3个重复,每个重复20尾鱼,分别放养于70 cm×80 cm的圆柱形玻璃钢养殖桶中,控制水深40 cm左右,正式试验从2009年11月21日至2010年1月25日,共计66 d。养殖过程控制水温在(19.0±0.5)℃,pH 7.8~8.2,盐度28~30,保证溶氧>5 mg/L,氨氮、亚硝酸氮均小于0.1 mg/L,弱光条件,微流水养殖。每天饱食投喂两次(08:00, 17:30),投喂30 min后,从系统自带的排水口将残饵排出,数颗粒,计算残饵量。

1.3 样品采集和分析

生长指标 试验开始前随机取10尾鱼用于常规营养成分分析。养殖试验结束后,停喂24 h,称鱼体总重,计算增重率。每桶随机取12尾鱼,称鱼体重后,其中3尾鱼用作全鱼,其余9尾鱼分离肝胰脏,称重,取背侧肌肉。背肌和全鱼等鱼体样品用于常规营养成分分析,样品测定参照以下方法进行(AOAC,2000):水分采用105℃烘干恒重法;粗蛋白含量采用FOSS定氮仪(Kjeltec™ 2100)测定;粗脂肪含量的测定采用索氏抽提法;粗灰分的测定采用马福炉550℃灼烧法。

增重率(WGR,%)=($W_t - W_0$)/ $W_0 \times 100$; 特定生长率(SGR,%/d)=($\ln W_t - \ln W_0$)/ $t \times 100$;蛋白质效率(PER)=($W_t - W_0$)/($F \times$ 饲料中粗蛋白的含量);饲料系数(FCR)= $F/(W_t - W_0)$;肥满度(CF,%)= $W_t/\text{体长}^3 \times 100$ 。式中, W_0 :试验初鱼体重量(g), W_t :试验终鱼体重量(g), F :饲料摄入量(g), t :养殖天数(d)。

组织锌积累量和抗氧化指标 生长试验结

束后,试验鱼饥饿24 h,每桶随机取9尾鱼,用2 mL注射器从尾静脉采血。将血液于4℃条件下4 000 r/min离心15 min,收集上层血清,用于血清锌含量、总抗氧化能力和超氧化物歧化酶(SOD)活力的测定。将取完血解剖后的鱼体放入微波炉中加热分离脊椎骨,用超纯水冲洗后,干燥,粉碎后脱脂并再次烘干。

全鱼、脊椎骨、肝脏、肌肉和血清经浓硝酸微波消解后在原子吸收分光光度计上测定锌含量。血清中总抗氧化能力和SOD活力采用南京建成生物工程研究所测试盒进行测试。

1.4 数据统计分析

采用SPSS 11.0进行单因子方差分析(One-Way ANOVA)和Duncan氏多重检验。显著水平采用 $P < 0.05$ 。根据增重率数据,采用折线模型(broken-line model)分析星斑川鲈幼鱼对饲料中锌的需要量。

2 结果

2.1 饲料锌水平对星斑川鲈幼鱼生长性能的影响

从表2看出,星斑川鲈增重率和特定生长率二者均随饲料锌水平的增加呈先上升后平稳的趋势,当饲料锌水平从19.95 mg/kg上升到174.00 mg/kg时,WGR和SGR随之升高;然而174.00 mg/kg、226.10 mg/kg与411.20 mg/kg锌饲料组间无显著性差异($P > 0.05$)。蛋白质效率与增重率的变化趋势一致。饲料系数随饲料锌水平上升呈下降趋势,19.95 mg/kg和71.06 mg/kg锌饲料组显著高于其它各组($P < 0.05$),其它各组间差异不显著($P > 0.05$)。

表2 饲料锌水平对星斑川鲈幼鱼生长性能的影响
Tab.2 Effects of dietary zinc level on growth performance of juvenile *P. stellatus*

生长指标 growth index	饲料锌水平(mg/kg) dietary zinc level					
	19.95	71.06	118.50	174.00	226.10	411.20
增重率(%) WGR	88.03±1.12 ^c	91.01±1.79 ^c	103.15±2.45 ^b	109.17±1.04 ^a	108.94±2.80 ^a	108.78±3.00 ^a
特定生长率(%/d) SGR	0.96±0.01 ^c	0.98±0.01 ^c	1.07±0.02 ^b	1.12±0.01 ^a	1.12±0.02 ^a	1.12±0.02 ^a
蛋白质效率PER	2.03±0.08 ^c	2.06±0.06 ^c	2.15±0.03 ^b	2.29±0.04 ^a	2.25±0.03 ^a	2.24±0.02 ^a
饲料系数FCR	0.97±0.04 ^b	0.96±0.03 ^b	0.89±0.01 ^a	0.86±0.02 ^a	0.88±0.02 ^a	0.88±0.01 ^a
肥满度(%) CF	2.64±0.03	2.67±0.05	2.69±0.07	2.71±0.08	2.72±0.20	2.68±0.06
成活率(%) SR	98.33±2.89	98.33±2.89	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00

注:同行肩注小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$),下表同。

Notes: Data in the same column with different letters indicates significant difference ($P < 0.05$), the same as following tables.

各饲料组星斑川鲮幼鱼的成活率无显著性差异($P > 0.05$),但 19.95 mg/kg 和 71.06 mg/kg 锌饲料组成活率相对较低。各饲料组间肥满度无显著性差异($P > 0.05$)。

采用折线模型回归分析饲料锌水平与星斑川鲮增重率之间的关系,结果表明,星斑川鲮幼鱼获得最大增重率时饲料中锌最低含量为 167.88 mg/kg(图 1)。

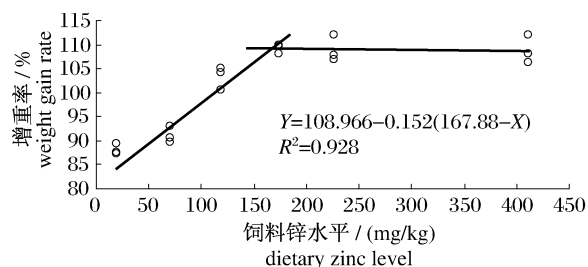


图1 回归分析星斑川鲮幼鱼增重率与饲料锌水平的关系
Fig. 1 Regression of weight gain rate on dietary zinc level for juvenile *P. stellatus*

2.2 饲料锌水平对星斑川鲮全鱼和肌肉营养成分的影响

饲料锌水平对星斑川鲮全鱼干物质、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量均无显著影响($P > 0.05$) (图 2)。19.95 mg/kg 和 411.20 mg/kg 饲料组的肌肉粗蛋白含量显著低于 71.06 mg/kg 和 174.00 mg/kg 锌饲料组($P < 0.05$) (图 3)。19.95 mg/kg 锌饲料组的肌肉脂肪含量显著高于其它各处理组($P < 0.05$)。肌肉粗灰分含量不受饲料锌水平的影响($P > 0.05$)。

2.3 饲料锌水平对星斑川鲮鱼体和各组织器官锌含量的影响

饲料锌水平对星斑川鲮全鱼、脊椎骨、肌肉和血清中的锌含量均有显著影响(表 3)。全鱼和脊椎骨锌含量随饲料锌水平的上升呈逐步上升的趋势,锌水平为 411.20 mg/kg 组显著高于其它各处理组($P < 0.05$),其中 118.50 mg/kg、174.00 mg/kg

和 226.10 mg/kg 锌饲料组间差异不显著($P > 0.05$),但显著高于 19.95 mg/kg 和 71.06 mg/kg 组($P < 0.05$)。

肌肉中锌含量仅于最高饲料锌水平组达到最高,而其它各组间无显著差异($P > 0.05$)。血清锌含量随着饲料锌水平上升呈先上升后平稳的趋势,其中 19.95 mg/kg 组和 71.06 mg/kg 组差异显著,二者均显著低于饲料锌水平为 118.50 mg/kg 以上各组($P < 0.05$)。各饲料处理组间鱼体肝脏锌含量在 107.1 ~ 112.0 mg/kg,且组间差异不显著($P > 0.05$)。

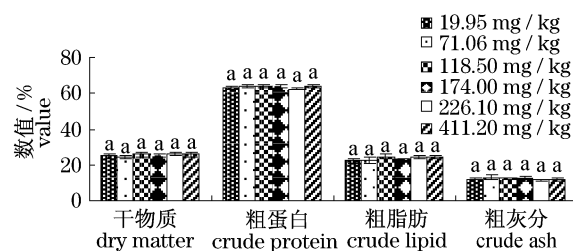


图2 饲料锌水平对星斑川鲮全鱼组成的影响
相同字母表示差异不显著($P > 0.05$)。

Fig. 2 Effects of dietary zinc level on whole fish composition in juvenile *P. stellatus*

Data with the same letters in the figure mean no significant difference($P > 0.05$).

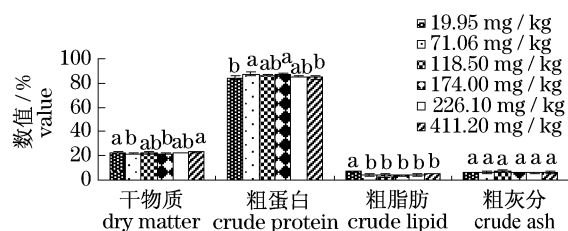


图3 饲料锌水平对星斑川鲮肌肉组成的影响
不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 3 Effects of dietary zinc level on muscle composition in juvenile *P. stellatus*

Data with the different letters in the figure mean significant difference($P < 0.05$)

表3 饲料锌水平对星斑川鲮组织器官锌含量的影响

Tab. 3 Concentrations of zinc in tissue and organs of juvenile *P. stellatus* in different zinc diets

指标 index	饲料锌水平(mg/kg) dietary zinc level					
	19.95	71.06	118.50	174.00	226.10	411.20
全鱼(mg/kg) whole body	86.3 ± 3.6 ^c	86.9 ± 4.1 ^c	108.0 ± 4.7 ^b	110.6 ± 6.4 ^b	109.4 ± 1.4 ^b	137.4 ± 13.4 ^a
脊椎骨(mg/kg) vertebrae	145.5 ± 2.7 ^d	163.7 ± 5.3 ^c	175.9 ± 4.5 ^b	178.2 ± 3.0 ^b	178.3 ± 3.7 ^b	254.2 ± 7.5 ^a
肌肉(mg/kg) muscle	51.2 ± 5.8 ^b	55.7 ± 4.5 ^b	57.9 ± 5.9 ^b	58.1 ± 2.0 ^b	59.2 ± 2.3 ^b	68.0 ± 6.6 ^a
肝脏(mg/kg) liver	108.2 ± 2.9	110.3 ± 4.0	111.7 ± 2.5	112.0 ± 1.4	107.1 ± 1.0	107.9 ± 2.7
血清(μg/mL) serum	25.9 ± 0.1 ^c	31.5 ± 1.1 ^b	32.2 ± 1.1 ^{ab}	35.3 ± 1.8 ^a	34.9 ± 0.8 ^a	35.1 ± 3.2 ^a

mean ± SD, n = 3

2.4 饲料锌水平对星斑川鲮幼鱼抗氧化能力的影响

星斑川鲮幼鱼血清的总抗氧化能力随饲料锌水平的上升呈先上升后平稳的趋势(表4),其中19.95 mg/kg组和71.06 mg/kg组差异不显著($P > 0.05$),二者均显著低于锌水平为118.50

mg/kg以上各组($P < 0.05$),总抗氧化能力以174.00 mg/kg锌饲料组最强。

SOD活力和总抗氧化能力的变化趋势相似,随着锌水平的增加先升高后趋于稳定,其中19.95 mg/kg组和71.06 mg/kg组差异不显著,二者均显著低于其它各处理组($P < 0.05$)。

表4 饲料锌水平对星斑川鲮幼鱼血清抗氧化能力的影响
Tab.4 Effects of dietary zinc level on antioxidant ability in serum of juvenile *P. stellatus*

抗氧化指标 antioxidant index	饲料锌水平(mg/kg) dietary zinc level					
	19.95	71.06	118.50	174.00	226.10	411.20
总抗氧化能力(U/mL) total antioxidant capacity	3.16 ± 0.37 ^c	3.45 ± 0.62 ^c	4.32 ± 0.06 ^b	5.33 ± 0.37 ^a	5.07 ± 0.75 ^{ab}	4.62 ± 0.13 ^{ab}
SOD活力(U/mL) SOD activity	55.70 ± 3.08 ^b	56.13 ± 3.71 ^b	61.85 ± 4.03 ^a	64.39 ± 3.54 ^a	61.81 ± 1.76 ^a	63.62 ± 0.70 ^a

3 讨论

3.1 饲料锌水平对星斑川鲮幼鱼生长和体成分的影响

本试验以 $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 为锌源在以酪蛋白和明胶为蛋白源的基础饲料中添加不同水平的锌,评估星斑川鲮幼鱼日粮锌的最适需要量。由于增重率在评价鱼类对矿物质需求中具有重要作用^[13],根据本试验结果,对增重率与饲料锌水平进行折线回归分析,得出初重为62.89 g左右的星斑川鲮幼鱼日粮锌的最适需要量为167.88 mg/kg。这一结果与魏万权等^[14]对牙鲆的研究中得到的数值(> 119.2 mg/kg)相吻合。在饲料中添加适宜范围的锌可提高鲤(*Cyprinus carpio*)^[15]、斑节对虾(*Penaeus monodon*)^[16]和斑点叉尾鲴(*Ictalurus punctatus*)^[17]鱼体增重率。本研究中,饲料锌水平对星斑川鲮幼鱼增重率、特定生长率、蛋白质效率和饲料系数均有显著影响,并存在一个最佳水平(167.88 mg/kg)。当饲料锌含量低于这一水平时,试验鱼增重率和特定生长率均随饲料锌水平的升高而增加;高于这一水平时,这些指标均趋于平稳。饲养星斑川鲮66 d后,所有添加锌的试验组增重率均高于基础饲料组,174.00 mg/kg锌饲料组增重率达到最大值且饲料系数最低。这表明饲料中添加适量的锌对试验鱼生长有明显的促进作用,同时当其饲料锌含量达到某个水平后,星斑川鲮幼鱼能获得最优生长。也有少数学者如Gatlin等^[18]的研究显示,饲

料中添加锌对河鲶生长无显著影响,其原因可能是所用蛋白源与本试验不同,前者在其基础饲料中添加了鱼粉,而鱼粉中锌含量足以满足河鲶的生长需要。

水产动物对锌的营养需求存在一个适宜的剂量范围,在这个范围内锌具有营养作用,而在这个范围之外可能会引起生长抑制、缺乏或中毒。本试验中,投喂锌含量为19.95 mg/kg(基础饲料组)的星斑川鲮幼鱼死亡率增加,生长明显减慢,出现皮肤糜烂、鳍部充血和骨骼畸形等缺锌症状,这种现象在其它鱼类中也有发现^[19]。另一方面,饲料中锌添加剂量过高没有对星斑川鲮生长产生负面影响,但锌含量为411.20 mg/kg饲料组试验鱼出现肝脏充血等中毒症状。陈四清等^[20]认为,锌投喂量过高时,黑鲷(*Sparus macrocephalus*)幼鱼生长会受到抑制。而对大黄鱼^[21]的研究结果显示,91.28 ~ 326.81 mg/kg锌含量超出最适生长需要量并没有对试验鱼产生毒性,分析其原因,可能是由于试验鱼种类、试验周期的长短和饲料中锌的最大添加量的差异造成的,也可能与锌源和锌的有效利用率有关。饲料中高剂量的锌不会对虹鳟产生毒性,这或许是虹鳟在长期进化过程中建立起来的一种相对适应性,这种适应性是通过提高机体对元素毒性的反应阈值或将体内过剩的元素分泌排出等途径而实现,如虹鳟可通过鳃将体内过多的锌分泌排出而不至于锌中毒^[22]。

本试验发现,不添加锌基础饲料组的肌肉脂肪含量显著高于其它处理组,这与以硫酸锌作为

锌源,在对罗非鱼^[13,23]研究中得到的结论相似。这一结果表明,锌摄入量的增加,提高了鱼体对饲料蛋白的利用率,而饲料利用率的提高,又使得过多吸收的能量以脂肪的形式在肠系膜中沉积起来,从而导致肌肉中脂肪含量的降低,但锌对肌肉脂肪代谢的作用机理,还有待进一步研究。

3.2 饲料锌水平对星斑川鲮鱼体和组织锌积累量的影响

鱼体和消化道^[7,24]、骨骼^[25]、血清^[26]和尾鳍^[27]等的锌含量变化可以作为水产动物锌营养研究的有效评价指标。本试验中,全鱼和脊椎骨锌含量都相当灵敏地反映出饲料中的锌状况,全鱼和脊椎骨锌含量在基础饲料组、71.06 mg/kg 和 411.20 mg/kg 锌饲料组都有较大的变化,这可能是由于星斑川鲮幼鱼对锌具有保持自身动态稳定的功能,仅在摄食锌含量较低和较高这两种极端情况下才发生变化,这和乔永刚等^[28]在研究饲料锌水平对军曹鱼(*Rachycentron canadum*)血清锌含量影响时得到的变化趋势一致。杨原志等^[29]在对军曹鱼幼鱼日粮锌最适添加量的研究中也发现,锌添加量最高饲料组的骨骼锌含量显著高于其它各处理组。本试验中,锌含量为 411.20 mg/kg 饲料组的星斑川鲮全鱼和脊椎骨锌积累量均显著高于其它各组,但是没有获得最优生长,笔者认为,这可能与两方面的原因有关。一方面,过量的锌可能使星斑川鲮幼鱼的身体机能产生了一些不良反应,阻碍其对饲料营养的摄取;另一方面,可能与矿物质元素间的拮抗作用有关,过量的锌抑制了铁の利用,造成了微量元素间的不平衡,进而影响鱼体的生长和代谢。故在饲料配方中添加适量的锌才能使鱼体生长达到理想效果。

本研究中,饲料锌水平在 19.95 ~ 226.10 mg/kg 时,星斑川鲮幼鱼肌肉锌含量较低且维持在相对稳定水平,只有 411.20 mg/kg 饲料组的肌肉锌含量显著高于其它各组。这可能是因为肌肉中锌的代谢比鱼体和脊椎骨慢很多,在短时间内,饲料锌的变化还不足以引起肌肉锌积累量的变化,只有当锌添加剂量过高时才影响锌在肌肉中的富集。也可能是星斑川鲮肌肉中锌的正常水平在 51.2 ~ 59.2 mg/kg,饲料中较多的锌被贮存于其它器官或者代谢掉。黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[30]和花鲈(*Lateolabrax japonicus*)^[31]

等的相关研究都证实了肌肉中锌含量不受饲料锌含量的显著影响。以上研究结果表明,当养殖时间比较短时,肌肉中锌积累量被认为是评价锌营养状况的相对不敏感指标。

动物体的不同组织对某种重金属具有高度选择性,本试验中,在同一饲料锌水平下脊椎骨中的锌含量都远高于其它组织,说明星斑川鲮脊椎骨对锌具有很强的积累能力。本研究还发现,日粮锌的补充量不影响锌在肝脏中的沉积,说明星斑川鲮的肝脏不是锌的主要贮存器官,这与异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)^[32]和大西洋鲑^[7]的研究结果一致。究其原因可能是,肝脏锌主要以金属硫蛋白(metallothioneins)的形式存在,由于其生理上的重要性,肝脏金属硫蛋白水平总是相对稳定并且不随饲料锌源或含量不同而变化^[13,33]。因此,锌在肝脏中的沉积量不宜用作评价锌营养状况的指标。

血清锌含量较骨骼锌含量可靠性差,但仍可反映鱼类锌营养状况^[34-35]。El-Mowafi 等^[36]也认为当采血前大西洋鲑正常摄食时,血清锌含量是评价锌营养状况的可靠指标。本试验中,随着饲料锌水平的增加,血清锌含量逐渐升高,在 118.50 mg/kg 锌饲料组接近最大值(35.3 μg/mL),之后趋于平稳,这表明基础饲料组和 71.06 mg/kg 组星斑川鲮幼鱼锌摄入不足。据徐志雄等^[37]报道,满足军曹鱼锌最适添加量(42.86 mg/kg)之后,其血清锌水平趋于平稳。Julshamm 等^[38]发现投喂锌含量为 100 ~ 200 mg/kg 饲料的大西洋鲑血清锌水平在 15 ~ 32 μg/mL 之间,本研究中星斑川鲮的血清锌含量数据与其相近。这预示着血清锌含量可以作为有效指标来评价饲料锌水平对星斑川鲮幼鱼生理状况的影响。

3.3 饲料锌水平对星斑川鲮幼鱼抗氧化能力的影响

锌有抗氧化清除自由基的作用,缺锌可以使清除自由基的能力下降,脂质过氧化加强^[39]。超氧化物歧化酶(SOD)是重要的抗氧化酶之一,可以作为机体非特异性免疫指标,常用来评定免疫刺激剂对机体非特异性免疫力的影响^[40]。通常情况下,使鱼类获得最优生长的微量元素水平也就是使鱼类免疫力达到最佳状态的水平^[41]。本试验中,随着饲料锌水平的升高,星斑川鲮幼鱼血清总抗氧化能力和 SOD 活力均呈先升高后平稳

的趋势,与鱼体增重率的变化趋势也比较一致,在锌水平为 174.00 mg/kg 饲料组达到峰值。Onderci 等^[42]研究表明饲料中添加锌可显著提高虹鳟的抗氧化功能,与本研究结果一致。这些结果表明锌的缺乏可能会导致鱼体过氧化反应增强,添加适宜范围的锌可显著提高鱼类的生长率,同时增强鱼体的抗氧化能力和非特异性免疫力,提高抵抗疾病的能力。

参考文献:

- [1] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学[M]. 北京:中国农业出版社,1994:59.
- [2] Lorentzen M, Maage A. Trace element status of juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* L. fed a fishmeal based diet with or without supplementation of zinc, iron, manganese and copper from first feeding [J]. *Aquaculture Nutrition*, 1999, 5(3):163-171.
- [3] Masahio S. Current research status of fish immunostimulants[J]. *Aquaculture*, 1999, 172(1):63-92.
- [4] Kiron V. Effect of nutritional diets on activity of NK cell of rainbow trout[J]. *Research of Fish Disease*, 1993, 28(2):71-76.
- [5] Ogino C, Yang G Y. Requirement of rainbow trout for dietary zinc[J]. *Nippon Suisan Gakkaihi*, 1978, 44:1015-1018.
- [6] Gatlin D M III, O'Connell J P, Scarpa J. Dietary zinc requirement of the red drum, *Sciaenops ocellatus* [J]. *Aquaculture*, 1991, 92:259-265.
- [7] Maage A, Julshamn K. Assessment of zinc status in juvenile Atlantic salmon *Salmo salar* by measurement of whole body and tissue levels of zinc [J]. *Aquaculture*, 1993, 117:179-191.
- [8] Eid A, Ghonim S I. Dietary zinc requirement of fingerling *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture*, 1994, 119:259-264.
- [9] Lee S M, Lee J H. Effect of dietary glucose, dextrin and starch on growth and body composition of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus* [J]. *Fish Science*, 2004, 70:53-58.
- [10] Lee S M, Lee J H, Kim K D. Effect of dietary essential fatty acids on growth, body composition and blood chemistry of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus* [J]. *Aquaculture*, 2003, 225:269-281.
- [11] Lee S M, Lee J H, Kim K D, et al. Optimum dietary protein for growth of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2006, 37(2):200-203.
- [12] 段培昌, 张利民, 王际英, 等. 新型蛋白源替代鱼粉对星斑川鲮幼鱼生长、体成分和血液学指标的影响[J]. *水产学报*, 2009, 33(5):709-806.
- [13] Marcelo, Luiz E P. Optimum zinc supplementation level in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* juveniles diets [J]. *Aquaculture*, 2004, 238:385-401.
- [14] 魏万权, 李爱杰, 李德尚. 饲料中添加锌对牙鲆生长和生化指标的影响[J]. *青岛海洋大学学报*, 1999, 29(1):60-66.
- [15] 陈冬梅, 刘维德. 铜、铁、锌、锰不同组合水平对鲤鱼生长的影响[J]. *饲料工业*, 2003, 24(4):50-52.
- [16] Shiau S Y, Jiang L C. Dietary zinc requirements of grass shrimp, *Penaeus monodon*, and effects on immune responses [J]. *Aquaculture*, 2006, 254:476-482.
- [17] Paripatananont T, Lovell R T. Chelated zinc reduces the dietary zinc requirement of channel catfish, *Ictalurus punctatus* [J]. *Aquaculture*, 1995, 133:73-82.
- [18] Gatlin III D M, Wilson R P. Zinc supplementation of practical channel catfish diets [J]. *Aquaculture*, 1984, 41:31-36.
- [19] 王道尊, 赵亮, 俞清, 等. 锌对草鱼鱼种生长的影响[J]. *上海水产大学学报*, 1995, 4(1):62-65.
- [20] 陈四清, 季文娟, 潘生弟. 黑鲷幼鱼对 Zn、Cu 的营养需要[J]. *中国水产科学*, 1998, 5(2):52-56.
- [21] 张佳明, 艾庆辉, 麦康森, 等. 大黄鱼幼鱼对饲料中的锌需要量 [J]. *水产学报*, 2008, 32(3):417-424.
- [22] Hardy R W, Sullivan C V, Kozoil K M. Absorption, body distribution and excretion of dietary zinc by rainbow trout (*Salmo gairdneri*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1987, 3:133-143.
- [23] 吴红岩, 陈孝焯, 阳会军, 等. 饲料中添加硫酸锌对奥尼罗非鱼幼鱼生长和机体抗氧化功能的影响[J]. *水产学报*, 2008, 32(4):621-627.
- [24] Toko I I, Fiogbe E D, Kestemont P. Mineral status of African catfish (*Clarias gariepinus*) fed diets containing graded levels of 3 soybean or cottonseed meals [J]. *Aquaculture*, 2008, 275:298-305.
- [25] Meng H L, Edwin H R. Comparison of chelated zinc and zinc sulphate as zinc sources for growth and bone mineralization of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fed practical diets [J]. *Aquaculture*, 1996, 146:237-243.

- [26] King J C. Assessment of zinc status [J]. Journal of Nutrition, 1990, 120: 1474 - 1479.
- [27] Dato-Cajegas C R S, Yakupitiyage A. The need for dietary mineral supplementation for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, cultured in a semi-intensive system [J]. Aquaculture, 1996, 144: 227 - 257.
- [28] 乔永刚, 谭北平, 麦康森, 等. 军曹鱼幼鱼对饲料中锌需要量的研究 [J]. 中国海洋大学学报, 2007, 37 (4): 105 - 110.
- [29] 杨原志, 徐志雄, 董晓慧, 等. 军曹鱼幼鱼日粮锌最适添加量的研究 [J]. 中国饲料, 2007 (7): 32 - 34.
- [30] 蒋蓉. 铜、铁、锰、锌对黄颡鱼生长和生理机能的影响 [D]. 苏州: 苏州大学硕士论文, 2006.
- [31] 周立斌, 张伟, 王安利, 等. 饲料中锌对花鲈 (*Lateolabrax japonicus*) 幼鱼生长、免疫和组织积累的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2009, 40 (1): 42 - 47.
- [32] 萧培珍. 日粮铁、锌补充量对异育银鲫生长、生理机能及器官中微量元素含量的影响 [D]. 苏州: 苏州大学硕士论文, 2008.
- [33] Henriques G S, Cozzolino S M F. Determination of metallothionein levels in tissues of young rats fed zinc-enriched diets [J]. Rev Nutr, 2001, 13: 163 - 169.
- [34] Magge A. Trace elements in Atlantic salmon (*Salmo salar*) nutrition [D]. Bergen: University of Bergen, 1994.
- [35] Serra R, Isani G, Cattani O, *et al.* Effects of different levels of dietary zinc on the gilthead, *Sparus aurata* during the growing season [J]. Biological Trace Element Research, 1996, 51: 107 - 116.
- [36] El-Mowafi A F A, Maage A, Lorentzen M, *et al.* Tissue indicators in Atlantic salmon (*Salmo salar*) post smolts: effect of fasting [J]. Aquaculture Nutrition, 1997, 3: 73 - 80.
- [37] 徐志雄, 董晓慧, 刘楚吾. 军曹鱼幼鱼日粮锌最适添加量的研究 [J]. 水产科学, 2007, 26 (3): 138 - 141.
- [38] Julshamn K, Sandnes K. Effects of dietary selenium supplementation on growth, blood chemistry and trace elements levels in serum and liver of adult Atlantic salmon (*Salmon salar*) [J]. Fisk Dir Skr Ser Ernring, 1990, 3 (2): 47 - 58.
- [39] Powell S R. The antioxidant properties of zinc [J]. Journal of Nutrition, 2000, 130: 1447 - 1454.
- [40] 刘恒, 李光友. 免疫多糖对养殖南美白对虾作用的研究 [J]. 海洋与湖沼, 1998, 29 (2): 113 - 118.
- [41] 艾庆辉, 麦康森. 鱼类营养免疫研究进展 [J]. 水生生物学报, 2007, 31 (3): 425 - 430.
- [42] Onderci M, Sahin N, Sahin K, *et al.* The antioxidant properties of chromium and zinc; *in vivo* effects on digestibility, lipid peroxidation, antioxidant vitamins and some minerals under a low ambient temperature [J]. Biological Trace Element Research, 2003, 92: 139 - 150.

Effects of dietary zinc on growth performance, tissue accumulation and antioxidation of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*)

CUI Li-jiao^{1,2}, ZHANG Li-min^{2*}, WANG Ji-ying², DING Li-yun^{1,2},
SUN Li-hui^{1,2}, SHUAI Ji-xiang^{1,2}, SUN Yong-zhi²

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Marine Fisheries Research Institute of Shandong Province, Yantai 264006, China)

Abstract: An experiment was conducted to investigate the effects of dietary zinc on growth performance, body composition, tissue zinc accumulation and antioxidation of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*) with zinc sulfate ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) as zinc source, by using a purified diet based on casein-gelatin as the protein sources. The basal diet was supplemented with 0, 50, 100, 150, 200 and 400 mg zinc per kg diet respectively and juvenile starry flounder [initial weight (62.89 ± 0.51) g] were fed 6 purified diets containing graded levels of zinc (19.95, 71.06, 118.50, 174.00, 226.10 and 411.20 mg/kg) respectively for 66-day experimental period. The results showed that weight gain rate (WGR) increased significantly with increasing dietary zinc level ($P < 0.05$), but no significant differences were observed among the juveniles fed the diets with equal to or higher than 174.00 mg/kg of dietary zinc ($P > 0.05$), special growth rate (SGR) and WGR followed the same trend. The fish got the highest WGR, SGR and the lowest feed conversion rate (FCR) in the treatment with 174.00 mg/kg of dietary zinc. No significant differences were observed in whole body composition among dietary treatments ($P > 0.05$), the fat deposition in muscle of zinc supplementation of 0 mg/kg group was significantly higher than those in the other groups ($P < 0.05$). When the juveniles were fed the diet with 411.20 mg/kg of dietary zinc, the zinc accumulation contents in the whole body, vertebrae and muscle were significantly higher than those in the other groups ($P < 0.05$). When the juveniles were fed 118.50–411.20 mg/kg of dietary zinc, the zinc accumulation contents in whole body, vertebrae and serum were significantly higher than 19.95 mg/kg group and 71.06 mg/kg group ($P < 0.05$), however, the liver zinc contents remained comparatively stable among all groups ($P > 0.05$). Serum total antioxidant capacity and superoxide dismutase (SOD) activity increased significantly with increasing dietary zinc level ($P < 0.05$), and then leveled off when the juveniles were fed the diets with equal to or higher than 174.00 mg/kg of dietary zinc. In conclusion, it could improve growth performance and tissue zinc accumulation, and enhance antioxidation function by adding proper dose of zinc in basic diet of juvenile starry flounder. Broken-line regression analysis showed that the optimum dietary zinc requirement for juvenile starry flounder, using WGR as response criteria, was 167.88 mg/kg of dietary zinc.

Key words: *Platichthys stellatus*; zinc; growth performance; tissue accumulation; antioxidation

Corresponding author: ZHANG Li-min. E-mail: ytzlm@139.com