

毛香杰,陈家龙,古殿超,等.饲料中不同铁源对大口黑鲈幼鱼生长性能、血清生化指标和肌肉品质的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(6):263-272.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.06.026

饲料中不同铁源对大口黑鲈幼鱼生长性能、血清生化指标和肌肉品质的影响

毛香杰¹,陈家龙¹,古殿超^{1,2},胡文广¹,杨武华³,朱文欢⁴,谭青松¹

1. 农业农村部淡水生物繁育重点实验室/池塘健康养殖湖北省工程实验室/
华中农业大学水产学院,武汉 430070; 2. 湖南德邦生物科技股份有限公司,常宁 421500;
3. 武汉市蔡甸区农业技术推广服务中心,武汉 430199;
4. 武汉市水产技术推广指导中心,武汉 430012

摘要 为筛选大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)配合饲料中的适宜铁源,分别在基础饲料中添加硫酸亚铁、蛋氨酸铁、甘氨酸铁、复合氨基酸螯合铁配制4种试验饲料,投喂初始体质量为 (8.60 ± 0.04) g的大口黑鲈幼鱼10周,探究不同铁源对其生长性能、血清生化指标和肌肉品质的影响。结果显示:(1)复合氨基酸螯合铁组的终末体质量达 (52.31 ± 0.44) g,显著高于其他组;硫酸亚铁组和甘氨酸铁组的肥满度显著高于蛋氨酸铁组和复合氨基酸螯合铁组。(2)饲料不同铁源显著影响血清生化和抗氧化指标,其中HDL含量在硫酸亚铁组 $[(4.14 \pm 0.18) \text{ mmol/L}]$ 和复合氨基酸螯合铁组 $[(4.28 \pm 0.11) \text{ mmol/L}]$ 显著高于甘氨酸铁组 $[(3.61 \pm 0.09) \text{ mmol/L}]$;甘氨酸铁组血清AST活性 $[(138.33 \pm 15.30) \text{ U/L}]$ 显著高于硫酸亚铁组 $[(104.00 \pm 4.04) \text{ U/L}]$,而蛋氨酸铁组的血清ALT活性 $[(15.00 \pm 4.58) \text{ U/L}]$ 显著高于硫酸亚铁组 $[(4.67 \pm 1.33) \text{ U/L}]$ 。复合氨基酸螯合铁组的血清SOD活性 $[(117.48 \pm 2.79) \text{ U/mL}]$ 显著高于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组,且复合氨基酸螯合铁组的血清MDA含量 $[(21.30 \pm 1.06) \text{ mmol/mL}]$ 显著低于其他组。(3)肌肉抗氧化能力也受到铁源影响,复合氨基酸螯合铁组肌肉SOD活性 $[(10.44 \pm 0.59) \text{ U/mg}]$ 显著高于其他组,MDA含量 $[(4.93 \pm 0.20) \text{ nmol/mg}]$ 显著低于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组;硫酸亚铁组和复合氨基酸螯合铁组GSH含量和CAT活性显著高于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组;另外,复合氨基酸螯合铁组T-AOC $[(1.79 \pm 0.04) \text{ mmol/L}]$ 显著高于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组。(4)复合氨基酸螯合铁组的胰蛋白酶活性 $[(1116.62 \pm 138.90) \text{ U/mg}]$ 显著高于硫酸亚铁组和蛋氨酸铁组。综上,与硫酸亚铁、蛋氨酸铁和甘氨酸铁相比,复合氨基酸螯合铁具有提高大口黑鲈生长性能和抗氧化能力的优势,推荐其作为外源铁源的首选添加到大口黑鲈饲料中。

关键词 大口黑鲈;铁源;生长性能;血清生化指标;抗氧化能力;肌肉品质

中图分类号 S963.73⁺9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)06-0263-10

铁(Fe)是鱼类生长发育所必需的微量元素之一,参与血红蛋白等化合物的构成^[1],在多种生理过程中起着不可替代的作用^[2-3]。机体缺铁会影响血红蛋白的合成,导致动物贫血、载氧能力下降、生长缓慢、免疫力和抗氧化能力下降等^[4-5]。自然条件下,鱼类通过鳃和肠黏膜从水体中获取部分可溶性的铁^[6],也可通过食物来获取铁,从而满足机体对铁的需求量以维持正常生理功能。

鱼类对铁的利用率受铁的存在形式及其价态等

因素影响^[7]。以增重率评价吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)对饲料中不同铁源的使用效果,在铁含量相同时,氯化亚铁的效果要优于氯化铁、硫酸亚铁、柠檬酸亚铁和吡啶铁^[8]。在饲料中用富马酸亚铁作为铁源代替硫酸亚铁,鲤(*Cyprinus carpio*)的生长性能和抗病能力得到改善^[9]。军曹鱼(*Rachycentron canadum*)对蛋氨酸铁的生物利用率相当于硫酸亚铁的2.75倍^[10]。在罗非鱼(*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)中还发现,柠檬酸铁的生物活性仅为硫酸亚

收稿日期:2025-03-15

基金项目:湖北省水利重点科研项目(HBSLK Y202334);湖南德邦生物科技股份有限公司-华中农业大学合作开发项目(707120212)

毛香杰,E-mail:1165153081@qq.com

通信作者:谭青松,E-mail:tanqs2000@163.com

铁的50%^[5]。当前饲料中的铁补充剂有3类:无机亚铁盐、简单有机酸亚铁盐和氨基酸螯合铁。无机亚铁盐价格低,但 Fe^{2+} 易被氧化成 Fe^{3+} 而降低利用率,且 Fe^{3+} 可直接或间接破坏维生素的活性^[7]。有机亚铁盐包括葡萄糖酸亚铁、乳酸亚铁、柠檬酸亚铁和富马酸亚铁等,其利用率常因溶解性不同而异^[11]。氨基酸螯合铁的性质稳定、与机体内铁存在形态相似,生物学效价高^[12]。常见蛋氨酸铁和甘氨酸铁等单一氨基酸螯合铁,但其价格也较高。在军曹鱼和凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)中已有关于这2种氨基酸螯合铁的应用研究,结果都表明它们比硫酸亚铁有更好的生物活性,能降低饲料中铁的用量^[10,13]。复合氨基酸螯合铁是近年来由铁与多种氨基酸螯合而成的一种高效有机铁源,相对于单一氨基酸螯合铁价格低,对于促进动物摄食和生长发育有积极作用^[14]。

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)是我国重要的淡水养殖品种,养殖产量位居全国淡水养殖品种第七位(《中国渔业统计年鉴 2024》数据)。大口黑鲈饲料中必须补充铁以改善生长^[15],但关于不同铁源在大口黑鲈饲料中的应用研究还未见报道。因此,笔者以大口黑鲈为研究对象进行8周生长试验,研究硫酸亚铁、蛋氨酸铁、甘氨酸铁和复合氨基酸螯合铁对大口黑鲈生长性能和健康的影响,以期为大口黑鲈高效配合饲料的研发和创新提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

参考大口黑鲈幼鱼铁需求量^[15],分别以硫酸亚铁(FeSO_4 , Fe含量:30%)、蛋氨酸铁(Fe-Met, Fe含量:13%)、甘氨酸铁(Fe-Gly, Fe含量:17%)和复合氨基酸螯合铁(Fe-CAA, Fe含量:10%)为铁源,配制4组等氮等脂的试验饲料。试验所用铁源均由湖南德邦生物科技股份有限公司提供,3种氨基酸螯合铁均为 Fe^{2+} 螯合物。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima8000DV, PerkinElmer, 美国)测得各饲料的铁含量分别为80.77、84.59、83.73和79.67 mg/kg。将原料粉碎后过0.18 mm孔径筛,称质量,逐级混和均匀后,用制粒机将试验饲料挤压制成2 mm粒径的沉性颗粒饲料,室温干燥后保存于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 备用。试验饲料配方和营养成分如表1所示。

1.2 试验设计

试验用大口黑鲈幼鱼购自武汉得民特种养殖有

限公司。试验前,将4种试验饲料均匀混合后驯食2周以适应试验条件。试验开始时,将规格一致、体质健康的鱼[初始体质量为 $(8.60\pm 0.05)\text{ g}$]随机分配到12个圆形鱼缸(300 L水)中,每缸25尾鱼,每种饲料随机分配3个鱼缸。采用微流水养殖系统(水流量为1 L/min)饲养10周。每天按时投喂2次(08:30和15:00)至饱食状态,投喂1 h后虹吸法收集残饵并在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干以校正摄食量。养殖期间水温 $27\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$, pH (7.0 ± 0.3) ,氨氮、余氯和亚硝酸盐低于0.1 mg/L。持续用气石充气使溶解氧保持在6 mg/L以上。

1.3 样本采集

养殖试验结束时,将鱼禁食24 h。对每缸中鱼进行计数和称质量,再每缸随机取3尾鱼用于测定全鱼营养成分;另取5尾鱼用MS222(75 mg/L,阿拉丁,上海)麻醉后,逐尾称质量并测量体长,随后分离内脏团、肝脏和肠道脂肪并称质量。然后取肠道(前肠和中肠)和背部白肌样品,液氮中速冻后保存于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$,用于肠道消化酶和肌肉抗氧化酶活性测定。每缸随机取4尾鱼,用1 mL注射器从尾静脉取血,于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中静置12 h,然后 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、3 000 r/min离心10 min,收集血清保存于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$,后续测定血清生化指标和酶活性;再取背部白肌,用于分析其营养成分、质构特性和蒸煮损失。所有操作均在冰盒上进行。

1.4 样品分析

1)血清生化指标测定。采用全自动生化分析仪(Abbott Aeroset®, Abbott Laboratories, 美国)检测血清总蛋白(total protein, TP)、葡萄糖(glucose, GLU)、尿素氮(urea nitrogen, UN)、甘油三酯(triglyceride, TG)、胆固醇(cholesterol, CHOL)、高密度脂蛋白(high-density lipoprotein, HDL)和低密度脂蛋白(low-density lipoprotein, LDL)含量及丙氨酸转氨酶(alanine aminotransferase, ALT)和天冬氨酸转氨酶(aspartate aminotransferase, AST)活性。血清溶菌酶(lysozyme, LYS)、补体3(complement 3, C3)和免疫球蛋白M(immunoglobulin M, IgM)活性均采用上海酶联生物科技有限公司生产的试剂盒(产品编号分别为ml036413、ml092636和ml092683)按说明书进行测定。

2)营养成分测定。水分含量于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱按GB 5009.3—2016常压干燥法测定;粗灰分按GB 5009.4—2016用马弗炉灼烧法测定;粗蛋白按GB 5009.5—2016采用凯氏定氮仪K9860(海能未来技术

表 1 不同铁源试验饲料配方和营养成分(以干物质含量表示)

Table 1 Experimental feed formulations and nutritional composition of different iron sources (expressed as dry matter)

项目 Item	FeSO ₄	Fe-Met	Fe-Gly	Fe-CAA
原料/% Ingredients				
鱼粉 Fish meal	14.00	14.00	14.00	14.00
酪蛋白 Casein	34.70	34.70	34.70	34.70
豆粕 Soybean meal	13.00	13.00	13.00	13.00
面粉 Wheat flour	12.00	12.00	12.00	12.00
磷酸二氢钙 Calcium biphosphate	1.50	1.50	1.50	1.50
矿物质预混料 ¹⁾ Mineral premix ¹⁾	0.50	0.50	0.50	0.50
氯化钠 Sodium chloride	0.25	0.25	0.25	0.25
维生素预混料 ²⁾ Vitamin premix ²⁾	0.50	0.50	0.50	0.50
鱼油+豆油 Soy oil : Fish oil(1:1)	9.00	9.00	9.00	9.00
氯化胆碱 Choline chloride(50%)	0.50	0.50	0.50	0.50
乙氧基喹啉 Ethoxyquinoline(30%)	0.05	0.05	0.05	0.05
微晶纤维素 Microcrystalline cellulose	11.20	11.20	11.20	11.20
羧甲基纤维 Carboxymethylcellulose	2.50	2.50	2.50	2.50
防霉剂 Mildew inhibitor	0.10	0.10	0.10	0.10
硫酸亚铁 Ferrous sulfate(30%)	0.003			
蛋氨酸铁 Ferrous methionine chelate(13%)		0.005		
甘氨酸铁 Ferrous glycine chelate(17%)			0.004	
复合氨基酸螯合铁 ³⁾ Ferrous compound amino acids chelate ³⁾ (10%)				0.006
复合氨基酸 ⁴⁾ Compound amino acids ⁴⁾	0.017	0.015	0.016	0.014
营养成分 Proximate composition				
水分/% Moisture	7.47	6.77	6.28	5.76
粗蛋白/% Crude protein	45.78	45.80	46.44	46.70
粗脂肪/% Crude lipid	15.33	16.31	14.92	15.58
粗灰分/% Crude ash	6.20	6.21	6.18	6.16
铁含量/(mg/kg) Fe content	80.77	84.59	83.73	79.67

注：饲料中矿物质预混料¹⁾、维生素预混料²⁾及复合氨基酸螯合铁³⁾、复合氨基酸⁴⁾中的成分参见文献[15]。Note: The composition of mineral premix¹⁾, vitamin premix²⁾, ferrous compossound amino acids chelate³⁾ and compound amino acids⁴⁾ are referred to the reference [15].

集团股份有限公司, 济南)测定;粗脂肪按 GB 5009.6—2016采用索氏抽提法测定。

3)背部白肌蒸煮损失和质构特性测定。蒸煮损耗和质构特性参照文献[16]中的方法测定。每缸测量2尾鱼。简要步骤如下:每个样品称取2~3 g肌肉,用纱布包裹在沸水(100 ℃)中煮5 min。取出后去除表面水分并称质量。蒸煮损失率以热处理过程中的质量损失占初始样品质量的百分比表示。随后,将煮熟的肌肉切成1 cm×1 cm×0.6 cm(厚度)的块状用配备平底圆柱形探头P/36R(直径20 mm)的TA.XT Plus质构分析仪(Stable Micro Systems, Goudalming, 英国)进行肌肉质构分析(TPA)。测试时,样品以1 mm/s的恒定压缩速度压缩至原始高度的35%,保持时间为5 s。此外,预测试速度为2 mm/s,后测试速度为5 mm/s,负载探头类型为Auto-5 g。

数据采集速率为每秒200个点。质构参数的计算参照文献[15]的方法。

4)血清和肌肉酶活性测定。血清和肌肉的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性、过氧化氢酶(catalase, CAT)活性、总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)及还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量的测定均使用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒(产品编号分别为A001-3-2、A007-1-1、A015-2-1、A006-2-1和A003-1-2)按说明书操作。

5)肠道消化酶活性测定。肠道脂肪酶(lipase, LPS)、α-淀粉酶(amylase, AMS)和胰蛋白酶(trypsin)活性均使用南京建成生物工程研究所的试剂盒进行测定(产品编号分别为A054-2-1、C016-1-1和A080-2-2)。

1.5 计算和统计分析

存活率(survival rate, SR)、摄食率(feeding rate, FR)、特定生长率(specific growth rate, SGR)、饲料效率(feed efficiency, FE)和蛋白质效率(protein efficiency ratio, PER)等生长指标及肥满度(condition factor, CF)、肝体比(hepatopancreas index, HSI)、脏体比(viscerosomatic index, VSI)和肠系膜脂肪比(mesenteric fat index, MFI)等形体计算指标参照文献[15]的方法。

试验结果表示为平均值±标准差(mean±SD)。试验数据经 Excel2010 处理后,用 SPSS 软件(第 26 版,IBM,Armonk,NY,美国)进行统计分析。对结果进行正态性和 Levene’s 方差齐性检验后,进一步进

行单因素方差分析(one-way ANOVA)和邓肯(Duncan’s)多重检验。差异显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同铁源处理下大口黑鲈的生长性能和形态参数

饲喂 10 周后,各处理组的终末体质量(final body weight, FBW)均约为初始体质量(initial body-weight, IBW)的 6 倍(表 2),各处理组的存活率、特定生长率和摄食率无显著差异($P>0.05$),但复合氨基酸螯合铁组的终末体质量显著高于其余 3 组($P<0.05$)。硫酸亚铁组和甘氨酸铁组的肥满度显著高于蛋氨酸铁组和复合氨基酸螯合铁组($P<0.05$)。

表 2 不同铁源添加下大口黑鲈生长性能和形态参数

项目 Items	FeSO ₄	Fe-Met	Fe-Gly	Fe-CAA
初始体质量/g IBW	8.57±0.02	8.57±0.03	8.63±0.01	8.64±0.02
终末体质量/g FBW	49.67±0.51b	49.42±0.01b	49.39±0.86b	52.31±0.44a
存活率/% SR	97.33±0.01	93.33±0.03	98.67±0.02	98.67±0.03
特定生长率/(%/d) SGR	2.51±0.02	2.47±0.01	2.49±0.03	2.55±0.02
摄食率/(%/d) FR	1.64±0.01	1.67±0.06	1.70±0.03	1.66±0.05
饲料效率/% FE	121.66±1.44	118.56±4.50	118.06±1.25	120.21±2.37
蛋白质效率 PER	2.67±0.02	2.63±0.11	2.55±0.04	2.63±0.05
肥满度/% CF	2.05±0.01a	1.95±0.04b	2.10±0.01a	1.95±0.03b
肝体比/% HSI	2.95±0.31	2.54±0.35	2.49±0.27	2.78±0.36
脏体比/% VSI	8.39±0.32	7.71±0.43	7.82±0.23	7.84±0.33
肠系膜脂肪比/% MFI	0.82±0.05	0.86±0.06	0.90±0.07	0.84±0.08

注:除肥满度、肝体比、脏体比及肠系膜脂肪比为 15 个重复($n=15$)的平均值外,表中其他数据均为 3 个重复($n=3$)的平均值。同行数据后标注不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),标注相同字母或无字母标注表示差异不显著($P>0.05$)。下表同。Note: The data in the table are means of 3 replicates ($n=3$), except that CF, HSI, VSI, and MFI are the means of 15 replicates ($n=15$). The data in the same row labeled with different letters indicate significant differences ($P<0.05$), while the data with the same letter or no letter indicate non-significant differences ($P>0.05$). The same as below.

2.2 不同铁源处理组大口黑鲈的血清生化指标和酶活性

由表 3 可知,血清生化指标中,硫酸亚铁组和复合氨基酸螯合铁组的 HDL 含量显著高于甘氨酸铁组($P<0.05$),蛋氨酸铁组与其余 3 组差异不显著($P>0.05$)。甘氨酸铁组的 AST 活性显著高于硫酸亚铁组,而蛋氨酸铁组的 ALT 活性显著高于硫酸亚铁组($P<0.05$)。非特异性免疫指标方面,各组间的 C3、IgM 和 LYS 含量差异均不显著($P>0.05$)。抗氧化能力指标方面,复合氨基酸螯合铁组的 SOD 活性达到 117.48 U/L,显著高于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组,且复合氨基酸螯合铁组的 MDA 含量显著低于其余 3 组($P<0.05$)。

2.3 不同铁源处理下大口黑鲈的全鱼和肌肉营养成分

由表 4 可知,本试验中,全鱼的水分含量为 67.19%~69.34%,粗蛋白质含量约为 18%,粗脂肪含量约为 10%,这些指标在各处理组之间无显著差异($P>0.05$)。相对全鱼,肌肉的粗蛋白和水分含量要高,而粗脂肪和粗灰分含量则低。但各处理间,肌肉中的这些指标也没有显著差异($P>0.05$)。

2.4 不同铁源处理下大口黑鲈的肌肉酶活性

如图 1 所示,复合氨基酸螯合铁组肌肉 SOD 活性显著高于其余 3 组,而 MDA 含量显著低于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组($P<0.05$)。硫酸亚铁组和复合

表 3 不同铁源添加下大口黑鲈血清生化指标和酶活性

Table 3 Serum biochemical parameters and enzyme activities of largemouth bass fed diets supplemented with different iron sources

项目 Items	FeSO ₄	Fe-Met	Fe-Gly	Fe-CAA
总蛋白/(g/L) TP	31.23±2.35	30.13±3.09	28.80±1.70	31.63±1.91
葡萄糖/(mmol/L) GLU	19.50±0.81	19.25±3.67	17.05±1.65	20.07±1.72
尿素氮/(mmol/L) UN	1.90±0.21	1.97±0.09	1.67±0.03	2.00±0.26
甘油三脂/(mmol/L) TG	3.69±1.31	1.83±0.40	2.14±0.04	2.49±0.26
胆固醇/(mmol/L) CHOL	6.69±0.55	5.70±0.26	6.22±0.47	6.93±0.48
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL	4.14±0.18a	3.94±0.18ab	3.61±0.09b	4.28±0.11a
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL	1.81±0.23	1.73±0.15	1.57±0.02	2.08±0.10
谷草转氨酶/(U/L) AST	104.00±4.04b	127.00±0.58ab	138.33±15.30a	115.00±11.35ab
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	4.67±1.33b	15.00±4.58a	10.00±1.53ab	10.67±2.03ab
补体 3/(μg/mL) C3	152.04±1.65	149.09±5.67	139.09±7.42	149.84±2.98
免疫球蛋白 M/(μg/mL) IgM	33.53±0.69	35.36±0.94	33.55±0.82	35.05±0.94
溶菌酶/(ng/mL) LYS	205.41±6.93	200.04±7.50	204.81±5.33	200.27±8.84
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	109.16±1.36ab	105.28±0.80b	102.45±2.85b	117.48±2.79a
丙二醛/(nmol/mL) MDA	27.09±0.71a	29.43±0.57a	26.87±1.13a	21.30±1.06b
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	9.70±0.27	9.07±0.66	10.01±0.27	9.74±0.63
还原型谷胱甘肽/(μmol/L) GSH	16.74±1.05	16.28±1.15	18.62±1.29	19.20±0.76
总抗氧化能力/(mmol/L) T-AOC	2.16±0.03	2.19±0.01	2.15±0.02	2.18±0.01

表 4 不同铁源添加下大口黑鲈全鱼和背肌营养成分(占鲜质量的百分比)

Table 4 Nutrient composition of whole-body and dorsal muscle in largemouth bass fed diets supplemented with different iron sources (percent of fresh sample) %

项目 Items	FeSO ₄	Fe-Met	Fe-Gly	Fe-CAA
全鱼 Whole fish				
水分 Moisture	68.09±0.98	67.19±1.05	69.34±0.24	67.78±0.44
粗蛋白 Crude protein	17.76±0.26	18.02±0.62	17.67±0.39	18.02±0.68
粗脂肪 Crude lipid	9.57±0.67	10.24±0.62	9.30±0.39	9.67±0.68
粗灰分 Crude ash	3.92±0.07	4.05±0.25	3.97±0.09	4.32±0.05
背肌 Dorsal muscle				
水分 Moisture	76.90±0.53	77.18±0.10	77.21±0.22	77.12±0.29
粗蛋白 Crude protein	19.85±0.33	19.78±0.22	19.31±0.13	19.42±0.36
粗脂肪 Crude lipid	2.62±0.23	2.51±0.26	2.35±0.08	2.17±0.15
粗灰分 Crude ash	1.22±0.02	1.16±0.02	1.12±0.01	1.14±0.03

氨基酸螯合铁组的 GSH 含量和 CAT 活性显著高于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组($P<0.05$)。另外,复合氨基酸螯合铁组的总抗氧化能力显著高于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组($P<0.05$)。

0.05),但与甘氨酸铁组差异不显著($P>0.05$)。各处

理组之间肠道 α -淀粉酶和脂肪酶活性无显著差异($P>0.05$)。

2.5 不同铁源处理下大口黑鲈的肌肉质构特性

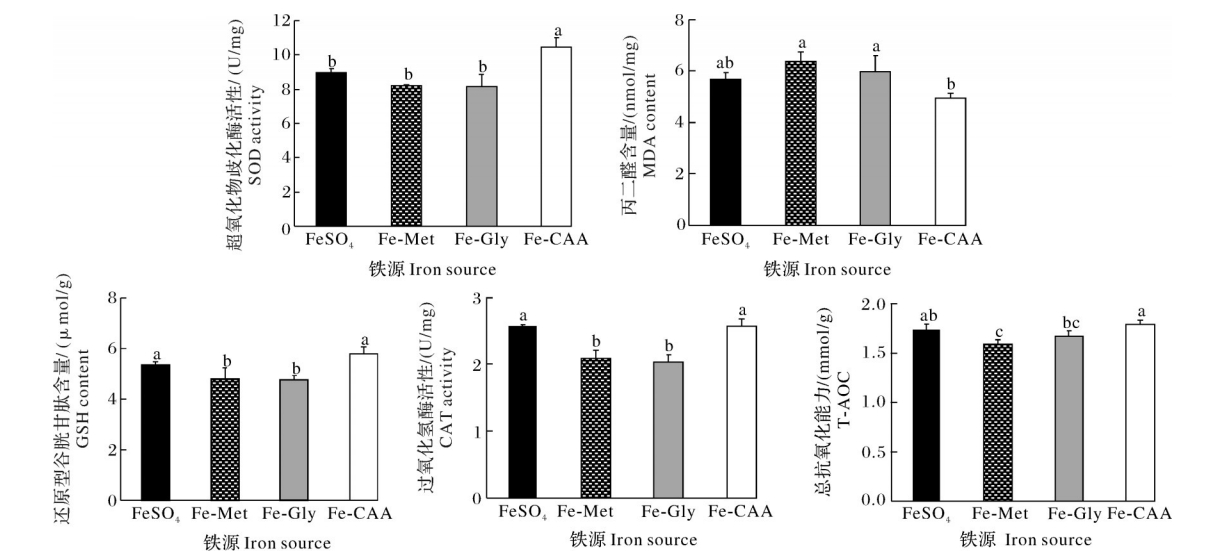
由表 5 可知,大口黑鲈肌肉的蒸煮损失及硬度、弹性、凝聚力、咀嚼力和回复力等质构指标尽管存在一定的变幅,但统计学上,各指标在试验处理组之间均没有显著差异($P>0.05$)。

2.6 不同铁源处理下大口黑鲈的肠道消化酶活性

由图 2 可知,复合氨基酸螯合铁组的肠道胰蛋白酶活性显著高于硫酸亚铁组和蛋氨酸铁组($P<$

3 讨 论

铁在维持动物机体生长和调节新陈代谢中发挥着重要作用^[3]。机体缺铁则生长受阻,健康状态受损^[5]。动物缺铁的原因主要有 2 个,一是饲料的铁浓度较低,导致机体铁元素获取不足,二是饲料中铁源的生物利用率低,机体对其吸收不佳^[15]。因此,确定养殖鱼类饲料中适宜的铁浓度及生物利用形式具有重要意义。已有研究证实鱼类的生长受饲料中铁含



图中数据均为 3 个重复($n=3$)的平均值。图柱上方字母不同代表差异显著。下图同。The data are the means of 3 replicates ($n=3$). Different letters above the bars represent significant differences. The same as below.

图 1 不同铁源添加下大口黑鲈肌肉中的酶活性

Fig. 1 Muscle enzyme activities of largemouth bass fed diets supplemented with different iron sources

表 5 不同铁源添加下大口黑鲈的肌肉质构特性

Table 5 Texture properties of largemouth bass muscle fed diets supplemented with different iron sources

项目 Items	FeSO ₄	Fe-Met	Fe-Gly	Fe-CAA
蒸煮损失/% Cooking loss	27.92±0.01	23.97±0.01	26.61±0.02	26.06±0.02
硬度/g Hardness	1 432.01±80.46	1 207.05±200.46	1 407.73±174.61	981.84±78.02
弹性/cm Springiness	0.53±0.04	0.46±0.01	0.46±0.02	0.52±0.04
凝聚力 Cohesiveness	0.37±0.03	0.36±0.01	0.37±0.01	0.38±0.01
咀嚼力/g Chewiness	276.95±49.99	202.20±37.99	225.22±34.66	185.69±4.13
回复力/(g/s) Resilience	0.11±0.02	0.09±0.01	0.10±0.01	0.10±0.01

注:表中数据均为 6 个重复($n=6$)的平均值。Note: The data are the means of 6 replicates ($n=6$).

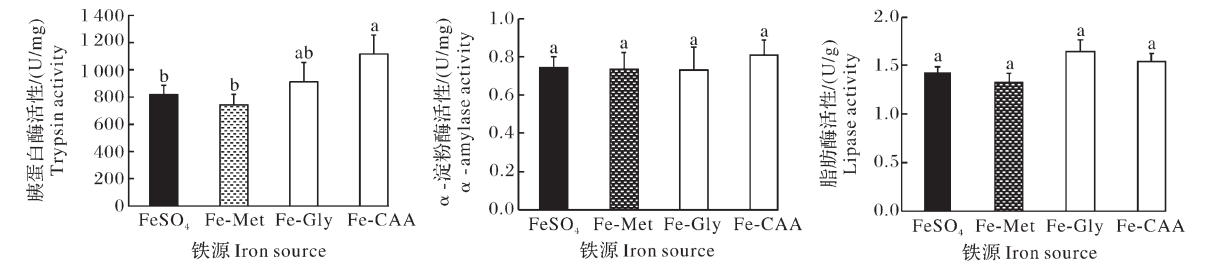


图 2 不同铁源添加下大口黑鲈的肠道消化酶活性

Fig. 2 Intestinal digestive enzyme activities of largemouth bass fed diets supplemented with different iron sources

量和铁源的影响^[3,7,10,15,17-18],但关于单一氨基酸螯合铁源在鱼类饲料中的研究还较少,且复合氨基酸螯合铁的研究缺乏。本研究中,以复合氨基酸螯合铁为铁源时,大口黑鲈的终末体质量显著高于其他组,而各组之间的存活率没有显著差异,这说明复合氨基酸螯合铁相较于硫酸亚铁、蛋氨酸铁和甘氨酸铁可在一定程度上改善大口黑鲈的生长。类似地,与同水平的硫酸亚铁相比,复合氨基酸螯合铁能显著促进仔猪的生长^[19]。本研究中蛋氨酸铁、甘氨酸铁与硫酸亚铁组的生长指标无显著差异,这与不同铁源不影响斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)和珍珠龙胆石斑鱼(*Epinephelus lanceolatus* ♂×*E. fuscoguttatus* ♀)的成活率和特定生长率相吻合^[7,20]。但军曹鱼和草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)摄食含蛋氨酸铁饲料时的增重率均显著高于硫酸亚铁组^[10-11]。相比而言,前3个研究中氨基酸螯合铁与硫酸亚铁无差异的鱼类均为肉食性鱼,而后二者有差异的为杂食性或草食性鱼,肉食性鱼饲料中含有较

高比例的动物性蛋白,其中的铁可能具有较好的可利用性,从而导致添加铁源的影响被减轻。但具体跟鱼种类的食性及饲料中Fe存在形式的关系如何值得后续研究。

血清生化指标和抗氧化酶活性是判断机体健康状况的重要参考^[21]。铁可以通过抑制自由基的产生和脂质过氧化作用来调节机体的抗氧化防御系统^[17]。SOD是清除超氧自由基的核心抗氧化酶,保护细胞免受氧化损伤^[22],其活性的高低可体现机体内自由基的变化和组织的氧化应激情况^[20],而MDA是脂质过氧化的终产物,具有较强的生物毒性,其含量可衡量脂质过氧化的程度^[23]。傅鑫森^[14]研究结果显示,日粮中添加复合氨基酸络合铁会显著影响肉鸡血清内SOD分型及T-SOD、CAT酶活性。本研究中,相较于蛋氨酸铁和甘氨酸铁,复合氨基酸螯合铁显著提高了大口黑鲈血清的SOD活性,并显著降低血清MDA含量,这表明以复合氨基酸螯合铁为铁源,大口黑鲈的抗氧化和清除体内自由基的能力得到改善,对机体具有保护作用。但在军曹鱼中,蛋氨酸铁组的血清CAT活性高于硫酸亚铁组^[12],这与本研究的结果不一致,可能跟鱼的种类和食物结构有关系。HDL是运输胆固醇的载体,具有清除血脂和维持脂质代谢平衡的作用,较高的HDL水平代表鱼类的良好脂质代谢和肝脏健康^[24]。复合氨基酸螯合铁提高了大口黑鲈血清HDL含量,且与甘氨酸铁组差异显著,这表明复合氨基酸螯合铁会通过提高HDL水平来改善机体脂代谢。血清AST和ALT活性是判断肝脏健康状况的重要指标,其值高出一定范围后通常意味着肝脏组织受到损伤,肝功能发生障碍^[25]。本研究中蛋氨酸铁组的血清ALT活性相较于硫酸亚铁组高,甘氨酸铁组血清AST活性也高于复合氨基酸螯合铁组,这表明不同铁源在一定程度上会影响大口黑鲈的肝脏功能。有研究认为,蛋氨酸铁组的血清AST活性显著低于硫酸亚铁组,表明蛋氨酸螯合铁比硫酸亚铁更有利于草鱼肝脏健康^[11]。但目前还没有确定大口黑鲈这2项指标的健康范围,需要学者们积累更多的血清AST和ALT数据来开展相关研究以判断大口黑鲈的肝脏功能是否受损伤。此外,不同铁源对大口黑鲈血清的非特异性免疫指标没有显著影响,这与晏家友等^[26]在新西兰肉兔中的研究结果一致。

饲料中添加不同铁源对鱼体营养成分影响的研究较少。不同铁源对草鱼全鱼的粗蛋白质、粗灰分

和水分含量均无显著影响,但会影响鱼体脂肪含量^[11]。本研究中,各组间的全鱼和肌肉中粗蛋白质、粗脂肪、粗灰分和水分含量均无显著差异,这跟不同铁源对罗非鱼和鲤体成分均无显著影响的结果^[27]完全一致。这些结果表明,在适宜铁水平范围内,不同铁源补充均可提供铁作为酶的辅基以促进机体物质代谢,从而不影响机体成分。这也解释了本研究中各处理组的饲料利用没有显著差异。

当机体受到强氧化应激时,不仅会引起细胞和组织产生氧化损伤,还可引起肌肉中脂质和蛋白质的降解,产生脂质过氧化物等不良风味物质,最终影响肌肉品质^[28]。肌肉抗氧化酶SOD和CAT活性、T-AOC、GSH及MDA含量是衡量肌肉品质的重要指标^[29]。本研究中,复合氨基酸螯合铁组的肌肉SOD活性显著高于其他3组,且肌肉CAT活性、GSH含量和T-AOC均显著高于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组,而肌肉MDA含量显著低于蛋氨酸铁组和甘氨酸铁组,这与血清中的影响结果基本一致,表明复合氨基酸螯合铁组的大口黑鲈通过提高SOD、CAT等抗氧化酶活性和GSH含量抵抗氧化胁迫,降低MDA含量,从而改善肌肉品质。傅鑫森^[14]的研究也确认,日粮中添加复合氨基酸络合铁可提高肉鸡胸肌抗氧化酶活性,且效果优于无机铁,这与本研究结果一致。

肌肉的蒸煮损失、硬度、粘度、咀嚼性和弹性是评估肌肉感官质量的关键参数^[16]。蒸煮损失决定肌肉保水性和营养价值,硬度、弹性和咀嚼性能反映出咀嚼时口感的细腻和肌肉Q弹程度,坚实的肉质会提高鱼肉的评级和消费者接受度^[30]。在本研究中,不同铁源的应用并未对大口黑鲈肌肉的质构指标产生显著影响。可能由于肌肉质构特性(如硬度、弹性等)主要受肌原纤维蛋白(如肌球蛋白、肌动蛋白)含量、胶原蛋白交联度及肌肉水分保持能力的影响^[31]。同时这也和各组间的全鱼和背部肌肉中粗蛋白质、粗脂肪等含量均无显著差异的结果保持一致。

肠道是重要的消化吸收器官,肠中的消化酶活性与机体消化吸收功能呈正相关^[32]。在畜禽研究中发现,甘氨酸亚铁较硫酸亚铁可显著提升肉鸡胰蛋白酶活性^[33],本研究表明,复合氨基酸螯合铁组胰蛋白酶活性显著高于硫酸亚铁组和蛋氨酸铁组,这表明以复合氨基酸螯合铁作为铁源,可以通过调控肠道酶系统,在一定程度上改善大口黑鲈对蛋白质的消化,这也是该组体质量高于其他组的重要原因。

综上所述,相较于硫酸亚铁、蛋氨酸铁和甘氨酸铁,复合氨基酸螯合铁不同程度提升了大口黑鲈的终末体质量、血清和肌肉中超氧化物歧化酶与过氧化氢酶活性及肠道胰蛋白酶活性,显著降低了丙二醛含量。表明复合氨基酸螯合铁通过协同调控生长代谢与抗氧化通路,缓解脂质过氧化损伤,改善大口黑鲈的健康状态和肌肉品质,可推荐作为大口黑鲈饲料中的铁源。本研究首次比较了复合氨基酸螯合铁相较于其他铁源对水产动物生长和代谢的影响,为复合氨基酸螯合铁在水产动物中的应用提供了参考。

参考文献 References

- [1] LALL S P, KAUSHIK S J. Nutrition and metabolism of minerals in fish [J/OL]. *Animals*, 2021, 11 (9) : 2711 [2025-03-15]. <https://doi.org/10.3390/ani11123510>.
- [2] BEARD J L. Iron biology in immune function, muscle metabolism and neuronal functioning [J]. *Journal of nutrition*, 2001, 131(2):568-580.
- [3] GUO Y L, JIANG W D, WU P, et al. The decreased growth performance and impaired immune function and structural integrity by dietary iron deficiency or excess are associated with TOR, NF- κ B, p38MAPK, Nrf2 and MLCK signaling in head kidney, spleen and skin of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Fish & shellfish immunology*, 2017, 65:145-168.
- [4] BLACK M M, QUIGG A M, HURLEY K M, et al. Iron deficiency and iron-deficiency *Anemia* in the first two years of life: strategies to prevent loss of developmental potential [J]. *Nutrition reviews*, 2011, 69(Suppl 1):64-70.
- [5] SHIAU S Y, SU L W. Ferric citrate is half as effective as ferrous sulfate in meeting the iron requirement of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* \times *O. aureus* [J]. *Journal of nutrition*, 2003, 133(2):483-488.
- [6] BURY N R, GROSELL M. Waterborne iron acquisition by a freshwater teleost fish, zebrafish *Danio rerio* [J]. *Journal of experimental biology*, 2003, 206(19):3529-3535.
- [7] 王二龙. 斜带石斑鱼锌、铁需要量及锌源、铁源相对生物学效价的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014. WANG E L. The requirements of Zn, Fe and bioavailability of different Zn and Fe sources for juvenile grouper *Epinephelus coioides* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王进, 刘恒见, 黄峰, 等. 不同铁源对吉富罗非鱼生长及表观消化率的影响[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(3):105-108. WANG J, LIU H J, HUANG F, et al. Effects of different iron sources on the growth and apparent digestibility of *Oreochromis niloticus* [J]. *Freshwater fisheries*, 2014, 44(3):105-108 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张杰, 张锦秀, 李书伟, 等. 不同铁源对鲤鱼生长性能和死亡率的影响[J]. *中国畜牧兽医*, 2010, 37(8):18-20. ZHANG J, ZHANG J X, LI S W, et al. Effects of different iron sources on growth performance and mortality of common carp [J]. *China animal husbandry & veterinary medicine*, 2010, 37(8):18-20 (in Chinese).
- [10] QIAO Y G, TAN B P, MAI K S, et al. Evaluation of iron methionine and iron sulphate as dietary iron sources for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*) [J]. *Aquaculture nutrition*, 2013, 19(5):721-730.
- [11] 徐光明, 刘阿朋, 董立学, 等. 硫酸亚铁和蛋氨酸螯合铁在草鱼实用膨化饲料中应用效果比较研究[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(10):6587-6597. XU G M, LIU A P, DONG L X, et al. Comparative study on the application effects of ferrous sulfate and methionine chelated iron in practical extruded feeds for grass carp [J]. *Chinese journal of animal nutrition*, 2023, 35(10):6587-6597 (in Chinese with English abstract).
- [12] 沐建煜. 氨基酸螯合铁在动物营养中的研究进展[J]. *国外畜牧学(猪与禽)*, 2020, 40(1):68-70. MU J Y. Research progress of amino acid chelated iron in animal nutrition [J]. *Animal science abroad (pigs and poultry)*, 2020, 40(1):68-70 (in Chinese).
- [13] 彭志东, 张波. 不同形式铁对南美白对虾生长和体沉积的影响[J]. *饲料与畜牧*, 2008(1):7-10. PENG Z D, ZHANG B. Effects of different iron forms on growth performance and body deposition of Pacific white shrimp [J]. *Feed and animal husbandry*, 2008(1):7-10 (in Chinese).
- [14] 傅鑫森. 复合氨基酸络合铁对肉鸡适宜添加水平和耐受性评价[D]. 太原: 山西农业大学, 2021. FU X S. Evaluation of the appropriate addition level and tolerance of complex amino acid iron on broilers [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [15] MAO X J, CHEN W W, LONG X M, et al. Effect of dietary iron (Fe) level on growth performance and health status of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J/OL]. *Aquaculture*, 2024, 581: 740446 [2025-03-15]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740446>.
- [16] ABOUEL AZM F R, KONG F S, TAN Q S, et al. Effects of replacement of dietary rapeseed meal by distiller's dried grains with solubles (DDGS) on growth performance, muscle texture, health and expression of muscle-related genes in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J/OL]. *Aquaculture*, 2021, 533: 736169 [2025-03-15]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.736169>.
- [17] BEHERA T, SWAIN P, RANGACHARULU P V, et al. Nano-Fe as feed additive improves the hematological and immunological parameters of fish, *Labeo rohita* H [J]. *Applied nanoscience*, 2014, 4(6):687-694.
- [18] FENG W, HU X, WANG F, et al. Effect of dietary iron levels on tissues, intestinal digestive enzyme activity, and muscle nutrient compositions of juvenile bighead carp (*Aristichthys nobilis*

- is) [J/OL]. Israeli journal of aquaculture - Bamidgheh, 2019, 71:1634[2025-03-15].<https://doi.org/10.46989/001c.20957>.
- [19] 石炳钊, 范佳俊, 古殿超, 等. 不同来源铁添加剂对断奶仔猪血清生化指标和器官指数的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2023, 59(8): 339-344. SHI B Z, FAN J J, GU D C, et al. Effects of iron additives from different sources on serum biochemical parameters and organ indices in weaned piglets [J]. Chinese journal of animal science, 2023, 59(8): 339-344 (in Chinese).
- [20] 郭鑫伟, 张洋, 迟淑艳, 等. 三种铁源对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长性能、肝脏抗氧化酶活性及肠道发育形态的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(11): 53-61. GUO X W, ZHANG Y, CHI S Y, et al. Effects of three kinds Fe sources on growth performance, hepatic antioxidative enzymes and intestinal morphology of juvenile pearl gentian grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀) [J]. Periodical of Ocean University of China (natural science edition), 2020, 50(11): 53-61 (in Chinese with English abstract).
- [21] PERES H, SANTOS S, OLIVA-TELES A. Blood chemistry profile as indicator of nutritional status in European seabass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. Fish physiology and biochemistry, 2014, 40(5): 1339-1347.
- [22] MARTÍNEZ-ÁLVAREZ R M, MORALES A E, SANZ A. Antioxidant defenses in fish: biotic and abiotic factors [J]. Reviews in fish biology and fisheries, 2005, 15(1): 75-88.
- [23] DRAPER H H, SQUIRES E J, MAHMOODI H, et al. A comparative evaluation of thiobarbituric acid methods for the determination of malondialdehyde in biological materials [J]. Free radical biology and medicine, 1993, 15(4): 353-363.
- [24] 张皓迪. 低温水下大口黑鲈、鳊鱼短期饥饿和摄食的生理状态比较[D]. 重庆: 西南大学, 2021. ZHANG H D. Comparison of physiological status of short-term starvation and feeding of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) and mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) at low water temperature [D]. Chongqing: Southwest University, 2021 (in Chinese with English abstract).
- [25] RATHORE S S, MURTHY H S, MAMUN M A, et al. Nano-selenium supplementation to ameliorate nutrition physiology, immune response, antioxidant system and disease resistance against *Aeromonas hydrophila* in monosex Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Biological trace element research, 2021, 199(8): 3073-3088.
- [26] 晏家友, 刁慧, 李书伟, 等. 不同铁源对新西兰肉兔生长性能、血清指标及组织器官铁沉积的影响 [J]. 中国饲料, 2022 (1): 54-57. YAN J Y, DIAO H, LI S W, et al. Effect of different iron sources on growth performance, serum indices, tissue and organ iron accumulations in New Zealand meat rabbits [J]. China feed, 2022 (1): 54-57 (in Chinese with English abstract).
- [27] 赵元凤, 吕景才, 刘靖. 复合螯合微量元素添加剂对鱼、贝生长及能量转化的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(2): 96-100. ZHAO Y F, LÜ J C, LIU J. Effects of element chelates supplementation on growth and energy transformation in fish and shellfish [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2001, 23(2): 96-100 (in Chinese with English abstract).
- [28] 陈艳婷, 贾小巍, 钱鹏丞, 等. 饲料中不同脂肪源对青鱼生长性能、血清生化指标及肌肉品质的影响 [J]. 动物营养学报, 2022, 34(7): 4657-4673. CHEN Y T, JIA X W, QIAN P C, et al. Effects of dietary different lipid sources on growth performance, serum biochemical parameters and muscle quality of black carp (*Mylopharyngodon piceus*) [J]. Chinese journal of animal nutrition, 2022, 34 (7): 4657-4673 (in Chinese with English abstract).
- [29] LI D, CHEN W J, YIN Y X, et al. Effects of carnosine addition in low-fishmeal feed on the growth performance, muscle antioxidant capacity and flesh quality of orange-spotted grouper (*Epinephelus coioides*) [J/OL]. Fishes, 2024, 9(11): 467 [2025-03-15].<https://doi.org/10.3390/fishes9110467>.
- [30] 蒋湘辉, 王兴兵, 李赫, 等. 流水养殖条件下细鳞鲈、哲罗鲑及其杂交种生长、肌肉质构特性和营养的比较研究 [J]. 淡水渔业, 2025, 55(1): 69-75. JIANG X H, WANG X B, LI H, et al. Comparison in growth, muscle textural characteristics and nutrition of lenok *Brachymystax lenok*, taimen *Hucho taimen* and hybrid under flowing water farming [J]. Freshwater fisheries, 2025, 55(1): 69-75 (in Chinese with English abstract).
- [31] HULTMANN L, RUSTAD T. Iced storage of Atlantic salmon (*Salmo salar*): effects on endogenous enzymes and their impact on muscle proteins and texture [J]. Food chemistry, 2004, 87(1): 31-41.
- [32] PERVIN M A, JAHAN H, AKTER R, et al. Appraisal of different levels of soybean meal in diets on growth, digestive enzyme activity, antioxidation, and gut histology of tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Fish physiology and biochemistry, 2020, 46(4): 1397-1407.
- [33] 刘欢. 饲料中添加甘氨酸亚铁对肉鸡生产性能和铁利用的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021. LIU H. Effects of dietary ferrous-glycine complex addition on the growth performance and iron utilization in broilers [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2021 (in Chinese with English abstract).

Effects of different dietary iron sources on growth performance, serum biochemicals and muscle quality of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*)

MAO Xiangjie¹, CHEN Jialong¹, GU Dianchao^{1,2}, HU Wenguang¹,
YANG Wuhua³, ZHU Wenhuan⁴, TAN Qingsong¹

1. Key Lab of Freshwater Animal Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/
Hubei Provincial Engineering Laboratory for Pond Aquaculture/College of Fisheries,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Hunan DeBon Bio-tech Co., Ltd., Changning 421500, China;

3. Agricultural Technology Extension Service Centre, Caidian District, Wuhan 430199, China;

4. Wuhan Fisheries Technology Extension and Instruction Center, Wuhan 430012, China

Abstract To identify the optimal dietary iron source for largemouth bass (*Micropterus salmoides*), juvenile fish with an initial body weight (IBW) of (8.60 ± 0.04) g were fed four isonitrogenous, isolipidic, and isoiron diets containing different iron sources, namely, ferrous sulfate (FeSO_4), ferrous methionine chelate (Fe-Met), ferrous glycine chelate (Fe-Gly), and ferrous compound amino acids chelate (Fe-CAA) for 10 weeks. The effects of these iron sources on growth performance, blood physiological and biochemical indices, and muscle quality were investigated. The results demonstrated that: (1) The final body weight of the Fe-CAA group [(52.31 ± 0.44) g] was significantly higher than that of the other three groups ($P < 0.05$). The condition factor (CF) in the FeSO_4 and Fe-Gly groups was significantly higher than that in the Fe-Met and Fe-CAA groups ($P < 0.05$). (2) Serum biochemical parameters and antioxidant capacity were also influenced by the dietary source. High-density lipoprotein (HDL) levels in the FeSO_4 [(4.14 ± 0.18) mmol/L] and Fe-CAA [(4.28 ± 0.11) mmol/L] groups were significantly higher than in Fe-Gly group [(3.61 ± 0.09) mmol/L] ($P < 0.05$). Serum aspartate aminotransferase (AST) activity in the Fe-Gly group [(138.33 ± 15.30) U/L] exceeded that of the FeSO_4 group [(104.00 ± 4.04) U/L], while alanine aminotransferase (ALT) activity in the Fe-Met group [(15.00 ± 4.58) U/L] was significantly higher than in the FeSO_4 group [(4.67 ± 1.33) U/L] ($P < 0.05$). The Fe-CAA group exhibited higher serum superoxide dismutase (SOD) activity [(117.48 ± 2.79) U/mL] than the Fe-Gly and Fe-Met groups, and the lowest malondialdehyde (MDA) content [(21.30 ± 1.06) mmol/mL] compared with the other groups ($P < 0.05$). (3) Muscle SOD activity [(10.44 ± 0.59) U/mg] in the Fe-CAA group was the highest among all groups, while MDA content [(4.93 ± 0.20) nmol/mg] in the Fe-CAA group was lower than in the Fe-Met and Fe-Gly groups ($P < 0.05$). Glutathione (GSH) and catalase (CAT) activities in the FeSO_4 and Fe-CAA groups exceeded those in the Fe-Met and Fe-Gly groups ($P < 0.05$). Additionally, Fe-CAA exhibited a higher total antioxidant capacity [T-AOC, (1.79 ± 0.04) mmol/L] than the Fe-Gly and Fe-Met groups ($P < 0.05$). (4) Fe-CAA also showed significantly elevated trypsin activity [(1116.62 ± 138.90) U/mg] compared to the FeSO_4 and Fe-Met groups ($P < 0.05$). In conclusion, Fe-CAA demonstrated advantages in enhancing growth performance and antioxidant capacity compared to the other three iron sources, which could be suggested as the first choice of iron source in largemouth bass diet.

Keywords largemouth bass; iron source; growth performance; serum biochemical indices; antioxidant capacity; muscle quality

(责任编辑:边书京)