

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14519

饲料锌对团头鲂幼鱼生长性能、血清生化指标和抗氧化功能的影响

蒋明^{1,2}, 黄凤¹, 文华¹, 王卫民², 吴凡¹, 刘伟¹, 田娟^{1,2}, 杨长庚¹

1. 中国水产科学研究院 长江水产研究所, 农业部淡水生物多样性保护与利用重点开放实验室, 湖北 武汉 430223;
2. 华中农业大学 水产学院, 淡水水产健康养殖湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070

摘要: 以酪蛋白和明胶为蛋白源, 七水硫酸锌($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)为 Zn 源, 分别配制成 7 种 Zn 含量(7.4 mg/kg、20.3 mg/kg、32.1 mg/kg、51.0 mg/kg、84.4 mg/kg、169.7 mg/kg、332.4 mg/kg)的半纯化饲料, 投喂初始体重为(3.6±0.1) g 团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)12 周, 考察 Zn 对团头鲂幼鱼生长性能、血清生化指标和抗氧化功能的影响, 确定团头鲂幼鱼对饲料 Zn 的需要量。结果表明, 随着饲料 Zn 含量增加, 团头鲂增重率、特定生长率和全鱼 Zn 含量呈先增加后稳定的趋势; 全鱼水分含量显著降低($P<0.05$), 粗蛋白含量显著增加。饲料 Zn 含量对团头鲂饲料系数无显著影响。饲料中添加 Zn 显著影响血清总蛋白、尿素氮、高密度脂蛋白胆固醇、总胆固醇以及甘油三酯含量, 而对血清白蛋白含量和碱性磷酸酶活性无显著影响。随着饲料中 Zn 含量的增加, 团头鲂肝丙二醛含量显著降低($P<0.05$), 而肝过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性在各处理间均无显著差异。折线回归分析表明, 团头鲂幼鱼(体重 3.6~26.7 g)获得最佳生长时对饲料 Zn 需要量为 32.6 mg/kg, 获得最大鱼体 Zn 含量时 Zn 的需要量为 47.6 mg/kg。本研究旨在确定团头鲂幼鱼对饲料中 Zn 的需要量, 为配制团头鲂高效环保饲料提供科学依据。

关键词: 团头鲂; 锌; 需要量; 生长

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)06-1167-10

锌(Zn)是维持鱼类正常生长、发育所必需的微量元素, 它不仅参与机体的各种代谢而且还在骨骼发育、生殖、免疫、生物膜稳定和基因表达等生理机能中担负重要角色。饲料中 Zn 缺乏会导致鱼类生长缓慢、食欲减退、死亡率增高和骨骼受损, 并影响免疫功能^[1]。Zn 供给过量会增加饲料成本, 影响钙、镁和铁等元素的吸收利用, 同时引起养殖水体中 Zn 含量增加^[2-3]。这不仅会影响养殖鱼类的摄食^[4], 而且对鱼类的存活构成重大威胁^[5]。因此准确掌握饲料中 Zn 元素的配比是保障养殖鱼类正常生长和减少养殖过程中 Zn 排放的关键措施之一。

目前对水产养殖动物 Zn 的需要量研究较多, 但由于研究对象和试验条件的不同, 所得需要量数据差别较大。例如, 虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[5]和鲤(*Cyprinus carpio*)^[6]对 Zn 的需要量为 15~30 mg/kg、斑点叉尾鲴(*Ictalurus punctatus*)^[7]为 20 mg/kg、草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)为 55.1 mg/kg^[8]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)为 37.2 mg/kg^[9]、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[10]为 17.12~20.86 mg/kg、大西洋鲑(*Salmo salar*)^[2]为 37~57 mg/kg、大黄鱼(*Pseudosciaena crocea* R.)^[11]为 59.6 mg/kg。团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)是中国重要的养殖鱼类之一, 其鱼种阶段(50~122 g)对 Zn 的需要量

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-02-05.

基金项目: 国家大宗淡水鱼类产业技术体系项目(CARS-46); 2010 年公益性行业(农业)科研专项经费(201003020); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2013JBFM22).

作者简介: 蒋明(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事鱼类营养与饲料研究. E-mail: jiangm.hb@163.com

通信作者: 文华, 研究员. E-mail: wenhua.hb@163.com

为 184.85 mg/kg^[12]。20 世纪末, 朱雅珠等^[13]采用 L16(4⁵) 正交法研究了团头鲂幼鱼(4.9~18.6 g)对 Zn 的需要量为 20 mg/kg。鉴于当前国内外的鱼类营养研究者普遍采用单因素梯度实验方法研究鱼类的营养需要量, 且已有的 2 篇报道中团头鲂对 Zn 的需要量差异较大, 所以本实验用不同含量 Zn 饲料投喂团头鲂幼鱼 12 周, 研究其对实验鱼生长性能、血清生化指标和抗氧化功能的影响, 以重新评估团头鲂幼鱼对饲料 Zn 的需要量, 为配制团头鲂高效环保饲料提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

以酪蛋白-明胶为蛋白源、混合油脂(豆油、玉米油, 质量比为 1:1)为脂肪源、糊精为糖源, 以分析纯七水硫酸锌($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)为 Zn 源, 配制成 7 组半纯化饲料, 其基本组成和营养成分见表 1, 试验饲料中 Zn 的设计添加量为 0、10 mg/kg、20 mg/kg、40 mg/kg、80 mg/kg、160 mg/kg 和 320 mg/kg ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 替代基础饲料中的微晶纤维素)。原子火焰分光法检测饲料中 Zn 的含量分别为 7.4 mg/kg、20.3 mg/kg、32.1 mg/kg、51.0 mg/kg、84.4 mg/kg、169.7 mg/kg、332.4 mg/kg。各原料粉碎后过 0.246 mm 筛, 称质量后逐步混匀, 加适

量的水用绞肉机挤压成条状, 电扇吹干后, 破碎成 Φ 0.5~1.0 mm 的圆柱形颗粒, -20℃ 保存备用。

1.2 实验鱼和实验方法

实验鱼为中国水产科学研究院长江水产研究所窑湾试验场繁育的当年团头鲂幼鱼, 正式实验前挑选健康活泼、规格一致的团头鲂暂养于长江水产研究所室内循环水养殖系统养殖桶(500 L)中, 投喂基础饲料驯化, 4 周后挑选规格均匀的团头鲂[平均初始体重为(3.6±0.1) g]随机分配至 21 个养殖桶中, 每养殖桶放养 40 尾, 随机分成 7 组, 每组设 3 个重复, 分别投喂 7 组实验饲料, 每天 3 次投喂(8:30~9:30, 12:30~13:30, 16:30~17:30), 表观饱食投喂。每日 8 点换水 1 次, 日换水量约占总体积 1/3 并清除桶内粪便。养殖持续 12 周, 饲养期间水温为 25~32℃, pH 7.1~7.3, 连续不间断充氧确保溶氧 5.0 mg/L 以上, 总氨氮低于 0.5 mg/L, Zn 含量为 1.4~1.7 μg/L, 自然光照周期。

1.3 样品采集、测定

实验开始和结束时, 鱼体均禁食 24 h, 称量并记录实验鱼初始体重(initial body weight, IBW)和终末体重(final body weight, FBW)同时计数团头鲂尾数, 计算增重率(weight gain rate, WGR)和成活率(survival rate, SR)。实验结束后统计每个重复投喂的饲料质量, 计算饲料系数(feed conversion

表 1 基础饲料配方及其基本营养组成(干重)

Tab. 1 Formulation and proximate analysis of the basal diet (on dry weight basis)

%

原料 ingredient	含量 content	基本营养组成 proximate composition	
酪蛋白 casein	32	水分 moisture	9.7
明胶 glutin	8	粗蛋白 crude protein	31.0
糊精 dextrine	36	粗脂肪 crude lipid	7.9
玉米油 corn oil	3.5	灰分 ash	2.9
大豆油 soybean oil	3.5		
氯化胆碱 choline chloride	0.25		
维生素预混料 ¹⁾ vitamin premix ¹⁾	1		
矿物质预混料 ²⁾ mineral premix ²⁾	5		
微晶纤维素 micro-cellulose	10.75		

注: 1) 维生素预混料(IU 或 mg·kg⁻¹ 饲料): 维生素 A 4500 IU; 维生素 D 1000 IU; 维生素 E 100; 维生素 K₃ 5; 维生素 B₁ 10; 维生素 B₂ 20; 维生素 B₆ 10; 维生素 B₁₂ 0.05; 烟酸 25; 维生素 C 400; 泛酸钙 100; 叶酸 5; 生物素 1; 肌醇 500。2) 矿物质预混料采用荻野珍吉配方^[14], 不添加锌。

Note: 1) Vitamin premix (IU or mg·kg⁻¹ dry diet): vitamin A 4500 IU; vitamin D 1000 IU; vitamin E 100; vitamin K₃ 5; thiamine 10; riboflavin 20; pyridoxine 10; cyanocobalamin 0.05; Niacin 25; vitamin C 400; calcium pantothenate 100; folic acid 5; biotin 1; inositol 500. 2) Mineral premix refers to Literature^[14] without Zn.

rate, FCR); 每个养殖桶随机取 5 尾鱼, 用于测定全鱼基本营养成分^[15]; 另从每个养殖桶中随机取 3 尾鱼并测量其体重和体长, 计算肥满度(condition factor, CF); 之后从尾部静脉采血, 4℃静置 2 h, 3000 r/min 离心 10 min, 取上层血清用 Sysmex 全自动生化分析仪(Chemix-800)测定血清白蛋白(albumin, ALB)、总蛋白(total protein, TP)、碱性磷酸酶活性(alkaline phosphatase, ALP)、尿素氮(urea nitrogen, BUN)、高密度脂蛋白胆固醇含量(high density lipoprotein cholesterol, HDLC)、总胆固醇(total cholesterol, TCHO) 和甘油三脂(triglyceride, TG)的检测; 另取 3 尾实验鱼进行解剖, 分离内脏和肝并称质量, 计算肝体比(hepatosomatic index, HSI)和脏体比(viscerosomatic index, VSI), 将肝保存于-80℃冰柜, 用于肝抗氧化指标的测定。超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性、脂质过氧化物丙二醛(malonaldehyde, MDA)含量、淀粉酶活性和脂肪酶活性均采用南京建成生物技术研究测试盒测定。

1.4 统计分析

实验结果均以平均值±标准差表示, 用 SPSS 18.0 统计软件中 One-Way ANOVA 方差分析和 Tukey's 均值多重比较法对实验结果的差异显著

性进行分析处理, 当 $P<0.05$ 时, 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 饲料 Zn 含量对团头鲂幼鱼生长性能、成活率以及形体指标的影响

在 12 周的养殖试验中, 饲料中的 Zn 含量不足的实验组的实验鱼除了表现出较低的生长速度以及摄食量减少外, 未发现其他肉眼可见的缺乏症。

随着饲料中 Zn 含量的增加, 团头鲂幼鱼增重率和特定生长率呈先增加后稳定的趋势(表 2)。当饲料中 Zn 含量不超过 32.1 mg/kg 时, 试验鱼的终末体重、增重率和特定生长率均随着饲料中 Zn 含量的增加而提高, 当饲料中 Zn 含量超过 32.1 mg/kg 时, 终末体重、增重率和特定生长率保持平稳。饲料中 Zn 含量对饲料系数和脏体比影响不显著($P>0.05$)。随着饲料中 Zn 含量的增加, 试验鱼体的肥满度呈现先增加后降低的趋势, 在 169.7 mg/kg 组时达到最大($P<0.05$)。对照组肝体指数显著高于其他各组($P<0.05$), 其他各组之间无显著性差异($P>0.05$)。试验期间, 各组间的成活率均为 100%, 无显著差异($P>0.05$)。应用折线模型分析团头鲂幼鱼特定生长率与饲料 Zn 含量的关系, 团头鲂获得最佳生长时, 对 Zn 的需要量为 32.6 mg/kg(图 1)。

表 2 投喂不同 Zn 含量饲料的团头鲂幼鱼 12 周生长性能和形体指标
Tab. 2 Weight gain, feed efficiency and body indices of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* fed different Zn diets for 12 weeks

项目 item	饲料 Zn 含量/(mg·kg ⁻¹) dietary zinc level						
	7.4	20.3	32.1	51.0	84.4	169.7	332.4
初始质量/g IBW	3.6±0.0 ^a	3.6±0.0 ^a	3.6±0.0 ^a	3.6±0.1 ^a	3.7±0.0 ^a	3.7±0.0 ^a	3.6±0.1 ^a
末体重/g FBW	21.2±0.4 ^a	23.1±0.4 ^a	26.0±1.3 ^b	25.7±0.9 ^b	26.7±0.2 ^b	26.7±0.2 ^b	26.6±1.2 ^b
增重率/% WGR	485.2±23.6 ^a	545.4±17.7 ^b	624.9±26.8 ^c	609.9±35.0 ^c	605.7±11.7 ^c	630.2±8.4 ^c	637.7±24.3 ^c
摄食量/g FT	21.7±1.2 ^a	23.7±1.2 ^{ab}	28.1±2.3 ^c	27.9±1.2 ^c	27.3±1.5 ^{bc}	27.3±0.6 ^{bc}	28.0±0.7 ^c
饲料系数 FCR	1.2±0.0 ^a	1.2±0.0 ^a	1.3±0.0 ^a	1.2±0.1 ^a	1.2±0.0 ^a	1.2±0.0 ^a	1.2±0.0 ^a
特定生长率/(%·d ⁻¹) SGR	2.1±0.0 ^a	2.2±0.0 ^b	2.3±0.0 ^c	2.3±0.1 ^c	2.3±0.0 ^c	2.4±0.0 ^c	2.4±0.0 ^c
肥满度/(g·cm ⁻³) CF	1.9±0.1 ^{ab}	1.9±0.1 ^{ab}	1.9±0.1 ^{ab}	1.9±0.2 ^{ab}	1.9±0.1 ^{ab}	2.0±0.1 ^b	1.8±0.1 ^a
肝体比/% HSI	1.4±0.2 ^a	1.2±0.2 ^{ab}	1.1±0.2 ^{abc}	1.0±0.3 ^{bc}	1.0±0.1 ^{bc}	0.8±0.1 ^c	1.0±0.1 ^{bc}
脏体比/% VSI	7.1±0.8	7.6±1.8	7.1±1.2	7.4±1.7	7.2±0.8	7.3±1.2	7.5±1.4

注: 同行数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$, Tukey's 法); 反之, 差异显著($P<0.05$).
Note: Values in the same line sharing a same superscript letter are not significantly different determined by Tukey's test ($P>0.05$), and values with different letters are significantly different ($P<0.05$).

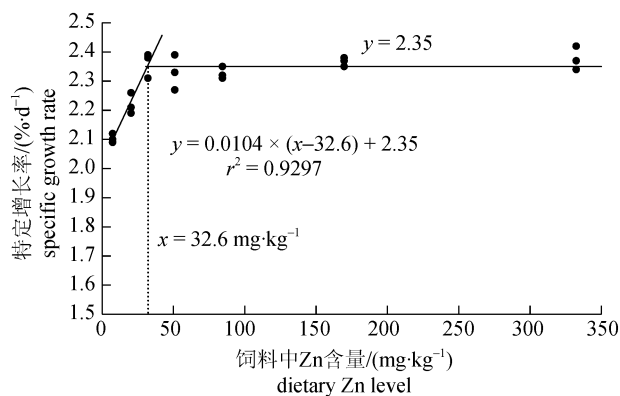


图 1 团头鲂特定生长率与饲料中 Zn 含量的折线回归关系

Fig. 1 Broken-line analysis of the relationship between dietary Zn level and specific growth rate of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*

2.2 饲料 Zn 含量对团头鲂幼鱼体成分组成的影响

饲料 Zn 含量显著影响了团头鲂幼鱼的体成分(表 3), 全鱼水分和粗蛋白含量在所有添加组间无显著性差异($P>0.05$), 但 Zn 添加组显著高于 Zn 未添加组($P<0.05$)。7.4 mg/kg 和 332.4 mg/kg 两组的粗脂肪含量显著低于其他试验组($P<0.05$), 其他试验组之间无显著性差异($P>0.05$)。20.3 mg/kg 和

169.7 mg/kg 组的灰分含量显著高于 7.4 mg/kg 组, 但与其他组无显著差异。全鱼中 Zn 含量呈先增加后维持稳定的趋势, 在 51.0 mg/kg 组达到最高。应用折线模型分别分析鱼体 Zn 含量与饲料 Zn 含量关系, 确定饲料 47.6 mg/kg Zn 可以使团头鲂幼鱼全鱼 Zn 含量达到饱和(图 2)。

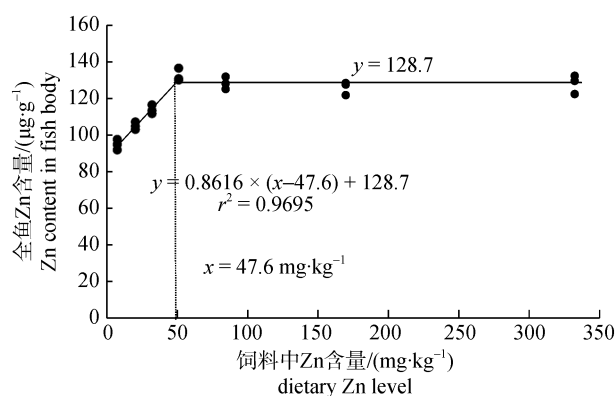


图 2 团头鲂鱼体 Zn 含量与饲料中 Zn 含量的折线回归关系

Fig. 2 Broken-line analysis of the relationship between dietary Zn level and fish Zn content of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*

表 3 投喂不同 Zn 含量饲料 12 周团头鲂幼鱼体成分组成

Tab. 3 Proximate composition of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* fed different Zn diets for 12 weeks

项目 item	饲料 Zn 含量/(mg·kg ⁻¹) dietary zinc level						
	7.4	20.3	32.1	51.0	84.4	169.7	332.4
水分/% moisture	73.3±1.0 ^a	70.5±0.4 ^b	70.3±0.4 ^b	70.3±0.3 ^b	70.7±0.2 ^b	70.4±0.7 ^b	70.3±1.8 ^b
粗脂肪/% crude lipid	6.8±0.3 ^a	7.6±0.1 ^b	7.6±0.3 ^b	7.8±0.1 ^b	7.8±0.1 ^b	7.8±0.2 ^b	6.7±0.2 ^a
灰分/% ash	3.7±0.2 ^a	4.0±0.1 ^b	3.9±0.1 ^{ab}	4.0±0.2 ^{ab}	3.9±0.1 ^{ab}	4.0±0.2 ^b	4.0±0.1 ^{ab}
粗蛋白/% crude protein	14.4±0.7 ^a	16.8±0.2 ^b	17.0±0.4 ^b	16.7±0.3 ^b	16.4±0.5 ^b	16.7±0.8 ^b	16.3±0.6 ^b
全鱼 Zn/(µg·g ⁻¹) whole body zinc	94.8±2.9 ^a	105.0±2.0 ^b	113.9±2.4 ^b	132.1±3.5 ^c	128.3±3.3 ^c	125.9±3.6 ^c	128.1±5.1 ^c

注: 同行数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$, Tukey's 法); 反之, 差异显著($P<0.05$)。

Note: Values in the same line sharing a same superscript letter are not significantly different determined by Tukey's test ($P>0.05$), and values with different letters are significantly different ($P<0.05$).

2.3 饲料 Zn 含量对团头鲂幼鱼肝部分抗氧化指标的影响

随着饲料中 Zn 含量的增加, 团头鲂肝丙二醛含量显著降低, 其中 ≥ 51.0 mg/kg 组显著高于 ≤ 32.1 mg/kg 组($P<0.05$)(表 4)。肝过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性在各组间均无显著差异($P>0.05$)。

2.4 饲料锌含量对团头鲂血清和肝淀粉酶以及肝脂肪酶的影响

饲料中 Zn 含量对团头鲂血清和肝淀粉酶活

性无显著影响($P>0.05$), 对肝脂肪酶活性具有显著地影响($P<0.05$)(表 5)。团头鲂肝脂肪酶活性在 20.3 mg/kg 组最高, 显著高于其他组($P<0.05$); 32.1 mg/kg 和 169.7 mg/kg 两组显著高于 7.4 mg/kg 组($P<0.05$)。

2.5 饲料 Zn 含量对团头鲂部分血清生化指标的影响

饲料 Zn 含量对团头鲂血清白蛋白含量和碱性磷酸酶活性无显著影响($P>0.05$), 对团头鲂血清总蛋白、尿素氮、高密度脂蛋白胆固醇、总胆

固醇和甘油三脂含量均有显著影响($P<0.05$)(表 6)。总蛋白含量呈先增加后降低的趋势, 在 51.0 mg/kg 组最高, 显著高于 7.4 mg/kg、169.7 mg/kg 和 332.4 mg/kg 组($P<0.05$)。尿素氮含量呈先降低后升高, 在 51.0 mg/kg 组最低, 显著低于对照组($P<0.05$)。在 169.7 mg/kg 组, 高密度脂蛋白胆固醇含量均最低, 显著低于对照组和 51.0 mg/kg 组($P<0.05$)。随着饲料中 Zn 含量的增加, 总胆固醇含量显著增加, 甘油三脂含量显著降低。对照组的总胆固醇和甘油三脂含量均与其他组存在显著差异($P<0.05$)。

表 4 投喂不同 Zn 含量饲料 12 周团头鲂部分抗氧化指标含量
Tab. 4 Some hepatic antioxidant indices of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* fed different Zn diets for 12 weeks

项目 item	饲料中 Zn 的含量/(mg·kg ⁻¹) dietary zinc level						
	7.4	20.3	32.1	51.0	84.4	169.7	332.4
丙二醛/[nmol·(mgprot) ⁻¹] MDA	8.6±0.4 ^a	9.0±0.7 ^a	9.4±0.9 ^a	4.2±0.7 ^b	5.2±0.6 ^b	4.8±0.4 ^b	5.3±0.1 ^b
过氧化氢酶/[U·(mgprot) ⁻¹] CAT	25.7±1.6	26.9±1.7	26.2±1.7	25.2±0.4	24.9±0.2	25.9±1.6	24.9±0.2
超氧化歧化酶/[U·(mgprot) ⁻¹] SOD	14.5±1.2	14.4±1.3	13.1±0.9	15.0±1.4	14.5±1.6	14.7±0.5	14.2±1.12

注: 同行数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$, Tukey's 法); 反之, 差异显著($P<0.05$)。
Note: Values in the same line sharing a same superscript letter are not significantly different determined by Tukey's test ($P>0.05$), and values with different letters are significantly different ($P<0.05$).

表 5 投喂不同 Zn 含量饲料 12 周团头鲂血清和肝淀粉酶以及肝脂肪酶活性
Tab. 5 Activities of amylase in serum and liver, and hepatic lipase of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* fed different Zn diets for 12 weeks

项目 item	饲料中锌的含量/(mg·kg ⁻¹) dietary zinc level						
	7.4	20.3	32.1	51.0	84.4	169.7	332.4
肝淀粉酶/[U·(gprot) ⁻¹] hepatic amylase	0.47±0.0 ^{ab}	0.51±0.01 ^b	0.48±0.02 ^{ab}	0.48±0.01 ^{ab}	0.43±0.05 ^a	0.46±0.02 ^{ab}	0.36±0.04 ^c
血清淀粉酶/[U·L ⁻¹] serum amylase	784.6±14.1	786.9±12.0	790.4±13.5	792.3±6.4	789.9±6.7	793.5±2.6	793.9±3.3
肝脂肪酶/[U·(gprot) ⁻¹] hepatic lipase	147.2±23.1 ^a	243.8±25.5 ^c	200.6±22.0 ^b	184.1±6.9 ^{ab}	183.2±1.7 ^{ab}	191.5±11.7 ^b	187.1±12.9 ^{ab}

注: 同行数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$, Tukey's 法); 反之, 差异显著($P<0.05$)。
Note: Values in the same line sharing a same superscript letter are not significantly different determined by Tukey's test ($P>0.05$), and values with different letters are significantly different ($P<0.05$).

表 6 投喂不同 Zn 含量饲料 12 周团头鲂部分血清生化指标含量
Tab. 6 Some serum biochemical indices of blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala* fed different Zn diets for 12 weeks

项目 item	饲料中 Zn 的含量/(mg·kg ⁻¹) dietary zinc level						
	7.4	20.3	32.1	51.0	84.4	169.7	332.4
白蛋白/(mmol·L ⁻¹) ALB	3.3±0.6	3.7±0.6	4.0±1.4	4.0±1.0	4.3±1.2	4.5±0.7	3.7±1.2
总蛋白/(mmol·L ⁻¹) TP	20.0±1.7 ^a	29.0±1.0 ^{bc}	28.5±2.1 ^{bc}	31.3±4.2 ^c	23.7±1.5 ^{ab}	17.5±0.7 ^a	18.0±1.4 ^a
碱性磷酸/(IU·mL ⁻¹) ALP	116.7±16.0	124.7±5.0	112.5±9.2	122.7±15.4	112.3±5.5	108.0±1.4	117.3±12.0
尿素氮/(mmol·L ⁻¹) BUN	23.9±0.7 ^a	17.4±0.4 ^c	17.1±0.9 ^{bc}	16.9±0.5 ^{bc}	17.1±0.3 ^c	17.1±0.0 ^{bc}	22.0±2.1 ^{ab}
高密度脂蛋白胆固醇/(mmol·L ⁻¹) HDLC	2.4±0.2 ^a	2.0±0.2 ^{ab}	2.1±0.2 ^{ab}	2.2±0.1 ^a	2.1±0.1 ^{ab}	1.7±0.1 ^{bc}	2.1±0.1 ^{ab}
总胆固醇/(mmol·L ⁻¹) TCHO	7.6±0.4 ^a	9.7±0.0 ^b	9.2±0.4 ^b	9.5±0.6 ^b	9.1±0.4 ^b	9.3±0.8 ^b	9.3±0.1 ^b
甘油三脂/(mmol·L ⁻¹) TG	10.3±1.3 ^a	8.1±0.0 ^b	6.6±0.5 ^b	7.4±0.4 ^b	6.2±0.2 ^b	4.1±0.1 ^c	6.6±0.7 ^b

注: 同行数据后凡有一个相同小写字母者表示差异不显著($P>0.05$, Tukey's 法); 反之, 差异显著($P<0.05$)。
Note: Values in the same line sharing a same superscript letter are not significantly different determined by Tukey's test ($P>0.05$), and values with different letters are significantly different ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 饲料 Zn 含量对团头鲂幼鱼生长性能的影响

饲料中缺 Zn 时, 将引起鱼类生长缓慢、摄食减少、死亡率高和表皮糜烂等明显缺 Zn 症状^[16-17]。

然而本试验中对照组除了生长缓慢和摄食减少外, 并未出现其他明显的 Zn 缺乏症, 这可能是由于基础饲料中 Zn 的含量足以防止上述 Zn 缺乏症的出现, 另外鱼类也能通过鳃从水环境中获得 Zn^[18]。在对蓝罗非鱼(*Oreochromis aureus*)^[19]和斑

点叉尾鲷^[7]的实验中也没有观察到上述的缺乏症。另一方面, 本实验饲料中添加过量 Zn 并没有对团头鲂幼鱼生长产生负面影响。该研究结果与在尼罗罗非鱼^[16]、斑点叉尾鲷^[7]、黄颡鱼^[10]和星斑川鲈(*Platichthys stellatus*)幼鱼^[20]的研究结果相一致。虽然本试验中 Zn 的最高添加量(320 mg/kg, 饲料中 Zn 总含量为 332.4 mg/kg)远超过生长的最适添加量, 但试验鱼并未出现外观中毒症状, 可能是团头鲂通过鳃和尿排出了过多的 Zn。Hardy 等^[21]用放射性同位素 ⁶⁵Zn 证明, 虹鳟主要通过鳃排出饲料中的 Zn, 其次是尿。

本试验对特定生长率与饲料 Zn 水平进行折线回归分析, 得出初始质量为 3.6 g 左右的团头鲂幼鱼饲料 Zn 的最适需要量为 32.6 mg/kg。与朱雅珠等^[13]在 4.9 g 团头鲂幼鱼的研究中得到的需要量(20 mg/kg)较为接近, 与刘汉超等^[12]在团头鲂鱼种(50 g)的研究中得到的数据(184.85~190.39 mg/kg)存在较大差异。饲料配方(半纯化饲料和实用饲料)可能是导致这种差异的最主要的原因, Antony Jesu Prabhu 等^[22]对 37 篇关于鱼类对 Zn 的需要量研究论文进行了统计分析, 评估了不同因子对鱼类 Zn 需要量的影响程度。他们发现对于同一种鱼类而言, 采用实用饲料的实验鱼的 Zn 需要量是采用半纯化饲料的 3 倍。在团头鲂鱼种^[13]Zn 需要量研究中的基础饲料采用了 20.5%鱼粉, 其配方接近于实用饲料。鱼粉中较高的磷酸钙会降低 Zn 的利用率, 另外饲料中的矿物质和纤维素的含量都能影响 Zn 的吸收利用率^[23-24]。另外, 不同生长阶段的团头鲂可能对 Zn 的需求存在较大的差异, 这亦可能是导致这种差异的一个原因。

本研究确定的团头鲂 Zn 需要量与其他鱼类 Zn 需要量相比, 该值高于在斑点叉尾鲷(5~10 mg/kg)^[7]、黄颡鱼(17.12~20.86 mg/kg)^[10]、虹鳟(15~30 mg/kg)^[5]、真鲷(*Sciaenops ocellatus*) (20~25 mg/kg)^[25]和尼罗罗非鱼(30 mg/kg)^[16]的研究中得到的数值, 低于大黄鱼(53.2~87.6 mg/kg)^[11]和花鲈(*Lateolabrax japonicus*)幼鱼(102.9~103.4 mg/kg)^[26]的需要量。不同实验得到的鱼类对 Zn 的需要量不尽相同, 这可能与实验鱼的品种、饲料的组成、投喂次数及

水平等多种因素有关。

3.2 饲料 Zn 含量对团头鲂幼鱼体成分组成的影响

本研究中随着饲料 Zn 摄入的增加, 团头鲂鱼体蛋白和脂肪含量显著增加, 水分含量显著减少。本结果与 Ogino 等^[5]、Sato 等^[27]和吴红岩等^[28]的研究相似, 研究表明 Zn 的缺乏可能会减弱机体对蛋白和碳水化合物的消化功能, 而使机体水分含量增加, 蛋白脂肪含量减少。然而张佳明^[11]和 Tan 等^[29]的研究表明 Zn 对鲈鱼、大黄鱼和皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai* Ino)体蛋白、脂肪和灰分含量无影响。乔永刚^[30]研究表明饲料中不同 Zn 的添加水平, 对军曹鱼(*Rachycentron canadum*)鱼体水分和粗蛋白质含量并无显著影响, 而脂肪含量显著增加, 灰分含量显著降低。

研究显示, 全鱼 Zn 含量可以用于反映饲料中 Zn 的添加水平, 多种鱼的全鱼 Zn 含量随着饲料 Zn 水平的上升先升高后趋于稳定, 如尼罗罗非鱼^[16]、鲈鱼^[11]和斑点叉尾鲷^[31], 本研究结果和上述结果相一致。然而大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)^[32]全鱼 Zn 含量随饲料 Zn 水平的上升而增大, 并且在大菱鲆 Zn 需求满足后仍呈显著的上升趋势。朱琳^[32]分析其原因可能是饲料 Zn 水平未能达到鱼体、骨骼的最高积累能力; 也可能是大菱鲆对 Zn 排出的能力差。

3.3 饲料 Zn 含量对团头鲂幼鱼肝部分抗氧化指标的影响

Zn 有抗氧化清除自由基的作用, 缺 Zn 可以使机体清除自由基的能力下降, 脂质过氧化反应加强^[33]。Hidalgo 等^[34]研究表明饲料中缺乏 Zn, 虹鳟肝 SOD 和 CAT 活性显著降低。Luo 等^[10]表明随着饲料中 Zn 增加, 黄颡鱼幼鱼肝 SOD 活性显著增加, MDA 含量显著降低。谭丽娜^[35]表明 Zn 极显著降低幼建鲤(*Cyprinus carpio* var. *jian*)血清、肠道、肝胰脏和肌肉的 MDA 含量、SOD 和 CAT 活力。谭丽娜^[35]认为 Zn 影响水生动物抗氧化功能的主要原因可能是 Zn 可参与构成 Cu-Zn SOD, 还可以诱导合成金属硫蛋白而抵制自由基的损害。本试验中团头鲂肝 MDA 含量显著降低, 该结果表明饲料中添加一定量的 Zn 可以减少团

头鲂肝内脂质过氧化物的形成,使试验鱼体内氧化压力减小,从而对机体起到保护作用。本实验中肝 CAT 和 SOD 活性在各组间无显著差异,可能是团头鲂肝 CAT 和 SOD 活性对本实验中对照组饲料中 Zn 的含量(7.4 mg/kg)还不够敏感。

3.4 饲料 Zn 含量对团头鲂血清和肝淀粉酶以及肝脂肪酶的影响

Zn 可作为淀粉酶、脂肪酶、碱性磷酸酶等酶活性形式的必需辅助因子,参与机体蛋白质、脂肪和碳水化合物等物质代谢^[36]。本实验中,饲料 Zn 含量对团头鲂血清和肝淀粉酶活性无显著影响,对肝脂肪酶活性具有显著的促进作用,肝脂肪酶活性在 20.3 mg/kg、32.1 mg/kg 和 169.7 mg/kg Zn 添加组显著高于对照组。王庆奎等^[37]研究表明添加适量的 Zn(0~91 mg/kg)能显著提高点带石斑鱼消化酶活力。谭丽娜^[35]研究也表明 Zn 可以提高幼建鲤肝胰脏消化酶活性。Zn 提高鱼体消化酶活性的原因可能是 Zn 参与维持脂肪酶和淀粉酶结构稳定^[35]。

3.5 饲料 Zn 含量对团头鲂部分血清生化指标的影响

血清生化指标广泛应用于评价动物的营养状态、健康状态和对环境的适应能力,是一项重要的生理、病理和毒理学指标。本试验中,饲料 Zn 含量对团头鲂血清白蛋白有显著影响,而血清蛋白全部是由肝制造,血清总蛋白和白蛋白含量在一定程度上能够反映鱼体对蛋白质的代谢能力^[38],该结果表明 Zn 可能在一定程度上提高了团头鲂对饲料蛋白的利用能力,但是饲料中缺少和过量的 Zn 可能会引起团头鲂蛋白质代谢功能紊乱。本实验结果还表明饲料中添加 Zn 可以影响团头鲂血清中尿素氮含量。尿素氮是蛋白质代谢的终末产物,其水平可反映动物蛋白质代谢状况,蛋白质代谢良好时,血浆尿素氮浓度降低^[39]。另外血清尿素氮主要由肾小球滤过排出体外,当肾实质受损害时,肾小球滤过功能降低,致使血浓度增加,因此测定血清尿素氮,可知肾小球的滤过功能^[38]。本实验结果还表明饲料中添加 Zn 显著影响团头鲂血脂指标,如高密度脂蛋白胆固醇、总胆固醇和甘油三脂含量,这可能与 Zn 能够影响

团头鲂肝脂肪酶活性有关。以上结果再一次证明,饲料中添加 Zn 可以一定程度上提高团头鲂蛋白质和脂肪代谢。

碱性磷酸酶(ALP)是一种含 Zn 的对底物专一性较低的磷酸单酯水解酶,它几乎存在于身体的各组织中,是膜结合酶,肝中尤为丰富。它在体内直接参与磷酸基团的转移和代谢,是生物体内的一种重要的代谢调控酶,多个试验报道碱性磷酸酶是评价鱼类 Zn 状态的一个敏感指标^[22]。研究表明饲料中添加 Zn 可以显著提高鲤鱼^[6]、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)^[40]、鲈鱼^[11]和军曹鱼^[30]的碱性磷酸酶活性。本实验饲料 Zn 含量对团头鲂血清碱性磷酸酶活性无显著影响($P>0.05$)。该结果与肝过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性在各组间无显著差异的结果相一致,可能是由于在本实验条件下,本实验中对照组饲料中 Zn 的含量(7.4 mg/kg)还不够引起团头鲂 ALP 产生显著变化。

4 结论

综上所述, Zn 是维持团头鲂幼鱼正常生长和生理所必需的营养素,其不足会引起团头鲂幼鱼摄食减少,生长受阻。随着饲料中 Zn 含量的增加,团头鲂幼鱼增重率、特定生长率和全鱼 Zn 含量呈先线性增加后稳定的趋势。以特定生长率和全鱼 Zn 含量为评价指标,分别得团头鲂幼鱼对 Zn 的需要量为 32.6 mg/kg 饲料和 47.6 mg/kg 饲料。

参考文献:

- [1] National Research Council (NRC). Nutrient Requirements of Fish and Shrimp[M]/Minerals. Washington, D C: National Academy Press, 2011: 176.
- [2] 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(1-2): 179-191.
- [3] Kuz'mina V V. The influence of zinc and copper on the latency period for feeding and the food uptake in common carp, *Cyprinus carpio* L.[J]. Aquat Toxicol, 2011, 102(1-2): 73-78.
- [4] Bervoets L, Knaepkens G, Eens M, et al. Fish community responses to metal pollution[J]. Environ Pollut, 2005, 138(2): 338-349.

- [5] Ogino C, Yang G Y. Requirement of rainbow trout for dietary zinc[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1978, 44(9): 1015–1018.
- [6] Ogino C, Yang G Y. Requirement of carp for dietary zinc[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1979, 45(8): 967–969.
- [7] Gatlin D M, Wilson R P. Dietary zinc requirement of fingerling channel catfish[J]. J Nutr, 1983, 113(3): 630–635.
- [8] Liang J J, Yang H J, Liu Y J, et al. Dietary zinc requirement of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) based on growth and mineralization[J]. Aquac Nutr, 2012, 18(4): 380–387.
- [9] Huang F, Jiang M, Wen H, et al. Dietary zinc requirement of adult Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed semi-purified diets, and effects on tissue mineral composition and antioxidant responses[J]. Aquaculture, 2015, 439: 53–59.
- [10] Luo Z, Tan X Y, Zheng J L, et al. Quantitative dietary zinc requirement of juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco*, and effects on hepatic intermediary metabolism and antioxidant responses[J]. Aquaculture, 2011, 319(1–2): 150–155.
- [11] Zhang J M. Studies on Nutritional physiology of zinc and iron for Japanese seabass, *Lateolabrax japonicus*, and large yellow croaker, *Pseudosciaena crocea* R[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007: 18–46. [张佳明. 鲈鱼和大黄鱼微量元素—锌、铁的营养生理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007: 18–46.]
- [12] Liu H C, Ye Y T, Cai C F, et al. Dietary zn requirement of *Megalobrama amblycephala*[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(9): 1522–1529. [刘汉超, 叶元土, 蔡春芳, 等. 团头鲂对饲料中 Zn 的需求量[J]. 水产学报, 2014, 38(9): 1522–1529.]
- [13] Zhu Y Z, Yang G H. Requirement of *Megalobrama amblycephala*, fingerlings for trace elements[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1998, 7(suppl.): 123–129. [朱雅珠, 杨国华. 团头鲂鱼种对微量元素需要的研究[J]. 上海水产大学学报, 1998, 7(suppl.): 123–129.]
- [14] Ogino. Fish Nutrition and Feeding[M]. Taipei: Fish World Magazine, 1980: 275. [荻野珍吉. 鱼类的营养与饲料[M]. 台北: 养鱼世界杂志, 1980: 275.]
- [15] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official Methods of Analysis of AOAC International[M]. Arlington: AOAC International, 1995.
- [16] Eid A E, Ghonim S I. Dietary zinc requirement of fingerling *Oreochromis niloticus*[J]. Aquaculture, 1994, 119(2–3): 259–264.
- [17] Scarpa J, Gatlin III D M. Dietary zinc requirements of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, swim-up fry in soft and hard water[J]. Aquaculture, 1992, 106(3–4): 311–322.
- [18] Lall S P. The Minerals[M]//Hardy J E, Halver R W. Fish Nutrition (Third Edition). San Diego: Academic Press, 2003: 259–308.
- [19] McClain W R, Gatlin III D M. Dietary zinc requirement of *Oreochromis aureus* and effects of dietary calcium and phy-tate on zinc bioavailability[J]. J World Aquacult Soc, 1988, 19(3): 103–108.
- [20] Cui L J, Zhang L M, Wang J Y, et al. Effects of dietary zinc on growth performance, tissue accumulation and antioxidation of juvenile starry flounder (*Platichthys stellatus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(9): 1420–1428. [崔立娇, 张利民, 王际英, 等. 饲料锌水平对星斑川鲈幼鱼生长、组织积累和抗氧化功能的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(9): 1420–1428.]
- [21] Hardy R W, Sullivan C V, Koziol A M. Absorption, body distribution, and excretion of dietary zinc by rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. Fish Physiol Biochem, 1987, 3(3): 133–143.
- [22] Antony Jesu Prabhu P, Schrama J W, Kaushik S J. Mineral requirements of fish: a systematic review[J]. Rev Aquac, 2014, 6: 1–48.
- [23] Denstadli V, Skrede A, Krogdahl Å, et al. Feed intake, growth, feed conversion, digestibility, enzyme activities and intestinal structure in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed graded levels of phytic acid[J]. Aquaculture, 2006, 256(1–4): 365–376.
- [24] Huang S C, Chen S M, Huang C H. Effects of dietary zinc levels on growth, serum zinc, haematological parameters and tissue trace elements of soft-shelled turtles, *Pelodiscus sinensis*[J]. Aquac Nutr, 2010, 16(3): 284–289.
- [25] Gatlin III D M, O'Connell J P, Scarpa J. Dietary zinc requirement of the red drum, *Sciaenops ocellatus*[J]. Aquaculture, 1991, 92: 259–265.
- [26] Zhou L B, Zhang W, Wang A L, et al. Effects of dietary zinc on growth, immune response and tissue concentration of juvenile Japanese seabass *Lateolabrax Japonicus*[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2009, 40(1): 42–47. [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.]
- [27] Satoh S, Takeuchi T, Watanabe T. Availability to rainbow trout of zinc in white fish meal and of various zinc compounds[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1987, 53(4): 595–599.
- [28] Wu H Y, Chen X X, Yang H J, et al. Effects of different zinc levels on growth and antioxidation of juvenile hybrid tilapia (*Oreochromis aureus* ♂ × *Oreochromis niloticus* ♀)[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(4): 621–627. [吴红

- 岩, 陈孝煊, 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.]
- [29] Tan B P, Mai K S. Zinc methionine and zinc sulfate as sources of dietary zinc for juvenile abalone, *Haliotis discus hannai* Ino[J]. Aquaculture, 2001, 192(1): 67–84.
- [30] Qiao Y G. Study on nutrition physiology of zinc, iron and copper in cobia (*Rachycentron canadum*)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007: 22–37. [乔永刚. 军曹鱼微量元素锌、铁、铜营养生理的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007: 22–37.]
- [31] Paripatananont T, Lovell R T. Chelated zinc reduces the dietary zinc requirement of channel catfish, *Ictalurus punctatus*[J]. Aquaculture, 1995, 133(1): 73–82.
- [32] Zhu L. Studies on nutritional physiology of zinc and phosphorus for juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* and juvenile Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 24–35. [朱琳. 大菱鲆和牙鲆无机盐锌、磷的营养生理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 24–35.]
- [33] Powell S R. The antioxidant properties of zinc[J]. J Nutr, 2000, 130(5): 1447S–1454S.
- [34] Hidalgo M C, Expósito A, Palma J M, et al. Oxidative stress generated by dietary Zn-deficiency: studies in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Internat J Biochem Cell Biol, 2002, 34(2): 183–193.
- [35] Tan L N. Effect of zinc on functions of digestion, immune and antioxidative of juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009: 14–80. [谭丽娜. 锌对幼建鲤消化吸收能力、免疫能力和抗氧化功能的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009: 14–80.]
- [36] Vallee B L, Falchuk K H. The biochemical basis of zinc physiology[J]. Physiol Rev, 1993, 73(1): 79–118.
- [37] Wang Q K, Yu W W, Wang D Q, et al. Effects of dietary zinc on growth and nutritional physiology of *Epinephelus coioides*[J]. Journal of Feed Industry, 2011, 32(18): 34–39. [王庆奎, 于雯雯, 白东清, 等. 锌对点带石斑鱼生长和生理生化指标的影响[J]. 饲料工业, 2011, 32(18): 34–39.]
- [38] Chen W B. Diagnostics[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2008: 349–352. [陈文彬. 诊断学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2008: 349–352.]
- [39] Wan J Y, Gao H W, Wang Y P, et al. Effects of some Chinese medical herbs on blood biochemical index of chickens[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2003, 35(11): 8–10. [万家余, 高宏伟, 王玉平, 等. 5 种中草药对肉仔鸡血液生化指标的影响[J]. 畜牧与兽医, 2003, 35(11): 8–10.]
- [40] Apines M J, Satoh S, Kiron V, et al. Bioavailability of amino acids chelated and glass embedded zinc to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, fingerlings[J]. Aquac Nutr, 2001, 7(4): 221–228.

Effects of dietary zinc on growth, serum biochemical indices, and antioxidant responses in juvenile blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*

JIANG Ming^{1,2}, HUANG Feng¹, WEN Hua¹, WANG Weimin², WU Fan¹, LIU Wei¹, TIAN Juan^{1,2}, YANG Changgeng¹

1. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation and Utilization, Ministry of Agriculture; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;
2. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University; Freshwater Aquaculture Collaborative Innovative Centre of Hubei Province, Wuhan 430070, China

Abstract: Zinc (Zn) is an essential trace element in fish. It functions as a cofactor in several enzyme systems and is involved in many important physiological processes, including improved growth and development, immune function, and defense against free radicals. Signs of impaired growth, increased mortality, cataracts, short body dwarfism, and low tissue Zn may occur in fish fed a Zn-deficient diet. In contrast, excessive dietary Zn can negatively affect the nutritional status of other elements, such as iron, cadmium, and magnesium. Therefore, it is necessary to ensure minimal dietary levels to meet the requirement and be certain that levels do not exceed the maximal limits, which can affect growth and other responses in fish. Blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) is in the Cyprinidae family, which is one of the largest fish families in the world. Production of cyprinids reached about 0.71 million tons in 2011, which is the seventh most freshwater-cultured fish species in China (Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture, China, 2012). The blunt snout bream has become an important and popular freshwater species. The dietary zinc requirement for blunt snout bream is reportedly 20–184 mg/kg. We conducted a 12-week growth experiment to quantify the optimum dietary Zn requirement of juvenile blunt snout bream and evaluated its effects on antioxidant responses in this species.

Seven experimental diets were formulated to contain graded levels of Zn (7.4 mg/kg, 20.3 mg/kg, 32.1 mg/kg, 51.0 mg/kg, 84.4 mg/kg, 169.7 mg/kg, and 332.4 mg/kg diet, supplied as ZnSO₄·7H₂O. Casein and gelatin were used as dietary protein sources). Each diet was assigned to three replicate groups of 40 fish [initial body weight, (3.6±0.1) g] cultured in 500-L aquaria ($r=0.9$ m, $h=0.75$ m). The results showed that the rate of weight gain increased linearly with the increase in dietary Zn level, then remained nearly unchanged in the high Zn treatment groups (≥ 32.1 mg/kg). Specific growth rate and fish Zn content showed a similar tendency with rate of weight gain. Whole body moisture content of blunt snout bream decreased significantly in the supplemented groups compared to that in the un-supplemented group ($P<0.05$), whereas whole body crude protein content increased significantly in the supplemented groups compared to that in the un-supplemented group ($P<0.05$). No significant difference was observed in the food conversion rate among the treatments ($P>0.05$). The serum chemistry analysis showed that dietary Zn had significant effects on contents of total protein, urea nitrogen, high density lipoprotein cholesterol, total cholesterol, and triglycerides ($P<0.05$), but no effect on albumin content or alkaline phosphatase activity ($P>0.05$). Hepatic malondialdehyde content decreased significantly ($P<0.05$), whereas superoxide dismutase and catalase remained unchanged with increases in the dietary Zn supplement rate ($P>0.05$). A broken-line regression analysis showed that the optimum dietary Zn requirement of blunt snout bream was 32.6 mg/kg for maximum growth and 47.6 mg/kg for maximum fish Zn concentration. These results increase our knowledge of the zinc requirement in blunt snout bream to enhance the feed quality and discover the versatile functions of Zn in blunt snout bream.

Key words: blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*); zinc; requirement; growth

Corresponding author: WEN Hua. E-mail: wenhua.hb@163.com