

黄鳝幼鳝对饲料中锌需求量的研究

周磊涛 黄广华 周秋白 梁立文 胡运松 陈恺文 陈希环 黄浩 王自蕊 霍欢欢 吴红翔

DIETARY ZINC REQUIREMENT OF JUVENILE *MONOPTERUS ALBUS*

ZHOU Lei-Tao, HUANG Guang-Hua, ZHOU Qiu-Bai, LIANG Li-Wen, HU Yun-Song, CHEN Kai-Wen, CHEN Xi-Huan, HUANG Hao, WANG Zi-Rui, HUO Huan-Huan, WU Hong-Xiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0417>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同形式蛋氨酸对黄鳝生长、血清生化、血清游离氨基酸含量及肌肉品质的影响

EFFECTS OF DIETARY METHIONINE ON GROWTH, SERUM BIOCHEMICAL INDEXES, SERUM FREE AMINO ACID AND MUSCLE TEXTURE OF RICE FIELD EEL (*MONOPTERUS ALBUS*)

水生生物学报. 2019, 43(6): 1155–1163 <https://doi.org/10.7541/2019.136>

饲料蛋白水平对湘华鲮幼鱼生长性能、体成分及血清生化指标的影响

EFFECTS OF DIETARY PROTEIN LEVELS ON GROWTH PERFORMANCE, BODY COMPOSITION AND SERUM BIOCHEMICAL INDICES OF JUVENILE *SINILABEO DECORUS* TUNGTING (NICHOLS)

水生生物学报. 2020, 44(2): 346–356 <https://doi.org/10.7541/2020.042>

未产卵雌性黄鳝的性转变

NATURAL SEX CHANGE OF THE “VIRGIN” FEMALE RICEFIELD EEL *MONOPTERUS ALBUS*

水生生物学报. 2021, 45(2): 387–396 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.142>

饲料中猪肉骨粉替代鱼粉对芙蓉鲤生长性能、血液生理生化、肌肉组成及质构特性的影响

EFFECTS OF DIETARY FISHMEAL REPLACEMENT WITH MEAT AND BONE MEAL ON THE GROWTH PERFORMANCE, BLOOD PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL INDICES, MUSCLE CHEMICAL COMPOSITION AND TEXTURE CHARACTERISTICS IN JUVENILE FURONG CRUCIAN CARP (FURONG CARP ♀ × RED CRUCIAN CARP ♂)

水生生物学报. 2020, 44(1): 85–94 <https://doi.org/10.7541/2020.011>

纳米缓释丁酸钠对草鱼生长性能、血清生化指标、肠道黏膜形态及*PepT1*基因表达的影响

EFFECTS OF SUSTAINED RELEASE NANOSPHERE SODIUM BUTYRATE ON THE GROWTH PERFORMANCE, SERUM BIOCHEMICAL INDICES, INTESTINAL MUCOSAL MORPHOLOGY AND *PEPT1* mRNA EXPRESSION IN INTESTINAL OF GRASS CARP (*CTENOPHARYNGODON IDELLUS*)

水生生物学报. 2021, 45(4): 764–773 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.076>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2024.2024.0417

黄鳝幼鳝对饲料中锌需求量的研究

周磊涛^{1*} 黄广华^{1*} 周秋白^{1,2,3} 梁立文¹ 胡运松¹ 陈恺文¹ 陈希环¹
黄浩¹ 王自蕊^{1,2,3} 霍欢欢^{1,2,3} 吴红翔¹

(1. 江西农业大学动物科学技术学院, 南昌 330045; 2. 江西农业大学特种水产研究所, 南昌 330045;
3. 南昌市特色水生生物营养生理与健康养殖重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 为探究黄鳝(*Monopterus albus*)对锌的适宜需求量, 以鱼粉和豆粕为蛋白源, 鱼油和豆油为脂肪源配制基础实验饲料, 以甘氨酸锌($Zn^{2+} \geq 21\%$)为锌源在基础饲料中分别添加0、10、20、40、80、160和320 mg/kg的锌, 制成7种不同锌水平的饲料(实际锌含量分别为48.24、60.79、70.25、88.04、123.88、204.35和381.65 mg/kg干物质), 饲喂初始体重为(23.17±0.04) g的黄鳝 60d, 以增重率、特定生长率、脊椎骨锌含量和血清碱性磷酸酶活性等指标综合评价黄鳝对锌的需求量。结果表明: (1)各组的增重率、特定生长率随饲料锌水平呈先上升后下降趋势, 存活率呈下降趋势, 60.79组和70.25 mg/kg组黄鳝的增重率和特定生长率较高, 381.65 mg/kg组增重率、特定生长率和存活率均最低且显著低于48.24—70.25 mg/kg组, 以增重率和特定生长率为评价指标, 黄鳝幼鳝对锌的需求量分别为56.85和56.79 mg/kg。(2)随着饲料锌水平的升高, 全鱼粗蛋白含量呈先上升后下降趋势, 70.25 mg/kg组最高, 粗脂肪呈先下降后平缓的趋势, 48.24 mg/kg组显著高于其他组, 全鱼锌含量升高、锌沉积率呈先上升后下降的趋势, 黄鳝脊椎骨、肝脏、皮肤和肾脏中锌含量显著增加, 脊椎骨锌含量呈先显著上升后平缓的现象; 肌肉中锌含量变化不明显; 全鱼铁、锰、铜、骨铁和骨锰含量呈下降趋势, 骨磷和骨钙含量呈先上升后下降趋势, 以脊椎骨锌含量为评价指标, 黄鳝对锌的需求量为81.01 mg/kg。(3)随着饲料锌水平的升高, 黄鳝血清碱性磷酸酶活力和白蛋白含量呈先上升后下降的趋势, 在88.04 mg/kg组最高且显著高于204.35—381.65 mg/kg组, 以血清碱性磷酸酶活力为评价指标, 黄鳝幼鳝对锌的需求量为76.73 mg/kg。溶菌酶活力呈先上升后下降的趋势, 60.79 mg/kg组显著高于其他组, 381.65 mg/kg组血清谷丙转氨酶活性最高且显著高于48.24—70.25 mg/kg组。综合饲料锌水平对黄鳝生长性能、体成分、组织锌沉积和血清生化指标的影响, 黄鳝饲料中适宜的锌需求量为56.79—81.01 mg/kg。黄鳝皮肤、脊椎骨和肝脏较肌肉更易沉积锌。

关键词: 生长性能; 锌; 组织锌沉积; 生化指标; 黄鳝

中图分类号: S965.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2024)07-1233-12



黄鳝(*Monopterus albus*)隶属硬骨鱼纲、辐鳍亚纲、合鳃目、合鳃科、黄鳝属, 体表无鳞, 肉质鲜美, 营养丰富, 富含多种人体代谢所必需的维生素和矿物质元素^[1]。目前黄鳝在蛋白质^[2]、脂肪^[3]、碳水化合物^[4]、维生素^[5]需求上均有一定研究, 相比其他鱼类, 其矿物质研究需求研究相对较少。锌是目前确定的15种微量元素中功能最多的元素, 存在于大多数器官、组织和体液, 不仅能参与机体

蛋白质、脂肪、维生素、碳水化合物及微量元素等的代谢, 还在生物体的生长、能量产生、基因调控、维持细胞膜和骨骼的健康等方面具有重要作用^[6]。水产动物能从水体中吸收锌, 但在淡水养殖环境中, 水体锌含量一般在0.1—50 $\mu\text{g/L}$ ^[7], 仅从水体中吸收不能满足其需求, 饲料锌是水产动物锌的主要来源。当饲料中锌不足时, 不仅会导致鱼生长速度下降, 还会引起机体发育不良、死亡率升高、

收稿日期: 2023-12-18; 修订日期: 2024-01-24

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项资金(CARS-46)资助 [Supported by the China Agriculture Research System (CARS-46)]

作者简介: 周磊涛(1998—), 男, 硕士研究生; 研究方向为水产动物营养。E-mail: 972185054@qq.com 黄广华(1998—), 女, 硕士研究生; 研究方向为水产动物营养。E-mail: 1806519795@qq.com *共同第一作者

通信作者: 周秋白, 教授, 博士生导师; E-mail: zhouqiubai@163.com

免疫应答下降、体质异常和畸形等症状^[8];当饲料中锌过量时,不仅会增加饲料成本,污染环境,而且在消化吸收过程中,锌会与铜、铁等二价矿物元素竞争结合位点,影响这些元素的吸收和利用,严重时甚至会产生生理毒性^[9]。因此在饲料中添加锌元素时应综合考虑其主要影响因素,并加以避免才能取得更好的营养价值和经济价值。本实验以甘氨酸锌为锌源,设计不同锌水平的饲料,探究不同饲料锌水平对黄鳝生长性能、生化指标及组织锌沉积的影响,旨在得出黄鳝对锌的适宜需求量及锌在不同组织沉积情况,为黄鳝饲料配制和提高黄鳝品质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

以鱼粉和豆粕为主要蛋白源,以鱼油和豆油为主要脂肪源设计出蛋白水平50%,脂肪水平7.5%的基础配方,以甘氨酸锌为锌源(98%, $Zn^{2+} \geq 21\%$)为基础饲料中添加0、10、20、40、80、160和320 mg/

kg的锌,配制成7组实验饲料。配制饲料所用的鱼粉、玉米蛋白粉、磷酸二氢钙、甘氨酸锌等均购自于江西大佑农生物科技有限公司。所有原料均经粉碎后过80目筛,按照表1的配比进行称量,以逐级放大先进行固态原料混匀,然后加入鱼油和豆油,再加入约20%的水分混匀后用60型螺旋挤压机进行制粒,待自然风干后,阴凉干燥处保存。饲料中的锌含量分别为48.24、60.79、70.25、88.04、123.88、204.35和381.65 mg/kg。

1.2 实验鱼及实验管理

实验所用黄鳝源自江西农业大学黄鳝保种养殖实验基地的人工繁殖苗,挑选980尾无伤无病、体质健壮,体重为(23.17±0.04) g的黄鳝,随机分到28个养殖箱中(规格:88 cm×66.5 cm×64 cm),每个养殖箱放35尾,分成7组,每组4个重复,养殖箱中放置水葫芦给黄鳝提供隐蔽环境。

养殖实验在江西农业大学水产养殖基地进行,养殖时间共60d。养殖期间水温为18.6—30.5℃, pH为6.5—7.5,溶解氧为4—6 mg/kg,氨氮含量<2.0 mg/

表1 实验饲料组成及营养水平(干物质)

Tab. 1 Composition and nutritional level of experimental feed ingredients (dry matter)

原料Ingredient	组别Group						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
鱼粉Fish meal	360	360	360	360	360	360	360
豆粕Soybean meal	150	150	150	150	150	150	150
复合蛋白粉Concentrate protein meal ¹	160	160	160	160	160	160	160
玉米蛋白粉Corn gluten meal	40	40	40	40	40	40	40
小麦Wheat meal	200	200	200	200	200	200	200
碎米Broken rice	30	30	30	30	30	30	30
磷酸二氢钙Ca(H ₂ PO ₄) ₂	15	15	15	15	15	15	15
预混料Premix ²	10	10	10	10	10	10	10
鱼油:豆油(1:1) Fish oil:Soybean oil (1:1)	30	30	30	30	30	30	30
氯化胆碱Choline chloride	5	5	5	5	5	5	5
甘氨酸锌Gly-Zn	0	0.05	0.10	0.19	0.38	0.76	1.52
合计Total	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
营养成分Proximate composition (%) ³							
干物质Dry matter	91.93	91.96	92.25	92.07	91.98	91.93	92.00
粗蛋白CP	49.87	50.07	50.00	49.98	49.81	50.11	49.87
粗脂肪EE	7.42	7.50	7.54	7.53	7.38	7.40	7.42
灰分Ash	11.70	11.82	11.92	12.05	12.04	12.08	12.25
总钙Total calcium	2.38	2.39	2.42	2.49	2.48	2.49	2.45
总磷Total phosphorus	1.47	1.52	1.50	1.51	1.41	1.42	1.46
锌水平Dietary zinc levels (mg/kg)	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65

注: ¹复合蛋白粉主要为虾粉The composite protein powder is mainly shrimp powder; ²预混料为每千克饲料提供 The premix provide the following per kg of diets: VA 6000.0 IU, VD 2000.0 IU, VE 100.0 mg, VK 5.0 mg, VB₁ 15.0 mg, VB₂ 15.0 mg, 烟酸niacin 30.0 mg, VB₆ 10.0 mg, 泛酸 pantothenate acid 25.0 mg, 叶酸folic acid 0.2 mg, VB₁₂ 0.03 mg, 生物素 biotin 0.2 mg, 肌醇 inositol 100 mg, VC 200.0 mg (以颗粒饲料表面喷涂的形式添加Added in the form of surface spraying of pellet feed), Fe 150 mg, Mn 20 mg, Cu 35 mg, Co 0.1 mg, I 0.35 mg, Se 0.1 mg, Mg 50 mg, K 50 mg; ³营养成分为实测值 Nutrient composition is measured value

L, 亚硝酸盐 <0.10 mg/L。每天投喂1次, 投喂时间为下午5:00, 少量多次投喂, 直至大部分黄鳝不再摄食为止, 记录每天的投喂量。在养殖期间每5天进行1次换水, 每次换水将养殖箱内水彻底换完, 用小型的抽水泵抽取经过曝气的自来水补充到原水位, 换水前测定水温, 温差不超过 2°C 。每10天测定1次换水前的水质情况, 水体中的Fe、Cu、Mn、Zn的含量结果见表2。从测定结果看, 随着饲料锌水平的升高, 水体锌含量有升高趋势, 381.65 mg/kg组显著高于其他组, 但未超过中国地表水质标准GB3838-2002 I类水的标准(水体Zn的含量不超过 50 $\mu\text{g/L}$)。

1.3 样品采集及分析方法

样品采集 实验开始前从暂养箱中挑选8尾均重为 23.17 g的黄鳝用作实验前鱼体矿物质含量分析。在养殖60d后停食24h, 称取每个养殖箱内黄鳝重量并计数, 计算黄鳝的增重率(WGR)、存活率(SR)、特定生长率(SGR)和饲料系数(FCR)。从每个养殖箱内随机取2尾黄鳝, 每组8尾, 称重, 测量体长后断尾采血, 在冰盘上解剖后收集肝脏、肠道、肾脏、皮肤、肌肉和脊椎骨用于矿物质含量分析, 采集的血液于 4°C 冰箱静置过夜后移取上清液于 -80°C 超低温保存待测。每组取8尾(每箱2尾)用作全鱼营养成分和矿物质含量分析。

常规营养成分测定 粗灰分参照GB/T6438—2007, 马弗炉 550°C 高温灼烧法; 钙采用EDTA络合滴定法; 总磷采用钼黄吸光光度法; 水分测定参照GB/T 6435—2014; 粗脂肪测定参照GB/T 6433—2006; 粗蛋白测定参照GB5009.5—2016。

血清生化指标 总蛋白、白蛋白、谷丙转氨酶、谷草转氨酶、碱性磷酸酶、溶菌酶等生化指标试剂盒均购自南京建成生物工程研究所, 严格按照试剂说明书进行测定。

矿物质含量测定 饲料和全鱼、肝脏、脊椎骨等组织及水体锌、铁、锰、铜含量测定采用

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 美国赛默飞世尔科技公司)。称取样品约 0.20 g于聚四氟乙烯微波消解内罐中, 加入 6 mL HNO_3 和 2 mL H_2O_2 , 加盖旋紧放置过夜, 按微波消解仪步骤消解试样(微波消解程序: 120°C 升温 8min , 保温 5min ; 150°C 升温 5min , 保温 5min , 190°C 升温 5min , 保温 20min), 冷却后取出消解罐, 缓慢打开罐盖排气, 在智能控温电加热器上进行赶酸, 赶酸温度为 150°C , 赶酸至试样剩余量约 0.5 — 1.0 mL, 待溶液冷却后转移至 50 mL容量瓶中, 用蒸馏水反复冲洗消解罐2—3次后定容至 50 mL待测, 同时制作标准物质样品和试剂空白。将消解液注入电感耦合等离子体质谱仪中测定, 以每种元素特有的谱线和强度为标准定性、定量分析。

结果计算及数据处理

存活率(Survival rate, SR, %) $=N_t/N_0\times 100$

增重率(Weight gain rate, WGR, %) $=(W_t-W_0)/W_0\times 100$

特定生长率(Specific growth rate, SGR, %/d) $=(\ln W_t-\ln W_0)/t\times 100$

饲料系数(Feed conversion ratio, FCR) $=W_f/(W_t-W_0)$

矿物质沉积率(Mineral retention rate, MRR, %) $=(W_t\times W_{tm}-W_0\times W_{0m})/(W_t\times W_{fm})\times 100$

式中, N_t 为终末尾数; N_0 为初始尾数; W_t 为终末体质量(g); W_0 为初始体质量(g); W_f 为摄入饲料量(g); t 为养殖天数(d); W_{tm} 为终末全鱼矿物质含量(mg/kg); W_{0m} 为初始全鱼矿物质含量(mg/kg); W_{fm} 为饲料矿物质含量(mg/kg)

结果以平均值 $\pm$ 标准误(mean $\pm$ SE)进行表示, 用SPSS 23.0统计软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 并采用Duncan氏多重比较, $P<0.05$ 为差异显著。以黄鳝增重率、特定生长率, 脊椎骨锌含量, 血清碱性磷酸酶活性为参考指标, 用OriginPro 2022软件采用折线模型进行回归分析得出黄鳝幼

表2 饲料锌水平对养殖水体Zn、Fe、Mn、Cu含量的影响(平均值 $\pm$ 标准误, $n=8$)

Tab. 2 Effects of dietary zinc level on the contents of Zn, Fe, Mn and Cu in aquaculture water (mean $\pm$ SE, $n=8$)

元素Element ($\mu\text{g/L}$)	饲料锌水平Dietary zinc levels (mg/kg)						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
锌Zn	36.63 $\pm$ 1.78 ^a	34.99 $\pm$ 1.47 ^a	39.24 $\pm$ 2.36 ^a	38.17 $\pm$ 1.72 ^a	39.19 $\pm$ 2.38 ^a	41.34 $\pm$ 2.06 ^a	49.78 $\pm$ 2.45 ^b
铁Fe	42.92 $\pm$ 1.62	42.59 $\pm$ 1.68	43.00 $\pm$ 1.48	42.41 $\pm$ 1.19	42.16 $\pm$ 0.96	42.13 $\pm$ 2.00	41.67 $\pm$ 0.92
锰Mn	11.20 $\pm$ 1.45	10.87 $\pm$ 2.24	10.81 $\pm$ 1.11	10.86 $\pm$ 1.22	12.84 $\pm$ 1.90	13.04 $\pm$ 2.71	13.07 $\pm$ 1.31
铜Cu	24.05 $\pm$ 2.85	20.46 $\pm$ 1.83	21.02 $\pm$ 1.87	22.62 $\pm$ 2.07	20.82 $\pm$ 2.22	20.67 $\pm$ 2.21	17.37 $\pm$ 1.18

注: 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($P\geq 0.05$), 含有不同英文上标字母表示有显著差异($P<0.05$);下同

Note: There is no significant difference in the same upper right corner of the same line with the same English superscript letter or without superscript ($P\geq 0.05$), and there is significant difference with different English superscript letter ($P<0.05$). The same applies below

鳢适宜锌需求量。以基础组各组织锌含量为参照,其他组组织锌与其比值计算锌的相对含量,与饲料锌水平进行相关分析,比较不同曲线的斜率得出黄鳢在各组织的沉积规律。

2 结果

2.1 饲料锌水平对黄鳢生长性能的影响

由表3可知,随着饲料锌水平的升高,黄鳢的WGR、SGR呈先上升后下降的趋势,在60.79 mg/kg组最高,饲料锌水平高于70.25 mg/kg时,黄鳢的WGR和SGR下降,在381.65 mg/kg组最低,且显著低于48.24—70.25 mg/kg组($P<0.05$)。随着饲料锌水平的升高,黄鳢的存活率呈下降趋势,381.65 mg/kg组显著低于48.24—70.25 mg/kg组($P<0.05$)。以增重率和特定生长率为评价指标,通过折线方程回归得出黄鳢对锌的适宜需求量分别为56.85和56.79 mg/kg(图1和图2)。

2.2 饲料锌水平对黄鳢全鱼营养成分的影响

由表4可知,随着饲料锌水平的升高,黄鳢全鱼粗蛋白含量呈先上升后下降趋势,于70.25 mg/kg组最高,全鱼粗脂肪含量呈先下降后平缓趋势,48.24 mg/kg组显著高于其他组($P<0.05$),全鱼水分和粗灰分

含量无显著差异($P>0.05$)。

2.3 饲料锌水平对黄鳢组织锌含量的影响

由表5和图3可知,随着饲料锌水平的升高,锌在黄鳢脊椎骨、肝脏、皮肤和肾脏组织中含量显著升高,在381.65 mg/kg组最高,且显著高于48.24 mg/kg组($P<0.05$),肠道处于上升但变化较为平缓;各组的肌肉锌含量49.83—52.73 mg/kg且差异不显著。分析各组织锌含量发现,锌在肠道、脊椎骨和肌肉沉积量较高,以锌在黄鳢各个组织锌的相对含量变化进行评估得出随着饲料锌水平的升高,各组织的沉积规律为皮肤>肝脏>脊椎骨>肾脏>肠道>肌肉。

2.4 饲料锌水平对黄鳢全鱼矿物质含量的影响

由表6可知,随着饲料锌水平的升高,黄鳢全鱼锌含量呈上升趋势,在381.65 mg/kg组最高,且显著高于48.24—123.88 mg/kg组($P<0.05$);全鱼铁含量下降趋势,在381.65 mg/kg组最低,且显著低于48.24—123.88 mg/kg组($P<0.05$);全鱼锰含量和全鱼铜含量呈先下降后平缓的趋势;全鱼锌沉积率呈先上升后下降的趋势,饲料锌水平高于70.25 mg/kg后,全鱼锌沉积率显著下降($P<0.05$)。

2.5 饲料锌水平对黄鳢脊椎骨矿物质含量的影响

由表7可知,随着饲料锌水平的升高,黄鳢脊椎

表3 饲料锌水平对黄鳢生长性能的影响(平均值±标准误, $n=4$)

Tab. 3 Effects of dietary zinc levels on growth performance of *Monopterus albus* (mean±SE, $n=4$)

指标Index	饲料锌水平Dietary zinc level (mg/kg)						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
初均重IBW (g)	23.20±0.01	23.15±0.06	23.17±0.06	23.20±0.01	23.17±0.06	23.17±0.06	23.20±0.01
末均重FBW (g)	41.20±0.69 ^{bcd}	43.03±0.82 ^d	42.70±0.87 ^{cd}	40.55±0.05 ^{bcd}	40.03±1.08 ^{abc}	39.70±0.40 ^{ab}	37.23±0.90 ^a
增重率WGR (%)	77.77±3.06 ^{bcd}	85.75±3.36 ^d	84.20±3.74 ^{cd}	74.95±0.05 ^{bcd}	72.82±4.61 ^{bc}	71.37±1.93 ^{ab}	60.57±3.91 ^a
特定生长率SGR (%/d)	0.96±0.03 ^{bcd}	1.03±0.03 ^d	1.02±0.03 ^{cd}	0.93±0.01 ^{bcd}	0.91±0.04 ^{bc}	0.90±0.02 ^b	0.79±0.04 ^a
饲料系数FCR	1.16±0.04	1.18±0.03	1.19±0.04	1.22±0.03	1.23±0.05	1.22±0.05	1.25±0.11
存活率SR (%)	100.00±0.00 ^b	100.00±0.00 ^b	98.57±0.83 ^b	97.86±0.71 ^{ab}	97.14±1.17 ^{ab}	97.20±1.17 ^{ab}	94.29±2.33 ^a

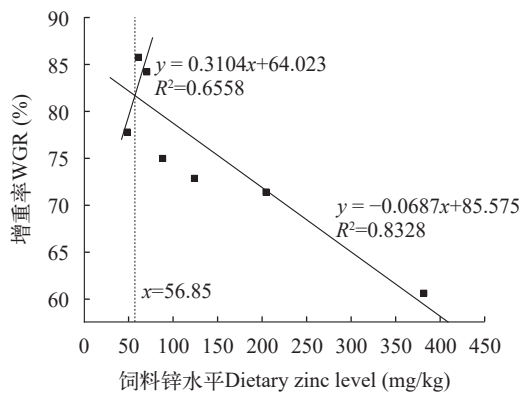


图1 增重率与饲料锌水平的关系

Fig. 1 Relationship between weight gain rate and dietary zinc level

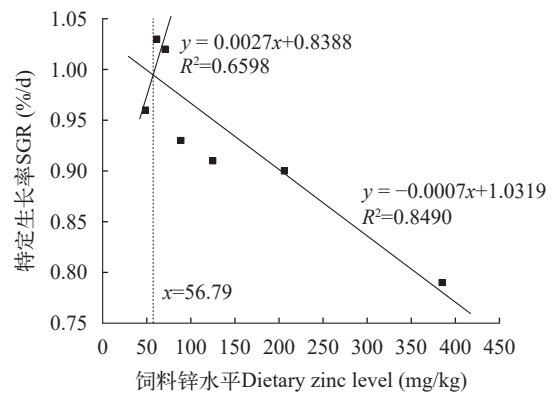


图2 特定生长率与饲料锌水平的关系

Fig. 2 Relationship between specific growth rate and dietary zinc level

骨粗灰分、钙、磷含量呈先上升后下降的趋势, 在 88.04 mg/kg 组最高, 显著高于 48.24 mg/kg 组 ($P<0.05$); 脊椎骨锌含量呈先上升后平缓的趋势; 锰和铁含量呈先下降后平缓的趋势, 脊椎骨锰在 70.25 mg/kg 组最低且显著低于 48.24—60.79 mg/kg 组 ($P<0.05$), 48.24—70.25 mg/kg 组脊椎骨铁含量显著高于 123.88—381.65 mg/kg 组 ($P<0.05$); 脊椎骨铜含量无明显变化趋势。以脊椎骨锌含量为评价指标, 通过折线方程回归得出黄鳍对锌的适宜需求量为 81.01 mg/kg (图 4)。

2.6 饲料锌水平对黄鳍血清生化指标的影响

由表 8 可知, 随着饲料锌水平的升高, 黄鳍血清碱性磷酸酶和白蛋白活力呈先上升后下降的趋势, 88.04 mg/kg 组最高且显著高于 204.35—381.35 mg/kg 组 ($P<0.05$); 谷丙转氨酶活性呈先下降后上升的趋势, 381.65 mg/kg 组最高且显著高于 48.24—70.25 mg/kg 组 ($P<0.05$); 谷草转氨酶无显著影响 ($P>0.05$); 溶菌酶活力呈先上升后下降的趋势, 60.79 mg/kg 组显著高于其他组 ($P<0.05$)。以血清碱性磷酸酶活力为评价指标, 通过折线方程回归得出黄鳍对锌的适宜需求量为 76.73 mg/kg (图 5)。

3 讨论

3.1 饲料锌水平对黄鳍生长性能的影响

锌作为生长激素、甲状腺素、胰岛素等激素的激活剂, 能参与机体核酸和蛋白合成, 能量代谢等生理过程, 对鱼类生长发育产生影响^[10]。当饲料锌缺乏时, 凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*)^[11]表

现为生长减缓、饲料利用率降低, 点带石斑鱼 (*Epinephelus malabaricus*)^[12]出现生长减缓、食欲下降、骨骼锌和钙水平及血清锌浓度降低的现象; 饲料锌过量时, 星斑川鲷幼鱼 (*Platichthys stellatus*)^[13]肝脏出现充血等中毒症状, Kou 等^[14]研究表明, 锌过量或缺乏均可引起大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 肝细胞间的空泡化和炎症。在本实验条件下, 养殖 60d 后, 低锌组 (48.24 mg/kg 组) 除生长减缓外未出现明显的锌缺乏症状, 可能是基础饲料原料中锌含量较高, 已基本满足黄鳍对锌的需求, 60.79—70.25 mg/kg 组黄鳍增重率和特定生长率较高, 饲料锌水平超过 88.04 mg/kg 后增重率和特定生长率有较为明显的下降。在南亚野鲮 (*Labeo rohita*)^[15]和大鳞副泥鳅 (*Paramisgurnus dabryanus*)^[16]的研究中也有类似的结果, 原因可能是饲料中较高的锌水平抑制了黄鳍对铁、锰和铜等金属元素的吸收, 这些元素吸收减少导致黄鳍生长减缓。在花鲈 (*Lateolabrax maculatus*)^[17]和黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)^[18]的研究发现, 较高的饲料锌水平不会影响鱼类的生长性能, 于万峰等^[19]认为鱼类可以通过把体内过量的锌排出体外, 缓解锌对机体的损伤, 这可能与不同鱼类对高锌的耐受程度有关。

3.2 饲料锌水平对黄鳍全鱼营养成分的影响

鱼体成分受到诸多因素影响, 如: 饲料营养水平、养殖种类、养殖环境和养殖时间等, 其中饲料是影响鱼类体成分的主要因素^[20]。本研究发现, 随着饲料锌水平的升高, 黄鳍全鱼粗蛋白含量呈先

表 4 饲料锌水平对黄鳍全鱼营养成分的影响 (平均值±标准误, $n=4$)

Tab. 4 Effects of dietary zinc levels on nutrient composition of whole body of *Monopterus albus* (mean±SE, $n=4$)

成分 Composition (%)	饲料锌水平 Dietary zinc levels (mg/kg)						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
水分 Moisture	72.50±0.19	72.55±0.40	72.18±0.43	72.43±0.17	72.17±0.01	72.31±0.22	72.67±0.13
粗蛋白 Crude protein	16.59±0.15 ^a	16.61±0.02 ^a	17.13±0.03 ^b	17.08±0.02 ^b	16.53±0.01 ^a	16.48±0.18 ^a	16.61±0.08 ^a
粗脂肪 Crude lipid	6.83±0.15 ^c	6.67±0.05 ^{bc}	6.45±0.02 ^{ab}	6.39±0.06 ^a	6.52±0.05 ^{ab}	6.55±0.04 ^{ab}	6.59±0.03 ^{ab}
粗灰分 Crude ash	2.19±0.02	2.22±0.01	2.23±0.01	2.22±0.01	2.18±0.02	2.22±0.02	2.22±0.01

表 5 饲料锌水平对黄鳍组织锌含量的影响 (干物质; 平均值±标准误, $n=4$)

Tab. 5 Effects of dietary zinc levels on tissue zinc content in *Monopterus albus* (dry matter; mean±SE, $n=4$)

指标 Index (mg/kg)	饲料锌水平 Dietary zinc level (mg/kg)						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
肌肉 Muscle	51.31±1.18 ^a	51.35±1.17 ^a	49.83±0.88 ^a	50.02±0.57 ^a	52.55±1.37 ^a	52.73±0.01 ^a	52.00±0.47 ^a
脊椎骨 Vertebra	34.87±2.06 ^a	41.03±3.28 ^a	53.00±1.73 ^b	59.36±2.34 ^{bc}	61.18±3.24 ^{bc}	64.58±0.74 ^c	66.93±4.15 ^c
肝脏 Liver	23.78±0.20 ^a	24.49±1.03 ^a	26.57±1.04 ^a	24.47±1.16 ^a	34.36±0.07 ^b	34.94±1.04 ^b	45.64±1.70 ^c
皮肤 Skin	21.89±0.43 ^a	23.55±0.39 ^a	25.96±1.21 ^{ab}	28.91±0.31 ^b	39.6±1.24 ^c	43.46±0.67 ^c	51.75±2.38 ^d
肠道 Intestine	77.96±1.09 ^a	81.99±2.82 ^a	84.09±4.05 ^a	85.69±2.71 ^a	87.61±3.83 ^{ab}	95.55±0.92 ^b	100.98±1.89 ^c
肾脏 Kidney	34.32±0.51 ^a	35.04±1.26 ^a	37.14±0.73 ^a	48.28±0.91 ^b	48.97±1.55 ^b	46.16±0.78 ^b	54.32±0.49 ^c

上升后下降趋势,于70.25 mg/kg组最高,全鱼粗脂肪含量呈先下降后平缓趋势,48.24 mg/kg组显著高于其他组。在其他鱼类上也有类似的研究结果,张梦婷等^[21]研究发现,在饲料中补充0.23%的褐藻寡糖锌能提高暗纹东方鲀(*Takifugu Obscurus*)肌肉的蛋白含量,降低脂肪含量;在西伯利亚鲟(*Acipenser baerii*)^[22]的研究中发现,随着饲料锌水平的升高,鱼体的粗蛋白含量呈先上升后下降趋势,粗脂肪呈下降趋势;Di等^[23]发现随着饲料锌水平的升高,鳊(*Siniperca chuatsi*)的全鱼成分无显著变化,但肝脏粗蛋白呈上升趋势,粗脂肪呈下降趋势。这些研究均表明在饲料中补充适宜锌可促进机体蛋白合成,降低脂肪沉积。

3.3 饲料锌水平对黄鳝组织锌含量的影响

水产动物能从水体中吸收锌,肠道是水产动物自然环境中吸收锌的主要途径,皮肤和鳃也有一定的吸收能力^[24]。机体吸收后的Zn主要贮存于肠道

和骨骼中^[25],当鱼体内锌缺乏时,会最先动用骨中的锌来完成生命活动,因此,骨骼锌含量可以反映整个机体锌水平和储备量。本研究发现,锌在黄鳝肠道、脊椎骨和肌肉中分布较高,随着饲料锌水平升高,黄鳝的皮肤、脊椎骨、肝脏和肾脏锌含量均有显著的升高,在其他鱼类也有类似的结果,在鲤(*Cyprinus carpio*)^[26]中研究表明,锌首先积累在消化道,接着是骨骼,然后是皮肤和肌肉;Fan等^[27]研究发现锌在金鱼(*Carassius Auratus*)组织中沉积顺序为骨>鳃>肝脏>肌肉;Wang等^[28]研究发现 Zn^{2+} 在尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)也有类似的沉积规律,不同的是罗非鱼肌肉中的锌含量最低,而黄鳝肌肉中锌含量较高。综合锌在黄鳝各个组织的相对含量变化得出锌的沉积规律为皮肤>肝脏>脊椎骨>肾脏>肠道>肌肉。

鱼类的骨骼结构由无机骨基质和无机矿物组成,无机矿物主要由胶原蛋白和羟基磷灰石组成,

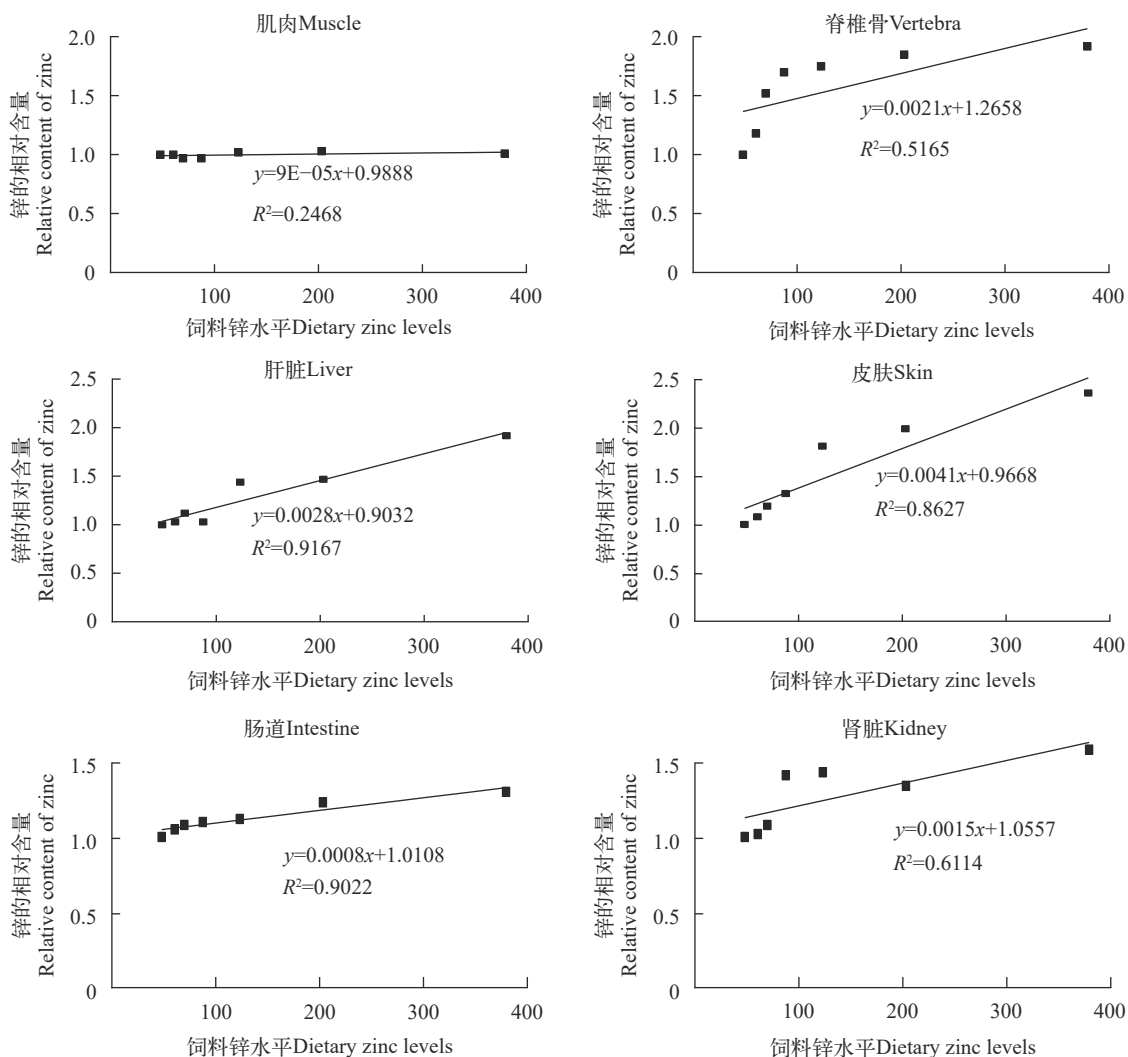


图3 黄鳝不同组织锌的相对含量与饲料锌水平的关系

Fig. 3 Relationship between the relative content of zinc in the different tissues of *Monopterus albus* and dietary zinc level

表 6 饲料锌水平对黄鳝全鱼矿物质含量的影响(干物质; 平均值±标准误, $n=4$)

Tab. 6 Effects of dietary zinc level on mineral content in whole body of *Monopterus albus* (dry matter; mean±SE, $n=4$)

指标Index (mg/kg)	饲料锌水平Dietary zinc level (mg/kg)						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
锌Zn	35.27±0.88 ^a	41.81±0.94 ^b	44.42±0.21 ^{bc}	44.70±1.51 ^{bc}	46.28±0.97 ^c	48.20±1.73 ^{cd}	51.18±0.51 ^d
铁Fe	44.17±0.75 ^d	41.64±2.20 ^{cd}	41.12±1.02 ^{cd}	41.34±1.34 ^{cd}	39.22±1.09 ^{bc}	35.94±0.33 ^{ab}	33.37±0.89 ^a
锰Mn	11.59±0.50 ^b	11.13±0.85 ^{ab}	10.46±0.09 ^{ab}	9.86±0.34 ^a	10.26±0.29 ^{ab}	10.45±0.31 ^{ab}	10.29±0.26 ^{ab}
铜Cu	5.28±0.01 ^b	4.78±0.05 ^{ab}	4.55±0.15 ^a	4.26±0.22 ^a	4.40±0.23 ^a	4.29±0.03 ^a	4.32±0.23 ^a
锌沉积率Znic RR (%)	58.98±1.01 ^c	62.67±0.59 ^c	62.15±1.80 ^c	50.02±1.05 ^d	38.18±1.83 ^c	24.95±0.81 ^b	13.92±1.20 ^a

表 7 饲料锌水平对黄鳝脊椎骨矿物质含量的影响 (平均值±标准误, $n=4$)

Tab. 7 Effects of dietary zinc level on bone mineral content in the vertebrae of *Monopterus albus* (mean±SE, $n=4$)

指标Index	饲料锌水平 Dietary zinc level (mg/kg)						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
灰分Ash (%)	39.60±0.04 ^a	39.74±0.16 ^a	40.27±0.02 ^b	40.87±0.15 ^c	40.29±0.25 ^b	39.64±0.15 ^a	39.81±0.02 ^a
钙Ca (%)	12.58±0.33 ^a	12.84±0.11 ^{ab}	13.22±0.05 ^{ab}	13.52±0.23 ^b	13.48±0.34 ^b	13.37±0.25 ^b	13.32±0.28 ^{ab}
磷P (%)	7.37±0.13 ^a	7.46±0.06 ^{ab}	7.75±0.04 ^{bc}	7.82±0.02 ^c	7.75±0.07 ^{bc}	7.68±0.17 ^{abc}	7.53±0.13 ^{ab}
锌Zn (mg/kg)	34.87±2.06 ^a	41.03±3.28 ^a	53.00±1.73 ^b	59.36±2.34 ^{bc}	61.18±3.24 ^{bc}	64.58±0.74 ^c	66.93±4.15 ^c
铁Fe (mg/kg)	126.96±2.84 ^d	119.24±1.30 ^c	112.29±1.29 ^b	110.27±0.25 ^{ab}	106.17±0.99 ^a	106.24±1.15 ^a	105.70±1.23 ^a
锰Mn (mg/kg)	121.31±0.22 ^b	114.76±3.08 ^b	98.75±1.72 ^a	102.32±4.06 ^a	102.74±0.55 ^a	101.68±0.45 ^a	104.29±1.13 ^a
铜Cu (mg/kg)	1.62±0.01	1.55±0.01	1.61±0.01	1.63±0.01	1.56±0.05	1.61±0.11	1.55±0.01

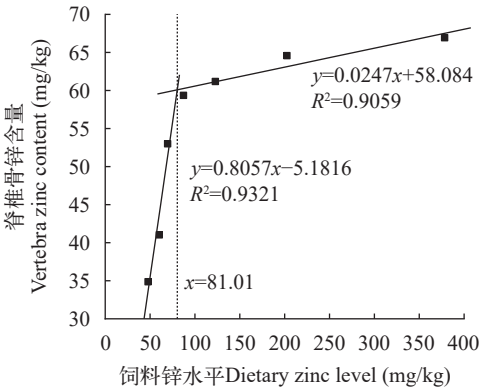


图 4 脊椎骨锌含量与饲料锌水平的关系

Fig. 4 Relationship between zinc content in vertebrae and dietary zinc level

钙、磷、锌和锰是骨骼中主要且高度保守的矿物质库, 锌能刺激成骨细胞中的细胞增殖、ALP活性和胶原合成以及改善细胞外骨基质中钙沉积, 对成骨细胞的合成代谢有重大作用^[29]。在斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)^[30]的研究中发现, 添加ZnSO₄、TBZC和Zn-HMB三种不同的锌源, 脊椎骨锌含量均随饲料锌水平呈先上升后平缓的趋势; Liang等^[31]在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)的研究中发现草鱼全鱼、脊椎骨、肝脏及鳞片的钙、磷、镁和铁含量与饲料锌水平呈负相关; Luo等^[18]研究发现, 饲料锌添加对黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)全鱼

锰、钙和镁含量无显著影响, 但有降低全鱼铜和铁含量的趋势。本研究发现黄鳝也有类似的现象, 这可能是锌与其他二价阳离子竞争作用导致, 且随着锌水平的升高, 黄鳝脊椎骨锌含量变化灵敏, 先逐渐上升, 饲料锌水平达到88.04 mg/kg后趋近平缓, 因此采用骨骼锌作为评价指标通过折线方程回归得出黄鳝对锌的适宜需求量为81.01 mg/kg具有合理性。

动物细胞中锌的平衡受金属硫蛋白(MT)的调节, 当饲料锌含量过量时, MT结合部分锌以储存锌或降低过量锌对机体的毒性^[32]。肝脏是研究鱼类营养状态的一个重要的消化器官, 肝脏中的锌主要以金属硫蛋白的形式存在, 表现为相对稳定且不随饲料锌源种类或含量而变化^[33]。在本研究中, 随饲料锌水平的升高, 48.24—88.04 mg/kg组肝脏锌含量相对稳定, 超过88.04 mg/kg后显著上升, 这可能预示着此水平已超过黄鳝肝脏能正常代谢的范围, 开始产生负面影响。Dyk等^[34]也发现暴露在高锌水体中, 罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)肝脏会出现透明化和空泡化, 并随着暴露时间的延长而加重。肾脏具有解毒、排泄和离子调节等功能, 周彦锋等^[35]研究发现, 鲫(*carassius auratus*)肾脏对锌敏感度比肝脏强, 锌更容易在肾脏蓄积。本研究发现黄鳝肾脏锌含量在饲料锌水平为48.24—70.25 mg/kg时较为稳定, 超过70.25 mg/kg后开始上升, 381.65 mg/

表 8 饲料锌水平对黄鳝血清生化指标的影响(平均值±标准误, n=6)

Tab. 8 Effects of dietary zinc level on serum biochemical indexes of *Monopterus albus* (mean±SE, n=6)

指标Index	饲料锌水平Dietary zinc levels (mg/kg)						
	48.24	60.79	70.25	88.04	123.88	204.35	381.65
碱性磷酸酶ALP (U/L)	8.62±0.27 ^{ab}	9.35±0.77 ^{ab}	9.92±0.87 ^{ab}	10.58±1.01 ^b	9.63±0.89 ^{ab}	7.91±1.11 ^a	7.50±0.10 ^a
谷丙转氨酶GPT (U/L)	2.61±0.28 ^a	2.47±0.46 ^a	2.70±0.50 ^a	2.96±0.52 ^{ab}	3.74±0.08 ^{ab}	3.67±0.55 ^{ab}	4.18±0.40 ^b
谷草转氨酶GOT(U/L)	13.52±1.12	12.06±0.60	13.84±1.11	14.04±1.36	13.99±1.50	13.86±1.11	14.49±0.24
总蛋白TP (g/L)	68.16±1.44	66.55±0.49	67.16±0.78	68.54±0.82	66.26±1.37	67.68±0.86	68.68±1.72
白蛋白ALB (g/L)	7.72±0.16 ^{abc}	7.75±0.41 ^{abc}	8.09±0.57 ^{bc}	8.60±0.40 ^c	7.32±0.26 ^{ab}	7.39±0.38 ^{ab}	6.68±0.27 ^a
溶菌酶LZM (μg/mL)	8.99±0.13 ^b	10.13±0.15 ^d	9.58±0.11 ^c	8.79±0.21 ^b	8.81±0.15 ^b	8.52±0.15 ^{ab}	8.10±0.19 ^a

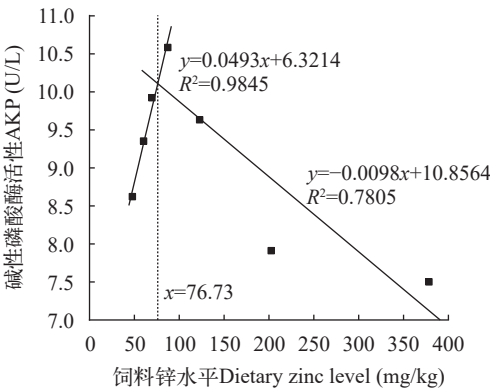


图 5 血清碱性磷酸酶活力与饲料锌水平的关系

Fig. 5 Relationship between serum alkaline phosphatase activity and dietary zinc level

kg时最高,且显著高于其他组。这表明在锌含量适宜的情况下,黄鳝肾脏能较好地发挥解毒和离子调节功能;当锌含量较高时,锌和金属硫蛋白结合物输送于肾脏而不能有效地排泄,导致锌累积于肾组织中。

获取高效优质的水产品为人食用是目前水产养殖追求的目标之一。据《中国居民膳食营养素参考摄入量2023版》统计,我国成年男性和女性锌日推荐摄入量分别为12.0和8.5 mg/d^[36]。已有研究发现锌对人类多种慢性疾病如动脉粥样硬化、多种恶性肿瘤、糖尿病、抑郁症等具有治疗作用,生蚝、扇贝等水产品是人类获取锌较佳的食物来源^[37],本研究发现黄鳝肌肉锌含量相对稳定,处于49.83—52.73 mg/kg (干物质),与黄颡鱼(50.81 mg/kg)和赤眼鳟(50.64 mg/kg)含量接近,高于鲢(33.84 mg/kg)和白鲢(27.54 mg/kg),但低于鲤(108.28 mg/kg)和鲫(77.16 mg/kg)^[38],这可能与不同鱼类的物种特异性及生活的环境和食物组成有关。这表明黄鳝肌肉可作为人们补充锌较佳的食物来源。随着饲料锌水平的升高,肌肉锌含量未产生明显的升高,可能的原因是肌肉组织代谢缓慢,经过60d的养殖饲料锌水平的变化不足以引起黄鳝肌肉锌的变化,也可能是基础组中的锌较高,黄鳝肌肉锌已基本达到饱

和,继续添加锌后不再在肌肉中富集,在克林雷氏鲃(*Rhamdia quelen*)^[39]和欧洲舌齿鲈(*Dicentrarchus labrax*)^[40]也发现了类似的结果,因此不建议在饲料中添加过量锌使黄鳝富锌。

3.4 饲料锌水平对黄鳝血清生化指标的影响

碱性磷酸酶是一种含锌的对底物专一性较低的磷酸单脂水解酶,存在各个组织中,主要由肝脏合成,随后在血液中释放,对水生动物的骨骼矿化有非常重要的作用,能够较真实地反映鱼类对锌的摄取情况^[41]。在本研究中,随着饲料锌水平的升高,黄鳝血清碱性磷酸酶活性呈先上升后下降趋势,88.04 mg/kg组最高且显著高于204.35—381.65 mg/kg组,表明适宜的锌水平对黄鳝的骨骼发育有一定的促进作用,在大鳞副泥鳅^[16]也有类似的结果。溶菌酶^[42]是先天免疫系统的一种重要防御分子,在介导对微生物入侵的保护方面很重要。本研究发现饲料锌水平为60.79—70.25 mg/kg能显著提高黄鳝血清溶菌酶活力,但超过70.25 mg/kg后开始下降,这表明适宜的锌水平能提高黄鳝抵抗病原菌的能力,但锌过量后会有不利影响。在鲮(*Liza ramada*)^[43]的研究中发现摄食20 mg/kg ZnO-NPs饲料组的溶菌酶活性显著高于摄食0、10和40 mg/kg组($P<0.05$)。Fei等^[44]也发现乌鳢(*Channa maculate* ♀×*Channa argus* ♂)溶菌酶活性随饲料锌水平呈先上升后下降的趋势。白蛋白是一种多功能蛋白质,具有抗氧化、免疫调节和解毒功能,在许多代谢物、激素、药物和必需过渡金属离子(如锌和铜)的分布中起着重要作用^[45]。在本研究中黄鳝血清白蛋白随饲料锌水平的升高呈先上升后下降的趋势,这表明适宜的锌水平能提高黄鳝的免疫能力,而锌的不足和过量会对黄鳝的免疫能力产生一定负面影响。Zhou等^[17]也发现饲料锌缺乏或过量均导致了花鲈(*Lateolabrax maculatus*)血清白蛋白含量的下降。血清谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)是评价肝脏健康的重要指标,锌能稳定肝细胞生物膜的功能,减少肝脏胶原积累,并通过控制蛋白质代谢来调节转氨

酶的水平^[46], 但锌过量可能会增加肝脏中ROS的含量, 使机体产生氧化应激并增加肝细胞通透性导致肝功能受损^[47]。此外, 锌过量也可能造成内质网应激, 损伤蛋白质代谢^[48], 引起机体肝脏氨和蛋白质羰基增加, 提高肝脏受损的风险^[39]。本研究发现, 随着饲料锌水平的升高, 谷丙转氨酶呈上升趋势, 在381.65 mg/kg组最高且显著高于48.24—70.25 mg/kg组, 表明锌过量会对黄鳝的肝功能产生不利影响。在大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[49]的研究中也发现血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶随饲料锌水平上升的现象, Kou等^[14]认为锌过量可能抑制抗氧化和免疫相关的酶活性进而产生炎症反应, 导致血清中谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性升高。

3.5 黄鳝锌需求量的确定

虽然生长是水产动物营养需求研究中的经典指标, 但在确保饲料供应最佳矿物质需求的标准时有较大差异。Prabhu等^[50]通过对180余篇鱼类矿物质需求的文献数据分析发现, 与以全鱼或脊椎骨矿物质含量为评价指标相比, 增重率得出的需求量结果更低。在本研究中, 以骨骼锌和血清碱性磷酸酶活性为评价指标, 经折线回归得出黄鳝对锌的需求量分别为81.01和76.73 mg/kg, 与增重率和特定生长率得出的56.85和56.79 mg/kg有较大差异, 说明饲料中的锌先满足黄鳝的生长, 再用于骨骼发育。郭建林等^[51]在日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)的研究中也发现, 获得最佳生长性能时其对锌的需求量为31.90 mg/kg, 而当甲壳锌含量达饱和时, 其对锌的需求量为58.62 mg/kg, 在鲤(*Cyprinus carpio* var. Jian)^[52]和尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[53]的研究中也有类似的结果。

4 结论

在本实验条件下, 饲料适宜锌水平能改善黄鳝的生长性能, 提高机体非特异性免疫。以增重率和特定生长率为评价指标, 通过折线方程回归得出黄鳝幼鳝获得最佳生长适宜的锌需求量分别为56.85和56.79 mg/kg。以骨骼锌含量和血清碱性磷酸酶为评价指标, 通过折线方程回归得出黄鳝幼鳝获得最佳的组织矿化对锌的需求量分别为81.01和76.73 mg/kg。综合饲料锌水平对黄鳝生长性能、组织锌沉积和血清生化指标的影响, 黄鳝饲料中适宜的锌需求量为56.79—81.01 mg/kg。黄鳝皮肤、脊椎骨和肝脏较肌肉更易沉积锌。

参考文献:

[1] Panchi R N, Bolin K K. The distribution, economic

aspects, nutritional, and therapeutic potential of swamp eel *Monopterus albus*: A review [J]. *Fisheries Research*, 2023(261): 106635.

- [2] Jiang W H, Yang X, Zhou Q B, et al. Requirement level of dietary protein for *Monopterus albus* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, **46**(8): 1205-1214. [姜文灏, 杨鑫, 周秋白, 等. 黄鳝饲料蛋白质需求量的研究 [J]. 水生生物学报, 2022, **46**(8): 1205-1214.]
- [3] Zhang Y Z, Guo F, Yang X, et al. Insights into the mechanism of Frontiers-lipid [J]. *Frontiers in Immunology*, 2023(14): 1-15.
- [4] Deng Y, Wu H D, Zhou J J, et al. Effects of dietary gelatinized starch on growth performance, glucose metabolism, oxidative status and fillet texture of rice field eel (*Monopterus albus*) [J]. *Aquaculture Research*, 2021, **52**(11): 5527-5536.
- [5] Hu Z H, Zhang W P, Huo H H, et al. Effects of vitamin A on growth, transaminase activity and liver microstructure of *Monopterus albus* [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, **44**(4): 988-995. [胡重华, 张文平, 霍欢欢, 等. 维生素A对黄鳝生长、转氨酶活性和肝脏显微结构的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2022, **44**(4): 988-995.]
- [6] Dawood M A O, Alagawany M, Sewilam H. The role of zinc microelement in aquaculture: a review [J]. *Biological Trace Element Research*, 2022, **200**(8): 3841-3853.
- [7] Feeney G P, Zheng D, Kille P, et al. The phylogeny of teleost ZIP and ZnT zinc transporters and their tissue specific expression and response to zinc in zebrafish [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Structure and Expression*, 2005, **1732**(1/2/3): 88-95.
- [8] Mohamed S I, Eman Y. M, Mohamed A. E, et al. Dietary Zinc oxide for growth and immune stimulation of aquatic animals species: a review [J]. *Proceedings of the Zoological Society*, 2023(76): 59-72.
- [9] Ma S L, Wang W X. Physiological trade-off of marine fish under Zn deficient and excess conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2023(901): 166187.
- [10] Pan S, Yan X, Tan B, et al. Effects of dietary zinc sources and levels on growth performance, serum biochemical and immunological indexes and tissue zinc content of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(25): 101247.
- [11] Shi B, Xu F M, Zhou Q C, et al. Dietary organic zinc promotes growth, immune response and antioxidant capacity by modulating zinc signaling in juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(19): 100638.
- [12] Chen H Y, Cheng Y C, Hu L C, et al. Dietary zinc requirements of juvenile grouper, *Epinephelus malabaricus* [J]. *Aquaculture*, 2014(432): 360-364.
- [13] 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 stel-*

- latus) [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.]
- [14] Kou H Y, Liu X T, Hu J R, *et al.* Impact of dietary zinc on the growth performance, histopathological analysis, antioxidant capability, and inflammatory response of largemouth bass *Micropterus salmoides* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2023(141): 109025.
- [15] Akram Z, Fatima M, Shah S Z H, *et al.* Dietary zinc requirement of *Labeo rohita* juveniles fed practical diets [J]. *Journal of Applied Animal Research*, 2019(47): 223-229.
- [16] Du Z J, Luo W, Liu Yi, *et al.* The dietary zinc requirement of a benthic fish *Paramisgurnus dabryanus* [J]. *Aquaculture Research*, 2020, **51**(4): 1346-1352.
- [17] Zhou C P, Lin H Z, Huang Z, *et al.* Effects of dietary zinc levels on growth performance, digestive enzyme activities, plasma physiological response, hepatic antioxidant responses and metallothionein gene expression in juvenile spotted sea bass (*Lateolabrax maculatus*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2021, **27**(5): 1421-1432.
- [18] 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.
- [19] Yu W F, Lin H Z, Huang Z, *et al.* Dietary zinc requirement of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, **31**(10): 4602-4611. [于万峰, 林黑着, 黄忠, 等. 卵形鲳鲹 (*Trachinotus ovatus*)对饲料中锌的需要量 [J]. 动物营养学报, 2019, **31**(10): 4602-4611.]
- [20] Zeng Y Q. Effects of curcumin supplementation in low-fish meal diet on growth performance, feed utilization and intestinal health of yellow drum (*Nibea albiflora*) [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022: 17-18. [曾延清. 低鱼粉饲料中添加姜黄素对黄姑鱼生长性能、饲料利用及肠道健康的影响研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022: 17-18.]
- [21] Zhang M T, Li Z X, Xing L H, *et al.* Effects of alginate oligosaccharides and its zinc complex on digestive ability, serum biochemical indexes and intestinal microflora of *Takifugu obscurus* [J]. *Feed Industry*, 2023, **44**(4): 85-91. [张梦婷, 李兆新, 邢丽红, 等. 褐藻寡糖及其锌络合物对暗纹东方鲀消化能力、血清生化指标及肠道菌群的影响 [J]. 饲料工业, 2023, **44**(4): 85-91.]
- [22] Moazen-zadeh K, Islami H R, Zamini A, *et al.* Effects of dietary zinc level on performance, zinc status, tissue composition and enzyme activities of juvenile Siberian sturgeon, *Acipenser baerii* (Brandt 1869) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, **24**(4): 1330-1339.
- [23] Peng D, Yang L W, Liang X F, *et al.* Dietary zinc levels affect growth, appetite, and lipid metabolism of Chinese perch (*Siniperca chuatsi*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2023, **49**(5): 1017-1030.
- [24] Bury N R, Walker P A, Glover C N. Nutritive metal uptake in teleost fish [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, **206**(1): 11-23.
- [25] Guo J L. Effects of Fe, Cu, Mn, Zn on growth, physiological function, content of trace elements in organs of *Carassius auratus gibelio* [D]. Suzhou: Soochow University, 2007: 12-14. [郭建林. Fe、Cu、Mn、Zn对异育银鲫生长、生理机能及器官微量元素含量的影响 [D]. 苏州: 苏州大学, 2007: 12-14.]
- [26] Jeng S S, Sun L T. Effects of dietary zinc levels on zinc concentrations in tissues of common carp [J]. *The Journal of Nutrition*, 1981, **111**(1): 134-140.
- [27] Fan W, Li Q, Yang X, *et al.* Zn subcellular distribution in liver of goldfish (*Carassius auratus*) with exposure to zinc oxide nanoparticles and mechanism of hepatic detoxification [J]. *PLoS One*, 2013, **8**(11): e78123.
- [28] Wang J J, Xiao J, Zhang J Y, *et al.* Effects of dietary Cu and Zn on the accumulation, oxidative stress and the expressions of immune-related genes in the livers of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020(100): 198-207.
- [29] Baeverfjord G, Antony J P P, Fjellidal P G, *et al.* Mineral nutrition and bone health in salmonids [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2019, **11**(3): 740-765.
- [30] Huang Q C, Wang E L, Dong X H, *et al.* Investigations on zinc bioavailability of different sources and dietary zinc requirement in juvenile grouper *Epinephelus coioides* [J]. *Aquaculture Research*, 2018(49): 2763-2773.
- [31] 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]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, **18**(4): 380-387.
- [32] Huang Y L, Luo X G, Lu L, *et al.* Recent advances in the regulation of cellular zinc homeostasis [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2007, **43**(15): 44-47. [黄艳玲, 罗绪刚, 吕林, 等. 动物细胞内锌稳态调节的研究进展 [J]. 中国畜牧杂志, 2007, **43**(15): 44-47.]
- [33] Marcelo V, Luiz E P, Margarida M B Fe L, *et al.* Optimum zinc supplementation level in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* juveniles diets [J]. *Aquaculture*, 2004, **238**(1-4): 385-401.
- [34] Dyk van J C, Pieterse G M, Vuren van J H J. Histological changes in the liver of *Oreochromis mossambicus* (Cichlidae) after exposure to cadmium and zinc [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, **66**(3): 432-440.
- [35] Zhou Y F, Wu W, You Y, *et al.* Dynamics of metallothionein in organs of *Carassius auratus* under combined stresses of Cd and Zn [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, **26**(1): 63-67. [周彦锋, 吴伟, 尤洋, 等. 重金属镉锌联合胁迫下鲫鱼组织中金属硫蛋白的

- 动态变化 [J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(1): 63-67.]
- [36] Chinese Nutrition Society. Dietary Reference Intakes for China 2023 edition [M]. BeiJing People's Medical Publishing House, 2023: 635. [中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量2023版 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2023: 635.]
- [37] Chasapis T C, Ntouna A P, Spiliopoulou A C, *et al.* Recent aspects of the effects of zinc on human health [J]. *Archives of Toxicology*, 2020, **94**(5): 1443-1460.
- [38] Zeng H, Zhang H, Xiong X Y, *et al.* Heavy metal levels in fish and their human health risk in the river-lake ecosystems of the Poyang Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(2): 649-659. [曾欢, 张华, 熊小英, 等. 鄱阳湖河湖交错区鱼类重金属含量特征及健康风险评估 [J]. 环境科学学报, 2021, **41**(2): 649-659.]
- [39] Leitemperger J, Menezes C, Oliveira V A, *et al.* The bioaccumulation of waterborne zinc in tissues of silver catfish (*Rhamdia quelen*) and its effect on biochemical parameters [J]. *Biometals*, 2019, **32**(2): 241-249.
- [40] Fountoulaki E, Morgane H, Rigos G, *et al.* Evaluation of zinc supplementation in European Sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juvenile diets [J]. *Aquaculture Research*, 2010, **41**(9): e208-e216.
- [41] Xu M Z, Zhang Q, Tong T, *et al.* Effects of dietary zinc content on growth performance, body composition, coelomic fluid zinc content and alkaline phosphatase activity of juvenile peanut worm, *Sipunculus nudus* Linnaeus [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, **28**(7): 2292-2299. [许明珠, 张琴, 童潼, 等. 饲料锌含量对方格星虫稚虫生长性能、体成分、体腔液中锌含量及碱性磷酸酶活性的影响 [J]. 动物营养学报, 2016, **28**(7): 2292-2299.]
- [42] Saurabh S, Sahoo P K. Lysozyme: an important defence molecule of fish innate immune system [J]. *Aquaculture Research*, 2008, **39**(3): 223-239.
- [43] Shukry M, Albogami S, Gewaily M, *et al.* Growth performance, antioxidant capacity, and intestinal histomorphology of grey mullet (*Liza ramada*)-fed dietary Zinc nanoparticles [J]. *Biological Trace Element Research*, 2022(200): 2406-2415.
- [44] Fei S Z, Liu H K, Li Y Z, *et al.* Zinc supplementation in practical diets for pond-raised hybrid snakehead (*Channa maculata* ♀ × *Channa argus* ♂) fingerlings: Effects on performance, mineral retention and health [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(23): 101061.
- [45] Garcia-Martinez R, Caraceni P, Bernardi M, *et al.* Albumin: pathophysiologic basis of its role in the treatment of cirrhosis and its complications [J]. *Hepatology*, 2013, **58**(5): 1836-1846.
- [46] Mohamed A M W, El-Houseiny W, Ibrahim E R, *et al.* Palliative effects of zinc sulfate against the immunosuppressive, hepato-and nephrotoxic impacts of nonylphenol in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture*, 2019(504): 227-238.
- [47] Ma S, Shu X, Wang W. Multi-omics reveals the regulatory mechanisms of zinc exposure on the intestine-liver axis of golden pompano *Trachinotus ovatus* [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(816): 151497.
- [48] Wu K, Luo Z, Hogstrand C, *et al.* Zn stimulates the phospholipids biosynthesis via the pathways of oxidative and endoplasmic reticulum stress in the intestine of freshwater teleost yellow catfish [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(16): 9206-9214.
- [49] Song B W, Yang H, Li X Q, *et al.* Dietary zinc requirement of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, **45**(10): 1715-1725. [宋博文, 杨航, 李小勤, 等. 大口黑鲈幼鱼对饲料中锌的需求量 [J]. 水产学报, 2021, **45**(10): 1715-1725.]
- [50] Antony J P P, Schrama J W, Kaushik S J. Mineral requirements of fish: a systematic review [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2016, **8**(2): 172-219.
- [51] Guo J L, Chen J M, Sun L H, *et al.* Dietary zinc requirement of juvenile oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, **25**(3): 661-668. [郭建林, 陈建明, 孙丽慧, 等. 日本沼虾幼虾对饲料中锌的需求量 [J]. 动物营养学报, 2013, **25**(3): 661-668.]
- [52] Liang X, Cao C, Chen P, *et al.* Effects of dietary zinc sources and levels on growth performance, tissue zinc retention and antioxidant response of juvenile common carp (*Cyprinus carpio* var. Jian) fed diets containing phytic acid [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, **26**(2): 410-421.
- [53] 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.

DIETARY ZINC REQUIREMENT OF JUVENILE *MONOPTERUS ALBUS*

ZHOU Lei-Tao¹, HUANG Guang-Hua¹, ZHOU Qiu-Bai^{1,2,3}, LIANG Li-Wen¹, HU Yun-Song¹, CHEN Kai-Wen¹,
CHEN Xi-Huan¹, HUANG Hao¹, WANG Zi-Rui^{1,2,3}, HUO Huan-Huan^{1,2,3} and WU Hong-Xiang¹

(1. College of Animal Science and Technology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Institute of Special Fisheries, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Nanchang Key Laboratory of Nutritional Physiology and Healthy Aquaculture of Characteristic Aquatic Organisms, Nanchang 330045, China)

Abstract: In order to determine the optimal feed zinc requirement for *Monopterus albus*, we formulated basic experimental diets using fish meal and soybean meal as protein sources, and fish oil and soybean oil as fat sources. Seven experimental diet groups were created by sequentially adding glycine zinc as the zinc source to the basic group, resulting in zinc concentrations of 0, 10, 20, 40, 80, 160, 320 mg/kg. *Monopterus albus* with an initial body weight of (23.17 ± 0.04) g were fed these diets for 60d, resulting in actual zinc contents of 48.24, 60.79, 70.25, 88.04, 123.88, 204.35, and 381.65 mg/kg dry matter, respectively. The zinc demand of *Monopterus albus* was comprehensively evaluated by weight gain rate, specific growth rate, vertebral bone zinc content and serum alkaline phosphatase activity. The results showed as follows: (1) The weight gain rate and specific growth rate initially increased and then decreased with dietary zinc level. Survival rate exhibited a declining trend. The 60.79 and 70.25 mg/kg groups showed higher weight gain and specific growth rates compared to other groups. The 381.65 mg/kg group had the lowest rates, significantly lower than the 48.24—70.25 mg/kg group. Based on gain rate and specific growth rate, the zinc demand for *Monopterus albus* was 56.85 and 56.79 mg/kg, respectively. (2) With increasing dietary zinc level, whole fish crude protein initially increased and then decreased, peaking in the 70.25 mg/kg group. Whole fish crude fat exhibited an initial decrease followed by a slowdown, with the 48.24 mg/kg group significantly higher than others. Zinc content in the whole body increased, and zinc deposition rate followed an initial increase and subsequent decrease. The content of zinc in various tissues (vertebrae, liver, skin and kidney) increased significantly, with vertebrae zinc content peaking before leveling off. Bone phosphorus and calcium content increased and then decreased. Considering zinc content in vertebral bone, the zinc demand for *Monopterus albus* was 81.01 mg/kg. (3) With the increase of dietary zinc level, *Monopterus albus* exhibited a pattern of initially increasing and subsequently decreasing serum alkaline phosphatase activity and albumin content. The apex of these parameters was observed in the 88.04 mg/kg group, surpassing significantly the range of 204.35—381.65 mg/kg. Utilizing serum alkaline phosphatase activity as the evaluation index, the zinc demand of *Monopterus albus* juveniles was determined to be 76.73 mg/kg. Lysozyme activity demonstrated an initial rise followed by a decline, with the 60.79 mg/kg group exhibiting a marked superiority over the other groups. The serum alanine aminotransferase activity in the 381.65 mg/kg group reached the highest levels, significantly higher than that in the 48.24—70.25 mg/kg group. In conclusion, considering the effects of dietary zinc levels on growth performance, nutrient composition, tissue zinc deposition, and serum biochemical indexes of *Monopterus albus*, the appropriate zinc demand in the diet ranges from 56.79 to 81.01 mg/kg. Additionally, the skin, spine, and liver of *Monopterus albus* exhibit higher susceptibility to zinc deposition than muscle.

Key words: Growth performance; Zinc; Tissue zinc deposition; Biochemical indicators; *Monopterus albus*