

饲料中添加高剂量有机硒和无机硒对异育银鲫生长性能、组织硒蓄积和血液生化指标的影响

李圆泽 刘昊昆 巩玉龙 高炜烨 朱晓鸣 韩冬 杨云霞 金俊琰 张志敏 解绶启

HIGH DIETARY DOSES OF ORGANIC AND INORGANIC SELENIUM ON GROWTH PERFORMANCE, TISSUE SELENIUM ACCUMULATION AND BLOOD BIOCHEMICAL PARAMETERS OF GIBEL CARP (*CARASSIUS AURATUS GIBELIO* VAR. CAS V)

LI Yuan-Ze, LIU Hao-Kun, GONG Yu-Long, GAO Wei-Ye, ZHU Xiao-Ming, HAN Dong, YANG Yun-Xia, JIN Jun-Yan, ZHANG Zhi-Min, XIE Shou-Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0208>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

饲料不同水平淀粉对全养殖周期异育银鲫“中科3号”生长和糖代谢的影响

A LONG-TERM CULTURE OF GIBEL CARP (*CARASSIUS AURATUS GIBELIO*) IN NET CAGES FOR 340 DAYS: EFFECTS OF DIETARY STARCH ON GROWTH AND GLUCOSE METABOLISM

水生生物学报. 2021, 45(3): 557–565 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.051>

模拟运输对异育银鲫血液生理生化指标、体色和肉质的影响

EFFECTS OF SIMULATIVE TRANSPORTATION ON THE PLASMA BIOCHEMICAL INDICES, BODY COLOR AND FILLET QUALITY OF GIBEL CARP

水生生物学报. 2019, 43(1): 86–93 <https://doi.org/10.7541/2019.011>

基于生物能量学原理构建异育银鲫生长、饲料需求和污染排放模型

BIOENERGETICS-BASED MODEL TO DETERMINE GROWTH, FEED REQUIREMENT AND WASTE OUTPUT OF GIBEL CARP (*CARASSIUS AURATUS GIBELIO*)

水生生物学报. 2018, 42(2): 221–231 <https://doi.org/10.7541/2018.028>

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>

低磷饲料中添加 α -酮戊二酸对松浦镜鲤生长性能、体成分和血清生化指标的影响

EFFECTS OF α -KETOGlutARATE SUPPLEMENTATION IN LOW-PHOSPHOROUS DIETS ON GROWTH PERFORMANCE, BODY COMPOSITION AND SERUM BIOCHEMICAL INDEXES OF SONGPU MIRROR CARP

水生生物学报. 2018, 42(3): 525–532 <https://doi.org/10.7541/2018.066>

饲料硒含量对黄颡鱼肠系膜脂肪组织中脂类代谢和miRNAs表达水平的影响

EFFECTS OF DIETARY SELENIUM ON LIPID METABOLISM AND MIRNAS EXPRESSION IN MESENTERIC ADIPOSE TISSUE OF YELLOW CATFISH *PELTEOBAGRUS FULVIDRACO*

水生生物学报. 2020, 44(4): 685–692 <https://doi.org/10.7541/2020.083>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2023.2022.0208

饲料中添加高剂量有机硒和无机硒对异育银鲫生长性能、组织硒蓄积和血液生化指标的影响

李圆泽^{1,2} 刘昊昆² 巩玉龙² 高炜烨^{2,3} 朱晓鸣^{2,4} 韩冬^{2,3,4}
杨云霞² 金俊琰² 张志敏² 解绥启^{2,3,4}

(1. 大连海洋大学, 大连 116023; 2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 湖北省水产动物营养与饲料工程技术研究中心, 武汉 430072)

摘要: 为探究饲料中高剂量的有机硒和无机硒对异育银鲫(*Carassius auratus gibelio* var. CAS V)的生长性能、硒蓄积和血浆生化指标等方面的影响, 以硒代蛋氨酸(有机硒)和亚硒酸钠(无机硒)作为不同类型的硒源, 初始体重为(62.95±0.23) g 异育银鲫为研究对象, 进行了为期90d的养殖实验。实验结果表明, 饲料中添加0、10和20 mg/kg的有机硒和无机硒对异育银鲫的存活和饲料干物质的表观消化率无显著影响; 有机硒处理组硒的表观消化率随饲料有机硒的添加量增加而显著升高($P<0.05$); 饲料中添加无机硒对硒消化率无显著影响($P>0.05$)。在饲料中添加有机硒可以提高异育银鲫的生长($P<0.05$), 在20 mg/kg 处理组中达到最高($P<0.05$); 而饲料中添加10 mg/kg 无机硒处理组未显著改变异育银鲫的特定生长率($P>0.05$), 但高浓度的无机硒则显著降低了其特定生长率($P<0.05$)。饲料中添加有机硒显著降低了异育银鲫的肝体比, 添加10 mg/kg 无机硒显著降低异育银鲫的肝体比($P<0.05$); 饲料中添加有机硒和无机硒对异育银鲫的肾体比无显著影响。饲料中添加有机硒和无机硒均显著提高了全鱼、肝脏、肾脏、肌肉、骨骼和性腺的硒含量, 其中有机硒处理组骨骼、肌肉、性腺和全鱼的硒含量显著高于无机硒处理组($P<0.05$)。饲料中添加有机硒和无机硒显著提高了血浆中葡萄糖的含量, 降低了血浆总胆红素的含量以及谷丙转氨酶和谷草转氨酶的活性($P<0.05$), 20 mg/kg有机硒组和10 mg/kg无机硒组血浆铁离子的含量也显著降低($P<0.05$)。结果表明异育银鲫对饲料中高水平的有机硒和无机硒均有较好的耐受能力。饲料中添加高水平有机硒养殖异育银鲫90d, 未表现明显的毒性作用。饲料中添加高水平有机硒比无机硒对异育银鲫具有更好的促进生长和硒蓄积作用。

关键词: 有机硒; 无机硒; 生长性能; 硒蓄积; 生化指标; 异育银鲫

中图分类号: S942.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2023)05-0702-11



硒是分散分布且稀有的硫族元素^[1], 是人和动物所必需的微量元素, 兼具重要的生理功能和毒性作用。环境中主要的硒无机化合物是硒酸盐和亚硒酸盐。在生物体内, 硒与氨基酸通过共价键相结合形成含硒的氨基酸, 如硒代蛋氨酸、硒代半胱氨酸和硒代胱氨酸等, 并合成硒蛋白发挥生理功能。硒的毒性最早被人们所认识, 从1817年硒被瑞典化学家Berzelius^[2]发现以来的一个多世纪中, 硒一直

被认为是一种有毒的元素^[3]。直到1950年, 德国科学家Schwarz^[4]才发现硒能够作为一种保护因子, 具有阻止营养性肝坏死的重要生理功能。1957年, Schwarz和Foltz^[4]证实了硒确实可以有效的防治动物的肝坏死, 从那时起, 硒对动物的有益作用逐渐受到关注。1953年, 在我国黑龙江省克山县发现, 缺硒地区的人群由于缺硒导致的地方性心肌病被称为克山病, 1979年我国发表了硒可以有效预防克

收稿日期: 2021-11-30; **修订日期:** 2021-11-30

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2019YFD0900200); 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-45); 中国科学院科技扶贫项目(KFJ-FP-201803)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2019YFD0900200); China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-45); Poverty Alleviation through Agricultural Projects from the Agricultural Office of Chinese Academy of Sciences (KFJ-FP-201803)]

作者简介: 李圆泽(1994—), 男, 硕士研究生; 主要从事鱼类生理生态学研究。E-mail: 15770080434@163.com

通信作者: 刘昊昆(1984—), E-mail: liuhaokun@ihb.ac.cn

山病^[5], 奠定了硒作为人体必需微量元素的基础。目前硒作为必需微量元素已得到广泛认可, 研究已充分证明了硒在抗氧化、调节免疫、促进生长和提高繁殖性能等方面具有多种生理功能, 摄食适量的硒有助于动物的健康生长。

已有较多的文章报道了水生动物对食物中硒的需求量。在水生动物营养方面, 早期研究多以无机硒作为硒在饲料中的添加形式^[6], 无机硒最常见的是亚硒酸盐(Na_2SeO_3)和硒酸盐(Na_2SeO_4), 无机硒具有一些缺点, 如安全添加量较低。毒性较大、生物利用度低、在生物体内蓄积能力较差等。较晚的研究中更多采用有机硒开展研究^[6], 例如硒代蛋氨酸和酵母硒, 有机硒的生物利用度较高, 易被机体消化吸收, 并且有机硒的安全剂量的范围较大, 更为安全。饲料中最适硒的添加水平因硒的类型、鱼的种类和生长发育阶段而有所差异。在以异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)幼鱼为对象的研究中, 以特定生长率、饲料效率、蛋白质效率、全鱼和肌肉的硒含量作为衡量硒需求量的指标, 发现以酵母硒为硒源时, 异育银鲫饲料中硒的最适需求为0.6 mg/kg, 以亚硒酸钠为硒源时, 饲料中硒的最适需求为1.2 mg/kg^[7]。在异育银鲫“中科3号”(*Carassius auratus gibelio* var. CAS III)幼鱼的研究中, 以蛋氨酸硒作为有机硒源, 以生长、肝脏谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)活力和组织蓄积为评价指标, 通过折线回归得到异育银鲫中科3号幼鱼的最适硒需求为1.18 mg/kg^[8]。同样以硒代蛋氨酸作为硒源, 养成中期的异育银鲫作为研究对象, 对实验鱼的生长、肝脏SOD和T-AOC活性的结果进行线性回归分析, 发现基于肝脏硒的生物蓄积, 养成中期异育银鲫的最适饲料硒需求为0.73 mg/kg; 基于肝脏超氧化物歧化酶(SOD)活力和总抗氧化酶(T-AOC)活力, 养成中期异育银鲫硒的需求量分别为1.12和1.19 mg/kg^[9]。在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的研究中以亚硒酸钠为硒源时, 发现虹鳟幼鱼的硒需求量为0.38 mg/kg, 苗种期虹鳟对硒的需求量为0.45 mg/kg。在尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)对硒需求量的研究中, 以硒代蛋氨酸为硒源, 硒的最适添加量为1.06—2.06 mg/kg^[10]和3.00 mg/kg^[11], 以亚硒酸钠为硒源最适硒添加量为1.50^[12]、3.00^[11]和6.00 mg/kg^[12]。

针对硒特殊的生理学功能, 研究者也会采用不同的生理指标来判断饲料中硒的最适添加量。Lin和Shiau^[13]以生长和硒的蓄积作为评价指标, 发现点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)饲料中最适硒代蛋氨酸水平是0.77 mg/kg。以生长和抗氧化能力为评价标准, 谈枫等^[14]得出花鲈(*Lateolabrax*

japonicus)饲料中亚硒酸钠的适宜添加量为0.63—0.75 mg/kg。在南亚野鲮(*Labeo rohita*)的研究中, 饲料中纳米硒含量达到0.30 mg/kg时能够增强机体对细菌感染的抵抗力^[15]。以生长性能、抗氧化能力和非特异性免疫能力为评价标准, 大西洋白姑鱼(*Argyrosomus regius*)饲料中酵母硒的适宜添加量为3.98 mg/kg^[16]。在Le和Fotedar^[17]的研究中, 以增重率的二次回归估算得到黄条鲮(*Seriola lalandi*)饲料中最适酵母硒添加量为5.56 mg/kg。

鱼类对不同类型的硒生物利用率具有差异的原因尚未被完全确定^[18], 有研究认为有机硒可通过主动运输的方式穿过肠壁被机体吸收, 而无机硒则通过被动运输的方式穿过肠壁被机体吸收^[19]。无机硒的价格相对廉价, 是饲料中较多使用的剂型。农业农村部1224号公告《饲料添加剂安全使用规范》规定, 可用于饲料的硒添加剂为酵母硒和亚硒酸钠, 其中硒在饲料中的最高限量为0.5 mg/kg, 推荐添加量为0.1—0.3 mg/kg。因硒是典型的微量元素, 在营养与饲料领域的研究中, 通常以较低的添加水平开展研究(范围<2 mg/kg)。然而硒在地理位置的分布并不均匀, 例如我国就存在极度缺硒的黑龙江省克山地区和作为“世界硒都”的湖北省恩施地区。因此也有必要研究不同类型硒化合物在较高浓度时对养殖动物的影响。

异育银鲫是利用银鲫独特的异精雌核生殖方式, 通过选育获得的育种核心群体, 其中异育银鲫“中科5号”(*Carassius auratus gibelio* var. CAS V)是用团头鲂精子刺激10代雌核生殖扩群培育出的新品种。与其他鲫鱼品种相比, 异育银鲫“中科5号”具有生长速度快, 抗病能力强, 后代不分化, 性状稳定等众多优点^[20]。目前高水平硒对异育银鲫的影响尚不明确, 高剂量不同形式硒对异育银鲫影响相关的文献报道较少。本文为探究饲料中高剂量的有机硒和无机硒对异育银鲫的生长性能、硒蓄积和血浆生化指标的影响, 采用有机硒和无机硒作为有机硒和无机硒的来源, 在饲料中添加高达10和20 mg/kg的硒, 进行为期90d的养殖实验, 研究结果将有助于深入理解不同类型硒源的毒性和蓄积特性, 并且对于富硒地区富硒动物制品的开发也具有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

以小麦浓缩蛋白和酪蛋白为主要蛋白源, 以玉米淀粉为主要碳水化合物源, 以鱼油和豆油为主要脂肪源配成等脂等蛋白的半纯化饲料。实验设计共5个处理组, 采用有机硒(硒代蛋氨酸)和无机硒

(亚硒酸钠)2种硒源制作饲料, 每种硒源按照不同饲料硒含量设计3个处理组(硒水平分别为10和20 mg/kg), 共用1个对照组(硒水平为0)。原料经粉碎后混匀并过筛, 按逐级稀释的方法分别将硒代蛋氨酸、亚硒酸钠与其他饲料原料混匀, 使用单螺杆制粒机(SLP-45, 中国水产科学研究院上海渔业机械研究所)制粒。然后在70℃下烘干, 冷却后储存在4℃的冷库中。实验饲料配方见表1。

1.2 实验动物与养殖管理

异育银鲫来源于黄石市富尔水产苗种有限公司, 实验鱼先在中国科学院水生生物研究所室内的圆形养殖缸中用未添加硒的对照组饲料驯化3周。驯化期间每天9:00和18:00投喂至表观饱食。

正式养殖实验采用流水方式进行。养殖系统由聚乙烯缸(160 L)组成, 自然水中加入硫代硫酸钠

去除余氯, 经曝气后流经过滤棉、珊瑚石和活性炭以净化水质。实验开始前实验鱼饥饿24h, 实验开始时随机挑选平均体重为(62.95±0.23) g的健康鱼, 沥干水分称重后放入21个聚乙烯缸中, 每缸15尾。将21个缸随机分为7组, 每组3个平行, 同一组投喂1种饲料。实验期间每天8:30、14:00和18:00投喂至表观饱食, 每天投喂前清理残饵和粪便。养殖期间的水温变化范围为(24.21±1.77)℃, 余氯<0.1 mg/L, 溶解氧>5 mg/L, 氨氮<0.5 mg/kg, 水中硒含量<0.001 mg/L。养殖周期为90d。

1.3 实验取样

养殖实验取样前1天饥饿养殖鱼24h。对每缸鱼计数, 然后抹干水分并称重。每缸随机挑选8条鱼, 首先麻醉, 其中2条装入密封袋中放入-20℃冰箱中保存, 用于分析鱼体基本成分和全鱼硒含量;

表1 实验配方及生化组成

Tab. 1 Experimental formulation and biochemical composition

原料Ingredient (g/kg)	Diet1	Diet2	Diet3	Diet5	Diet6
TASA鱼粉Fishmeal	30	30	30	30	30
小麦浓缩蛋白Wheat protein concentrate	200	200	200	200	200
酪蛋白Casein	200	200	200	200	200
玉米淀粉Corn starch	260	260	260	260	260
鱼油Fish oil	40	40	40	40	40
豆油Soybean oil	40	40	40	40	40
硒代蛋氨酸Selenomethionine (mg/kg)	0	24.84	49.67	—	—
亚硒酸钠Sodium selenite (mg/kg)	0	—	—	21.90	43.80
矿物盐预混物(不含硒)Mineral premix	50	50	50	50	50
维生素预混物Vitamin premix	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90
氯化胆碱Choline chloride	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
三氧化二钇Yttrium trioxide	10	10	10	10	10
纤维素Cellulose	165	164.98	164.96	164.98	164.96
化学组成(g/kg干物质)Proximate composition (g/kg on a dry matter basis)					
硒Se (mg/kg)	0.04	10.03	18.32	10.55	21.06
水分Moisture	99.79	107.71	124.76	122.06	107.78
灰分Ash	48.38	56.14	56.02	57.26	60
粗蛋白Crude protein	410.47	391.69	393.04	412.02	393

注: TASA鱼粉: 秘鲁Tecnologica de Alimentos Somos公司; 酪蛋白: 购自甘肃华羚酪蛋白股份有限公司; 小麦浓缩蛋白: 购自山东渠风食品科技有限公司; 硒代蛋氨酸: 纯度≥98.0%, 购自北京百灵威科技有限公司; 亚硒酸钠: 纯度≥97.0%, 购自上海国药集团化学试剂有限公司; 多维预混物(mg/kg 饲料): 维生素 B₁, 20; 维生素 B₂, 20; 维生素 B₆, 20; 维生素 B₁₂, 0.020; 叶酸, 5; 泛酸钙, 50; 肌醇, 100; 烟酸, 100; 生物素, 0.1; 纤维素, 3522; 维生素 C, 100; 维生素 A, 11; 维生素 D, 2; 维生素 E, 100; 维生素 K, 10; 多矿预混物(mg/kg 饲料): 氯化钠, 500.0; 硫酸镁, 8155.6; 磷酸二氢钠, 12500.0; 磷酸二氢钾, 16000.0; 磷酸氢钙, 7650.6; 硫酸亚铁, 2286.2; 乳酸钙, 1750.0; 硫酸锌, 178.0; 硫酸锰, 61.4; 硫酸铜 15.5; 硫酸钴, 0.91; 碘化钾, 1.5; 淀粉, 899.7

Note: TASA fishmeal: Peru Tecnologica de Alimentos Somos Company, Peru; Casein: purchased from Gansu Hualing Casein Stock Co., Ltd, Gansu, China; Wheat protein concentrate: purchased from Shandong Qufeng Food Technology Co., Ltd, Weifang, Shandong, China; Selenomethionine: Purity ≥98.0%, purchased from Beijing Bailingwei Technology Co., Ltd, Beijing, China; Sodium selenite: Purity ≥97.0%, purchased from Shanghai Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd, Shanghai, China; Vitamin premix (mg/kg diet): Vitamin B₁, 20; Vitamin B₂, 20; Vitamin B₆, 20; Vitamin B₁₂, 0.02; folic acid, 5; calcium pantothenate, 50; inositol, 100; niacin, 100; biotin, 0.1; cellulose, 3522; Vitamin A, 11; Vitamin D, 2; Vitamin E, 100; Vitamin K, 10; Mineral premixes (mg/kg diet): NaCl, 500.0; MgSO₄·7H₂O, 8155.6; NaH₂PO₄·2H₂O, 12500.0; KH₂PO₄, 16000.0; Ca(H₂PO₄)₂·H₂O, 7650.6; FeSO₄·7H₂O, 2286.2; C₆H₁₀CaO₆·5H₂O, 1750.0; ZnSO₄·7H₂O, 178.0; MnSO₄·H₂O, 61.4; CuSO₄·5H₂O, 15.5; CoSO₄·7H₂O, 0.91; KI, 1.5; Corn starch, 899.7

3条鱼测量体长和体重, 采血并离心, 采用浓度为0.2%肝素钠抗凝剂润洗过容量为2 mL的注射器, 从实验鱼的尾静脉抽血, 然后放入温度为4℃的离心机(5417c; Eppendorf AG, Hamburg, Germany)中离心10min转速为3000 r/min, 取上层血浆分装于200 μ L离心管中并保存于-80℃冰箱中, 用于测定血浆生化指标。然后取出性腺、肝脏和肾脏称重后置于-20℃冰箱保存以分析性腺、肝脏和肾脏的硒含量, 取完样的空壳放入密封袋中并保存于-20℃冰箱用于分析骨骼中硒含量; 剩下的3条鱼的背肌称重后放入密封袋中并保存于-20℃冰箱, 用于分析肌肉中硒含量。

1.4 样品分析

实验饲料和全鱼的粗蛋白、水分和灰分的测定参照AOAC^[21]的方法。全鱼放入铝盒在高压蒸汽灭菌锅(ES-315, Tomy Kogyo Co, Japan)中120℃预处理20min, 捣碎混匀后放入75℃恒温箱中烘至恒重, 然后粉碎放入密封袋存于-20℃冰箱中保存以分析其生化组成。样品测定前在105℃恒温箱中烘至恒重, 用失重法测定水分; 样品采用凯氏定氮仪(KD310-B-1116 KjelROC Analyzer, Furulund, Sweden)测定粗蛋白; 通过在马弗炉(湖北英山县建力电炉制造厂, 湖北英山)中以550℃充分灼烧测定样品灰分。

背肌、肝脏、肾脏、性腺样品测定前需放入冷冻干燥机(D-37520 Osterode am Harz, An der Unteren Söse 50, Germany)里冻干, 然后使用搅拌机粉碎。骨骼样品剔除鱼肉后放入75℃恒温箱中烘干, 最后粉碎。上述预处理结束后, 采用微波溶剂萃取系统(Microwave digestion System, MARS6, CEM, USA)中消解, 采用高效液相色谱-电感耦合等离子体发射质谱法(High performance liquid chromatography-Inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS, NexION300X, PekinElmer Co., USA)测定饲料、全鱼、背肌、肝脏、肾脏、性腺和骨骼中的硒含量。

1.5 数据计算及统计处理

特定生长率(SGR, %)= $100 \times (\ln \text{终末体重} - \ln \text{初始体重}) / \text{天数}$

饲料效率(FE, %)= $100 \times \text{总体重增加量} / \text{总饲料消耗量}$

肝体比(HSI)= $100 \times \text{肝脏重} / \text{体重}$

肾体比(NSI)= $100 \times \text{肾脏重} / \text{体重}$

干物质表观消化率($\text{ADC}_{\text{dry matter}}$, %)= $100 \times (1 - \text{饲料中标记物含量} / \text{粪便中标记物含量})$

硒表观消化率(ADC_{Se} , %)= $100 \times [1 - (\text{饲料中标$

记物含量 / 粪便中标记物含量) $\times$ (粪便中硒含量 / 饲料中硒含量)]

采用软件SPSS 22.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)进行统计分析, 数据先检测其正态分布(Shapiro-Wilk), 经过方差齐性检验(Levene homogeneity of variance test)确定方差齐, 随后进行单因素方差分析分析(One-way ANOVA), 显著性水平设为 $P < 0.05$, 最后对各组数据进行Duncan's多重比较。数据分析结果用平均值 $\pm$ 标准误表示。

2 结果

2.1 不同硒的类型和水平对异育银鲫生长性能的影响

对实验饲料中的基本化学组成进行测定(表1), 并且测定饲料中硒的含量, 对照饲料中硒的含量为0.40 mg/kg, 蛋氨酸硒饲料中硒的实际含量分别为10.03和18.32 mg/kg, 有机硒饲料中硒的实际含量为10.55和21.06 mg/kg。

如图1所示, 在饲料中添加有机硒可以提高异育银鲫的生长($P < 0.05$), 随着饲料中有机硒添加量的升高异育银鲫的特定生长率先上升而后下降, 在20 mg/kg处理组中达到最高($P < 0.05$)。在饲料中添加无机硒对异育银鲫的生长未表现出促进作用, 10 mg/kg无机硒处理组与对照组的特定生长率无显著差异($P > 0.05$), 当饲料中无机硒的添加量进一步升高, 异育银鲫的特定生长率出现了显著下降($P < 0.05$)。所有有机硒处理组的特定生长率显著高于无机硒处理组($P < 0.05$)。饲料中添加不同水平的有机硒和无机硒对异育银鲫的存活率无显著影响。

2.2 不同硒的类型和水平对异育银鲫肝体比和肾体比的影响

如图2所示, 在饲料中添加有机硒降低了异育银鲫的肝体比, 但不同水平的处理组间无显著差异($P > 0.05$); 在饲料中添加无机硒降低了异育银鲫的肝体比, 10 mg/kg处理组的肝体比最低($P < 0.05$)。有机硒处理组与无机硒处理组的肝体比无显著差异($P > 0.05$)。在饲料中添加有机硒和无机硒均降低了异育银鲫的肾体比, 但各处理组间无显著差异($P > 0.05$)。所有有机硒处理组的肾体比与无机硒处理组也无显著差异($P > 0.05$; 图2)。

2.3 不同硒的类型和水平对异育银鲫干物质消化率和硒消化率的影响

如图3所示, 饲料中添加有机硒和无机硒对异育银鲫的饲料干物质的表观消化率无显著影响($P > 0.05$); 20 mg/kg有机硒处理组硒表观消化率显著高于10 mg/kg有机硒处理组($P < 0.05$); 无机硒处

理组间硒的表观消化率无显著差异($P>0.05$)。有机硒处理组硒的表观消化率均高于无机硒处理组($P<0.05$; 图3)。

2.4 不同硒的类型和水平对异育银鲫各组织中的硒蓄积的影响

如图4所示,随着饲料中有机硒和无机硒添加量的升高,异育银鲫全鱼的硒含量均显著升高($P<0.05$),所有有机硒处理组全鱼的硒含量均显著高于无机硒处理组($P<0.05$)。

随着饲料中有机硒和无机硒添加量的升高,异育银鲫肝脏的硒含量均显著升高($P<0.05$)。20 mg/kg有机硒处理组肝脏中的硒含量显著高于20 mg/kg无机硒处理组($P<0.05$)。随着饲料中有机硒和无机硒添加量的升高,异育银鲫肾脏的硒含量显著升高($P<0.05$)。相同水平的有机硒处理组肾脏中的硒含量与无机硒处理组间无显著差异($P>0.05$)。

异育银鲫肌肉中硒含量随饲料中有机硒和无机硒的添加量而显著升高($P<0.05$)。所有有机硒处理组的肌肉硒含量显著高于无机硒处理组($P<0.05$)。随着饲料中有机硒和无机硒添加量的升高,异育银鲫骨骼的硒含量均显著升高($P<0.05$)。所有有机硒处理组骨骼的硒含量显著高于无机硒处理组($P<0.05$)。

随着饲料中有机硒添加量的升高,异育银鲫性腺的硒含量升高($P<0.05$);饲料中添加无机硒显著提高了异育银鲫性腺的硒含量($P<0.05$),但无机硒处理组间无显著差异($P>0.05$)。所有有机硒处理组的性腺硒含量显著高于无机硒处理组($P<0.05$)。

2.5 不同硒的类型和水平对异育银鲫血浆生化指标的影响

如图5所示,饲料中添加10 mg/kg有机硒和20 mg/kg无机硒显著降低了异育银鲫血浆中谷丙转氨酶的活性($P<0.05$);10 mg/kg无机硒处理组谷丙转氨酶显著高于10 mg/kg有机硒处理组($P<0.05$),20 mg/kg无机硒处理组谷丙转氨酶显著低于20 mg/kg有机硒处理组($P<0.05$)。饲料中添加有机硒对异育银鲫血浆中谷草转氨酶的活性无显著影响($P>0.05$);当饲料中无机硒的水平达到20 mg/kg,谷草转氨酶的活性显著下降($P<0.05$),20 mg/kg有机硒处理组血浆中的谷草转氨酶活性显著高于20 mg/kg无机硒处理组($P<0.05$)。饲料中添加有机硒和无机硒均显著降低了异育银鲫血浆中总胆红素(T-Bil)的浓度($P<0.05$);所有有机硒处理组和无机硒处理组间血浆总胆红素无显著差异($P>0.05$)。

饲料中添加有机硒和无机硒提高了异育银鲫血浆中葡萄糖的浓度($P<0.05$),当有机硒的水平达到20 mg/kg后血浆葡萄糖水平显著升高($P<0.05$);所有无机硒添加组的葡萄糖浓度显著高于对照组($P<0.05$)。10 mg/kg有机硒处理组血浆中的葡萄糖浓度低于10 mg/kg无机硒处理组($P<0.05$)。

饲料中添加有机硒降低了异育银鲫血浆中铁离子的浓度,当硒水平高于20 mg/kg时,血浆中铁离子的浓度显著下降($P<0.05$)。异育银鲫血浆中铁离子的浓度随饲料中无机硒的添加先下降而后升高($P<0.05$),10 mg/kg无机硒处理组血浆中铁离子

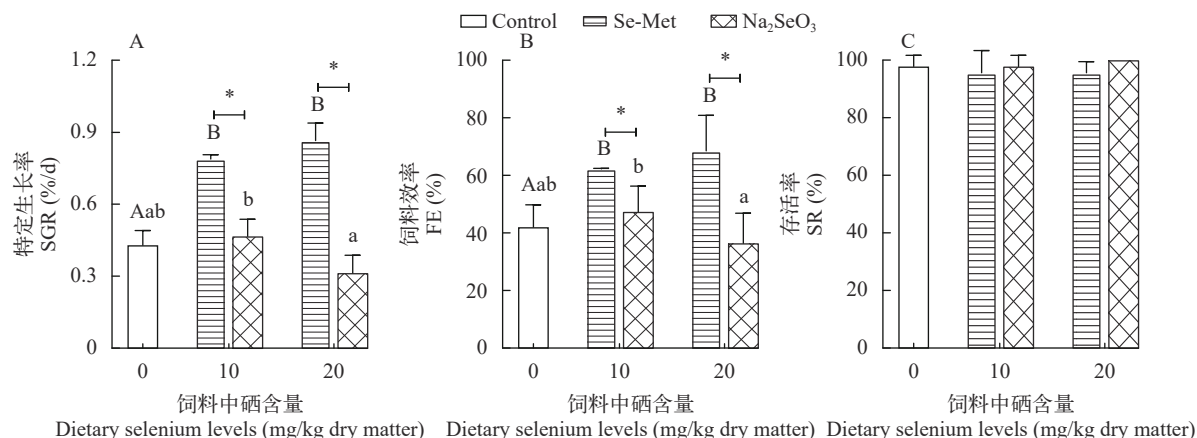


图1 饲料中不同含量有机硒和无机硒对异育银鲫特定生长率饲料效率(A)、饲料效率(B)和存活率(C)的影响

Fig. 1 The effects of dietary organic selenium levels and inorganic selenium levels on specific growth rate (A), feeding efficiency (B) and survival rate (C) of gibel carp

数据是平均值±标准差来表示($n=3$);柱状图上方不同大写字母表示有机硒处理组间有显著性差异($P<0.05$);柱状图上方不同小写字母表示无机硒处理组间有显著性差异($P<0.05$);柱状图上方*表示有机硒和无机硒处理组间有显著性差异($P<0.05$);下同

Data are indicated as mean±SD ($n=6$). Bars with different catipal letters mean significant changes among groups with organic selenium supplementation ($P<0.05$). Bars with different lowercase letters mean significant changes among groups with inorganic selenium supplementation ($P<0.05$). Bars with different * mean significant changes with organic selenium and inorganic selenium supplementation in the same group ($P<0.05$). The same applies below

的浓度显著低于其余处理组($P<0.05$)。20 mg/kg有机硒处理组血浆中的铁离子浓度显著高于20 mg/kg无机硒处理组($P<0.05$)。各处理组异育银鲫血浆中镁离子的浓度无显著差异($P>0.05$)。

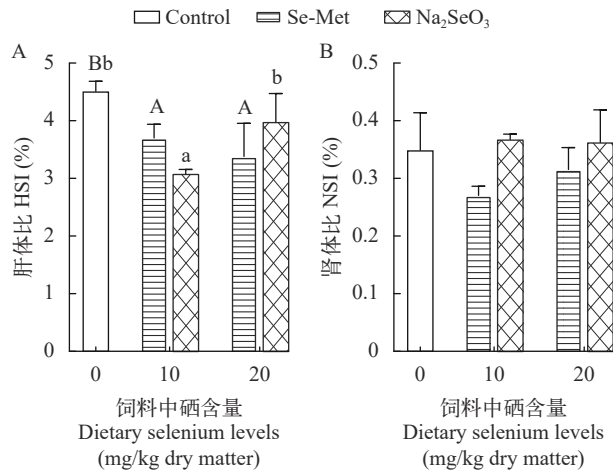


图2 饲料中不同含量有机硒和无机硒对异育银鲫肝体比(A)和肾体比(B)的影响

Fig. 2 The effects of dietary organic selenium levels and inorganic selenium levels on hepatosomatic index (A) and nephritomatic index (B) of gibel carp

3 讨论

3.1 不同硒的类型对异育银鲫的生长性能的影响

本实验利用初始体重为(62.95±0.23) g的异育银鲫开展90d养殖实验,发现饲料中添加10—20 mg/kg

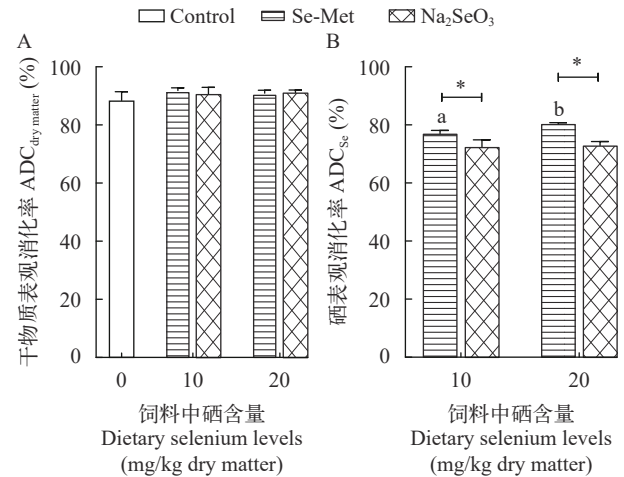


图3 饲料中不同含量有机硒和无机硒对异育银鲫干物质消化率(A)和硒消化率(B)的影响

Fig. 3 The effects of dietary organic selenium levels and inorganic selenium levels on ADC_{dry matter} (A) and ADC_{Se} (B) of gibel carp

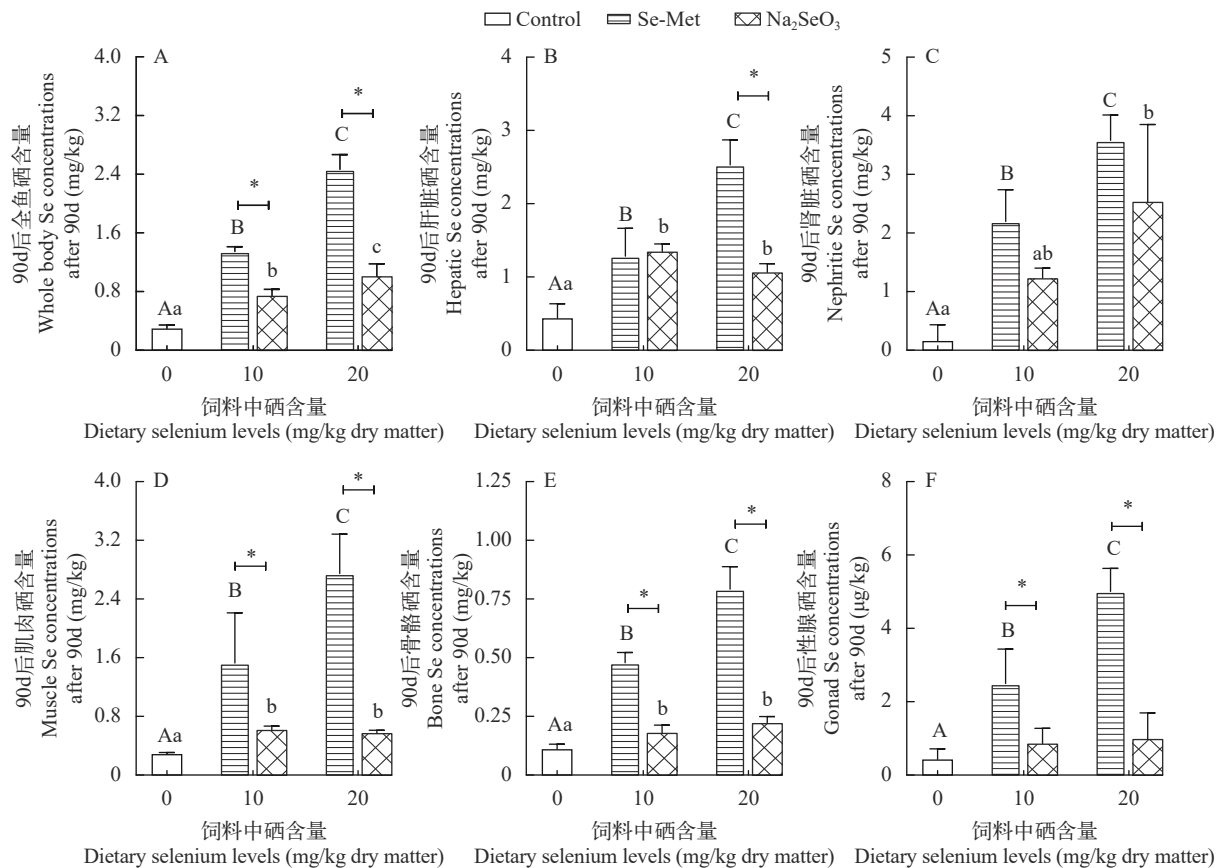


图4 饲料中不同含量有机硒和无机硒对异育银鲫全鱼(A)、肝脏(B)、肾脏(C)、肌肉(D)、骨骼(E)和性腺(F)中硒含量的影响

Fig. 4 The effects of dietary organic selenium levels and inorganic selenium levels on whole fish (A), liver (B), kidney (C), muscles (D), bones (E) and gonads (F) Se contents of gibel carp

的硒代蛋氨酸不会影响异育银鲫的存活且能够显著促进鱼体的生长。而Hamilton等^[22]发现,在饲料中添加3—36 mg/kg的硒代蛋氨酸喂养大鳞大马哈鱼(*Oncorhynchus tshawytscha*)幼鱼120d,其存活率没有受到影响,而当饲料中硒代蛋氨酸含量大于等于35.4 mg/kg时,鱼体的生长较对照组出现显著下降;Tashjian等^[23]的研究中发现当饲料中硒代蛋氨酸含量为20.5 mg/kg时,初始体重为(29.8±1.0) g的高首鲟(*Acipenser transmontanus*)的生长与对照组无显著差异,但是当饲料中硒代蛋氨酸含量为41.7 mg/kg及以上时,鲟的生长速度显著降低。Lee等^[10]文章中指出当饲料中硒代蛋氨酸含量为14.7 mg/kg时显著降低了初始体重为(1.85±0.1) g尼罗罗非鱼幼鱼的生长性能。我们的研究结果与Zhu等^[9]的研究相类似,饲料中添加有机硒对异育银鲫幼鱼的肝体比无显著影响。Hu等^[24]在饲料中添加6.5 mg/kg的有机硒使黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)幼鱼的肝体比显著升高。由此可见,不同鱼类对饲料中有机硒的耐受能力有所差异,异育银鲫对高水平有机硒具有较高的耐受能力。

本研究的结果发现饲料中添加10和20 mg/kg

的亚硒酸钠虽然不会影响异育银鲫的存活但是显著抑制了鱼体的生长。Hilton和Hodson^[25]对虹鳟的研究同样发现,在日粮亚硒酸钠含量为10 mg/kg的条件下饲养16周后,虹鳟的体重显著下降,饲料效率也显著降低;Gatlin和Wilson^[26]在饲料中添加15 mg/kg亚硒酸钠也显著抑制了斑点叉尾鲟(*Ictalurus punctatus*)幼鱼的生长。这些结果都说明了高水平无机硒对鱼类的生长具有显著的负面影响。

3.2 不同硒的类型对异育银鲫组织中的硒消化和组织蓄积的影响

本实验硒代蛋氨酸处理组硒消化率均高于亚硒酸钠处理组。Briens等^[27]在肉鸡(*Gallus domesticus*)饲料中添加0.3 mg/kg亚硒酸钠和酵母硒,发现亚硒酸钠的消化率(24%)显著低于酵母硒的消化率(46%)。Le和Fotedar^[28]的研究中黄条鲮饲料中添加2 mg/kg亚硒酸钠和硒代蛋氨酸,测得亚硒酸钠消化率为45%显著低于硒代蛋氨酸57%的消化率。以上结果有机硒的消化率均高于无机硒与我们研究结论一致。有机硒通过与含硫氨基酸结合方式的吸收速度高于无机硒通过被动扩散方式的吸收速度^[29,30]。

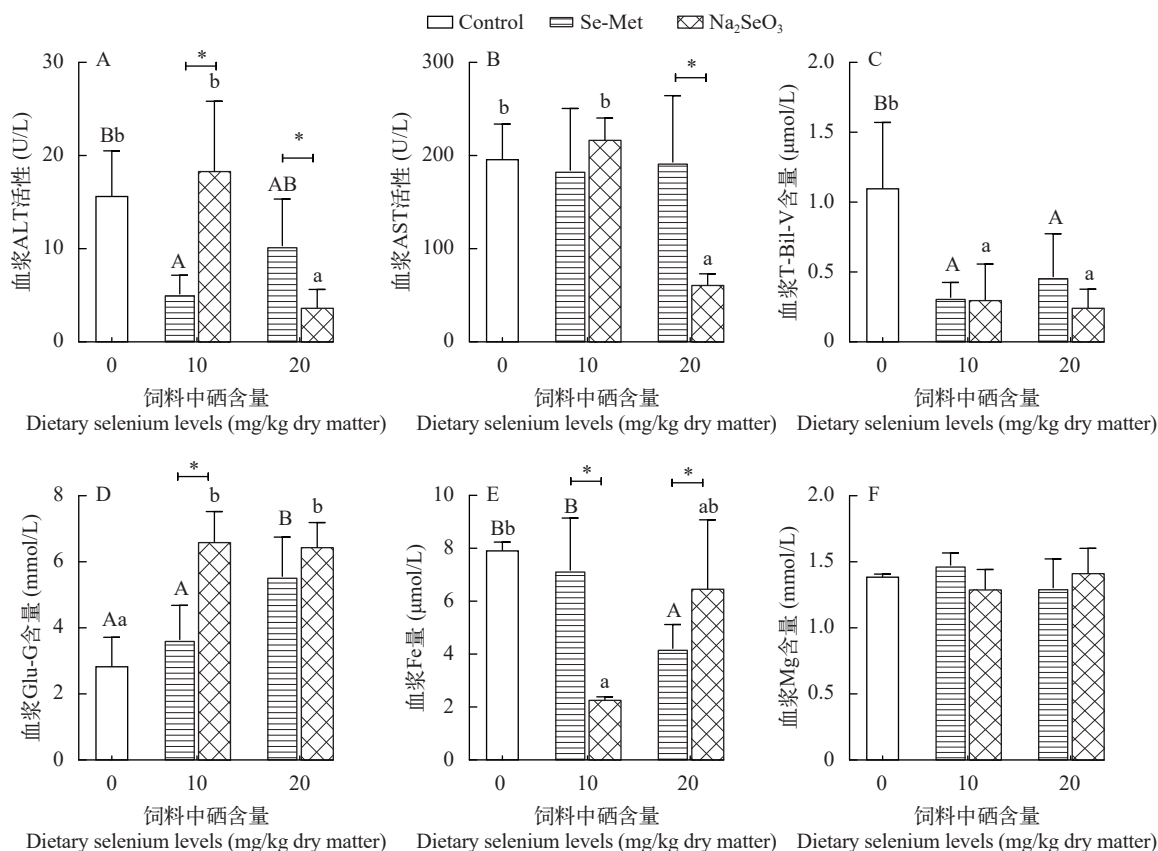


图5 饲料中不同含量有机硒和无机硒对异育银鲫血浆谷丙转氨酶(A)、谷草转氨酶(B)、总胆红素(C)、葡萄糖(D)、铁离子(E)和镁离子(F)的影响

Fig. 5 The effects of dietary organic selenium levels and Inorganic selenium levels on plasma ALT (A), AST (B), T-Bil-V (C), Glu (D), Fe³⁺ (E) and Mg²⁺ (F) of gibel carp

养殖90d后异育银鲫的全鱼、肝脏、肾脏、肌肉、骨骼和性腺中硒含量随饲料中有机硒和无机硒的添加量而均出现显著升高; 而有机硒处理组的骨骼、肝脏、肾脏、肌肉、性腺和全鱼中的硒含量显著高于无机硒处理组。在Pacini等^[31]的研究中西伯利亚鲟(*Acipenser baeri*)肝脏、肾脏和肌肉中硒含量随饲料中硒代半胱氨酸的添加量而显著升高。在Rathore等^[32]的研究中尼罗罗非鱼肝脏、肾脏和肌肉中硒含量随饲料中纳米硒的添加量而显著升高。而Chen等^[33]发现, 相对于无机硒, 饲料中添加有机硒可以更加有效的提高肉鸡肝脏和肌肉中硒的含量。因此结合硒消化率和组织硒含量的数据可充分说明, 相比于无机硒, 有机硒在动物体内具有更高的吸收和组织蓄积水平。

本实验中异育银鲫骨骼、肝脏、肾脏、肌肉、性腺和全鱼中硒含量随饲料中硒的添加量而显著升高, 异育银鲫的有机硒的积累量为肾脏>性腺>肌肉~全鱼>肝脏>骨骼, 无机硒积累量为肾脏>肝脏>全鱼~性腺>肌肉>骨骼。在Lee等^[34]的研究中高首鲟组织中硒代蛋氨酸的积累情况为肾脏>鳃>肌肉~肝脏; 在Kim和Kang^[35]的研究中真鲷(*Pagrus major*)组织中亚硒酸钠的积累情况为肾脏~肝脏>脾脏>肠道>鳃>肌肉。在这些结果中, 肾脏硒含量最高, 这与我们的研究结果类似。在Huang等^[36]在虹鳟组织中硒代蛋氨酸的积累情况为肝脏>肾脏>鳃>骨骼, 肝脏硒的含量最高, 这与我们的研究结果不同。硒的组织分布与鱼的种类和硒的形态都具有相关性, 而我们的结果说明饲料中添加的有机硒有助于异育银鲫可食用部分硒的富集。

3.3 不同硒的类型对异育银鲫血浆生化指标的影响

异育银鲫血浆中葡萄糖的浓度随饲料中硒的添加量而显著升高($P<0.05$), 10 mg/kg 有机硒处理组血浆中的葡萄糖浓度显著低于10 mg/kg 无机硒处理组($P<0.05$); 而Kumar和Singh^[37]的研究发现, 饲料中添加1和2 mg/kg无机硒(亚硒酸钠)显著降低了鲢(*Pangasinodon hypophthalmus*)的血糖含量。鱼类血糖的变化受到鱼的种类、环境和生理状态等多方面的影响, 硒对鱼类血糖的调控具体机制有待于进一步研究。在许多动物实验和流行病学调查也表明, 硒的缺乏或过量与糖脂代谢、血浆硒和硒蛋白状态之间存在相关性^[38, 39], 低浓度和高浓度的血浆硒可能与糖尿病前期(IGR)患病风险之间存在“U型”关联^[40]。

前期的研究结果表明硒具有调节肝脏功能的作用, Pacini等^[31]的研究发现饲料中硒半胱氨酸使西伯利亚鲟体内谷胱甘肽过氧化物酶活性增强, 进

而阻止肝脏中的脂质过氧化。Soliman等^[41]也发现饲料中添加纳米硒能够改善条纹鲈(*Pangasianodon hypophthalmus*)肝脏的健康水平。血浆谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性是反映肝脏健康的重要指标, Abdolreza等^[42]指出饲料中添加0.3—0.9 mg/kg有机硒(硒代蛋氨酸)对鲫(*Carassius auratus*)血浆中谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性无显著影响。在本实验中饲料中添加10 mg/kg 有机硒和20 mg/kg无机硒降低了异育银鲫血浆中谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性, 说明不同类型硒的生物活性具有差异。结合本研究中异育银鲫的生长结果, 饲料中添加高水平的有机硒对异育银鲫的肝脏健康没有造成显著的负面影响, 而20 mg/kg的无机硒则可能影响了肝脏的健康。

在本实验饲料中添加20 mg/kg有机硒和10 mg/kg无机硒, 血浆中铁离子的浓度显著降低。Lin等^[43]发现在鸡饲料添加0.3 mg/kg的富硒酵母或亚硒酸钠对鸡蛋中的铁离子含量无显著影响。Brittenham等^[44]发现口服亚硒酸钠溶液可降低小鼠(*Mus musculus*)体内铁的含量。这说明硒与铁具有一定的拮抗作用, 其内在的机制有待于进一步研究。

4 结论

综上所述, 本研究发现饲料中添加10和20 mg/kg的有机硒不会影响异育银鲫的存活且能促进鱼体的生长, 而20 mg/kg的无机硒对异育银鲫的生长起到了显著的抑制作用。相同剂量下有机硒处理组的生长显著高于无机硒处理组。有机硒相比于无机硒更易在异育银鲫体内富集, 且肌肉中有机硒处理组硒的富集量远远高于无机硒处理组, 这为富硒鱼的养殖带来了一定的启示。异育银鲫对饲料中高水平的有机硒和无机硒具有较好的耐受能力^[45]。

参考文献:

- [1] Maier K J, Foe C, Ogle R S, *et al.* The dynamics of selenium in aquatic ecosystems [J]. *Trace Substan Environ Health*, 1987(21): 361-408.
- [2] Wang Y, Wei F S. *Elemental Chemistry of Soil Environment* [M]. Beijing: China Environmental Press, 1995: 54-57. [王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学 [M]. 北京: 中国环境出版社, 1995: 54-57.]
- [3] Whanger P, Xia V, Thomson C. Metabolism of different forms of selenium in humans: conference on trace elements in health and disease [J]. *Journal of Trace Elements and Electrolytes in Health and Disease*, 1993, 7(2): 121.
- [4] Schwarz K, Foltz C M. Selenium as an integral part of factor 3 against dietary necrotic liver degeneration [J].

- Journal of the American Chemical Society*, 1957, **79**(12): 3292-3293.
- [5] 王茜, 姚继广, 杨子森, 等. 硒的作用机理及对动物免疫的影响 [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2010(5): 23-24.
 - [6] Jobling M. National Research Council (NRC). Nutrient requirements of fish and shrimp [J]. *Aquaculture International*, 2012, **20**(3): 601-602.
 - [7] Zhu C F. Effect of dietary organic Se and inorganic Se supplement on growth performance and physiological function of the different organs in *Carassius auratus gibelio* [D]. Suzhou: Soochow University, 2009. [朱春峰. 有机硒和无机硒对异育银鲫生长、生理的影响 [D]. 苏州: 苏州大学, 2009.]
 - [8] Han D, Xie S, Liu M, *et al.* The effects of dietary selenium on growth performances, oxidative stress and tissue selenium concentration of gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, **17**(3): e741-e749.
 - [9] Zhu L, Han D, Zhu X, *et al.* Dietary selenium requirement for on-growing gibel carp (*Carassius auratus gibelio* var. CAS III) [J]. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(6): 2841-2851.
 - [10] Lee S, Nambi R W, Won S, *et al.* Dietary selenium requirement and toxicity levels in juvenile Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture*, 2016(464): 153-158.
 - [11] Chen H, Li J, Yan L, *et al.* Subchronic effects of dietary selenium yeast and selenite on growth performance and the immune and antioxidant systems in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020(97): 283-293.
 - [12] Atencio L, Moreno I, Jos Á, *et al.* Effects of dietary selenium on the oxidative stress and pathological changes in tilapia (*Oreochromis niloticus*) exposed to a microcystin-producing cyanobacterial water bloom [J]. *Toxicon*, 2009, **53**(2): 269-282.
 - [13] Lin Y H, Shiau S Y. Dietary selenium requirements of juvenile grouper, *Epinephelus malabaricus* [J]. *Aquaculture*, 2005, **250**(1/2): 356-363.
 - [14] Tan F, Liang M Q, Zheng K K, *et al.* The requirement of dietary selenium at the middle growth stage of Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, **36**(3): 93-100. [谈枫, 梁萌青, 郑珂珂, 等. 鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)养殖中期对饲料硒的需求量 [J]. 渔业科学进展, 2015, **36**(3): 93-100.]
 - [15] Swain P, Das R, Das A, *et al.* Effects of dietary zinc oxide and selenium nanoparticles on growth performance, immune responses and enzyme activity in rohu, *Labeo rohita* (Hamilton) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2019, **25**(2): 486-494.
 - [16] Mansour A T E, Goda A A, Omar E A, *et al.* Dietary supplementation of organic selenium improves growth, survival, antioxidant and immune status of meagre, *Argyrosomus regius*, juveniles [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017(68): 516-524.
 - [17] Le K T, Fotadar R. Dietary selenium requirement of yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) [J]. *Agricultural Sciences*, 2013, **4**(6): 68-75.
 - [18] Jaramillo F, Peng L, Gatlin D M. Selenium nutrition of hybrid striped bass (*Morone chrysops* × *M. saxatilis*) bioavailability, toxicity and interaction with vitamin E [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2009, **15**(2): 160-165.
 - [19] Allan C B, Lacourciere G M, Stadtman T C. Responsiveness of selenoproteins to dietary selenium [J]. *Annual Review of Nutrition*, 1999(19): 1-16.
 - [20] *Carassius auratus gibelio* var. CAS V [J]. *China Fisheries*, 2018(8): 64-69. [异育银鲫“中科5号” [J]. 中国水产, 2018(8): 64-69.]
 - [21] AOAC C. Official methods of analysis of the Association of Analytical Chemists International [J]. *Official Methods: Gaithersburg*, MD, USA, 2005.
 - [22] Hamilton S J, Buhl K J, Faerber N L, *et al.* Toxicity of organic selenium in the diet to chinook salmon [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1990, **9**(3): 347-358.
 - [23] Tashjian D H, Teh S J, Sogomonyan A, *et al.* Bioaccumulation and chronic toxicity of dietary l-selenomethionine in juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2006, **79**(4): 401-409.
 - [24] Hu J R, Huang Y H, Wang G X, *et al.* Deficient and excess dietary selenium levels affect growth performance, blood cells apoptosis and liver HSP70 expression in juvenile yellow catfish *Pelteobagrus fulvidraco* [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2016, **42**(1): 249-261.
 - [25] Hodson P, Hilton J W. The nutritional requirements and toxicity to fish of dietary and waterborne selenium [J]. *Ecological Bulletins*, 1983(35): 335-340.
 - [26] Gatlin D M, Wilson R P. Dietary selenium requirement of fingerling channel catfish [J]. *The Journal of Nutrition*, 1984, **114**(3): 627-633.
 - [27] Briens M, Mercier Y, Rouffineau F, *et al.* Comparative study of a new organic selenium source v. seleno-yeast and mineral selenium sources on muscle selenium enrichment and selenium digestibility in broiler chickens [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2013, **110**(4): 617-624.
 - [28] Le K T, Fotadar R. Bioavailability of selenium from different dietary sources in yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) [J]. *Aquaculture*, 2014(420/421): 57-62.
 - [29] Thiry C, Ruttens A, Pussemier L, *et al.* An in vitro investigation of species-dependent intestinal transport of selenium and the impact of this process on selenium bioavailability [J]. *The British Journal of Nutrition*, 2013, **109**(12): 2126-2134.
 - [30] Reasbeck P G, Barbezat G O, Weber F L Jr, *et al.* Selenium absorption by canine jejunum [J]. *Digestive Diseases and Sciences*, 1985, **30**(5): 489-494.
 - [31] Pacini N, Elia A C, Abete M C, *et al.* Antioxidant response versus selenium accumulation in the liver and kid-

- ney of the Siberian sturgeon (*Acipenser baeri*) [J]. *Chemosphere*, 2013, **93**(10): 2405-2412.
- [32] Rathore S S, Murthy H S, Girisha S K, *et al.* Supplementation of nano-selenium in fish diet: Impact on selenium assimilation and immune-regulated selenoproteome expression in monosex Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2021(240): 108907.
- [33] Chen G, Wu J, Li C. Effect of different selenium sources on production performance and biochemical parameters of broilers [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2014, **98**(4): 747-754.
- [34] de Riu N, Lee J W, Huang S S Y, *et al.* Effect of dietary selenomethionine on growth performance, tissue burden, and histopathology in green and white sturgeon [J]. *Aquatic Toxicology*, 2014(148): 65-73.
- [35] Kim J H, Kang J C. The selenium accumulation and its effect on growth, and haematological parameters in red sea bream, *Pagrus major*, exposed to waterborne selenium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014(104): 96-102.
- [36] Lee J, Hong S, Sun J H, *et al.* Toxicity of dietary selenomethionine in juvenile steelhead trout, *Oncorhynchus mykiss*: tissue burden, growth performance, body composition, hematological parameters, and liver histopathology [J]. *Chemosphere*, 2019(226): 755-765.
- [37] Kumar N, Singh N P. Effect of dietary selenium on immuno-biochemical plasticity and resistance against *Aeromonas veronii* biovar *sobria* in fish reared under multiple stressors [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019(84): 38-47.
- [38] Bleys J, Navas-Acien A, Guallar E. Serum selenium and diabetes in US adults [J]. *Diabetes Care*, 2007, **30**(4): 829-834.
- [39] Rajpathak S, Rimm E, Morris J S, *et al.* Toenail selenium and cardiovascular disease in men with diabetes [J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2005, **24**(4): 250-256.
- [40] Luo Cheng, Wang X Q, Chen L K, *et al.* Association between plasma selenium and the risk of impaired glucose regulation [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2019, **53**(6): 565-569. [罗程, 王晓倩, 陈梁凯, 等. 血浆硒与糖尿病前期患病风险的关联研究 [J]. *中华预防医学杂志*, 2019, **53**(6): 565-569.]
- [41] El-Sharawy M E, Hamouda M, Soliman A A, *et al.* Selenium nanoparticles are required for the optimum growth behavior, antioxidative capacity, and liver wellbeing of Striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*) [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, **28**(12): 7241-7247.
- [42] Jahanbakhshi A, Pourmozaffar S, Adeshina I, *et al.* Selenium nanoparticle and selenomethionine as feed additives: effects on growth performance, hepatic enzymes' activity, mucosal immune parameters, liver histology, and appetite-related gene transcript in goldfish (*Carassius auratus*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2021, **47**(2): 639-652.
- [43] Lin X, Yang T, Li H, *et al.* Interactions between different selenium compounds and essential trace elements involved in the antioxidant system of laying hens [J]. *Biological Trace Element Research*, 2020, **193**(1): 252-260.
- [44] Bartfay W J, Hou D, Brittenham G M, *et al.* The synergistic effects of vitamin E and selenium in iron-overloaded mouse hearts [J]. *The Canadian Journal of Cardiology*, 1998, **14**(7): 937-941.
- [45] Van Dael P, Davidsson L, Munoz-Box R, *et al.* Selenium absorption and retention from a selenite- or selenate-fortified milk-based formula in men measured by a stable-isotope technique [J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, **85**(2): 157-163.

HIGH DIETARY DOSES OF ORGANIC AND INORGANIC SELENIUM ON GROWTH PERFORMANCE, TISSUE SELENIUM ACCUMULATION AND BLOOD BIOCHEMICAL PARAMETERS OF GIBEL CARP (*CARASSIUS AURATUS GIBELIO* VAR. CAS V)

LI Yuan-Ze^{1,2}, LIU Hao-Kun², GONG Yu-Long², GAO Wei-Ye^{2,3}, ZHU Xiao-Ming^{2,4}, HAN Dong^{2,3,4},
YANG Yun-Xia², JIN Jun-Yan², ZHANG Zhi-Min² and XIE Shou-Qi^{2,3,4}

(1. Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Hubei Engineering Research Center for Aquatic Animal Nutrition and Feed, Wuhan 430072, China)

Abstract: To investigate the effects of high doses of organic and inorganic selenium in feed on the growth performance, selenium accumulation and plasma biochemical parameters of gibel carp, organic selenium and inorganic selenium were used as different types of selenium sources, and gibel carp with an initial body weight of (62.95 ± 0.23) g was used for a 90d feeding experiment. The results indicated that the addition of 0, 10 and 20 mg/kg organic and inorganic selenium to the feed did not have a significant effect on the survival rate and the digestibility of the dry matter. Moreover, the addition of organic selenium significantly increased the selenium digestibility of the organic selenium treatment group ($P < 0.05$), while the addition of inorganic selenium to the feed had no significant effect on the selenium digestibility ($P > 0.05$). The addition of organic selenium to the feed increased the growth of gibel carp ($P < 0.05$), reaching the highest level in the 20 mg/kg treatment group ($P < 0.05$). The addition of inorganic selenium to the feed significantly reduced the specific growth rate of the gibel carp ($P < 0.05$), and there was no significant difference in the specific growth rate between the 10 mg/kg inorganic selenium treatment group and the control group ($P > 0.05$). The addition of organic selenium to the feed had no any significant effect on the hepatosomatic index of gibel carp, while the addition of 10 mg/kg inorganic selenium significantly reduced the hepatosomatic index ($P < 0.05$). The addition of organic and inorganic selenium to the feed had no any significant effect on the renosomatic index of gibel carp. The addition of both organic and inorganic selenium significantly increased the selenium content of whole fish, liver, kidney, muscle, bone and gonads, and the organic selenium addition group had significantly higher selenium content in bone, muscle, gonads and whole fish than the inorganic selenium addition group ($P < 0.05$). The addition of organic selenium and inorganic selenium to the diet significantly increased the plasma glucose content, decreased the total plasma bilirubin content and reduced the activity of glutamate and ghrelin ($P < 0.05$), and the addition of 20 mg/kg organic selenium and 10 mg/kg inorganic selenium to the diet significantly reduced the plasma iron ion content ($P < 0.05$). The results showed that the high levels of organic and inorganic selenium in the feed were well tolerated by the gibel carp and the high levels of organic selenium in the feed had no toxic effect on the gibel carp after 90d of the feeding. High levels of dietary organic selenium boosted growth performance and selenium bioaccumulation of gibel carp.

Key words: Organic selenium; Inorganic selenium; Growth performance; Selenic bioaccumulation; Biochemical parameters; *Carassius auratus gibelio*