

DOI: 10.12264/JFSC2024-0229

配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鰺生长及肌肉营养成分的影响

陈培培¹, 茹笑影², 黄洋^{1,2}, 李锦¹, 杨佳慧¹, 杨桐林¹, 朱琨锋¹, 邹一帆¹,
朱春华^{1,2}

1. 广东海洋大学水产学院, 广东省名特优鱼类生殖调控与繁育工程技术研究中心, 广东省海水养殖生物育种工程实验室, 广东 湛江 524088;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 湛江 524025

摘要: 高体鰺(*Seriola dumerili*)是一种掠食性鱼类, 目前生产中普遍使用冰鲜杂鱼进行投喂, 致使养殖过程病害频发。为探究人工配合饲料能否代替冰鲜杂鱼的使用, 本研究选取 180 尾高体鰺幼鱼[初始体重: (274.93±11.17) g], 随机分为两组, 每组三个平行, 分别投喂配合饲料与冰鲜杂鱼, 进行为期 60 d 的人工养殖实验。结果显示: 1. 生长性能上, 配合饲料组终末体重(FBW)、增重率(WGR)和特定生长率(SGR)极显著低于冰鲜杂鱼组($P<0.01$); 两组间成活率(SR)、肥满度(CF)、肝体比(HSI)及脏体比(VSI)均无显著差异($P>0.05$)。2. 生长基因表达水平结果表明, 配合饲料组肌肉中 *MyoG*、*MyoD1*、*MyoD2* 和 *COL1A1A* 基因的相对表达量显著升高($P<0.05$), 而肝脏 *IGF-2* 的相对表达量极显著降低($P<0.01$)。3. 两组间肌肉粗脂肪和粗蛋白含量无显著差异($P>0.05$), 配合饲料组全鱼粗脂肪含量和肌纤维密度极显著低于冰鲜杂鱼组($P<0.01$), 而全鱼粗蛋白含量和肌纤维横截面积极显著增大($P<0.01$)。4. 配合饲料组肌肉呈味氨基酸(Glu、Asp、Gly、Ala)含量、必需氨基酸含量和指数(EAAI)、氨基酸总量及 n-6 多不饱和脂肪酸水平均高于冰鲜杂鱼组($P<0.05$), 而冰鲜杂鱼组 n-3 多不饱和脂肪酸水平更高($P<0.01$)。综上所述, 相较于冰鲜杂鱼组, 配合饲料能显著提高肌肉蛋白质水平、氨基酸组成及营养价值, 同时促进肌肉生长基因和胶原蛋白基因的表达, 而生长性能和 n-3 PUFA 水平偏低。本研究证明了在高体鰺养殖过程中人工配合饲料可替代冰鲜杂鱼, 但需进一步调整优化饲料配方。

关键词: 高体鰺; 配合饲料; 冰鲜杂鱼; 生长性能; 肌肉营养成分

中图分类号: S965

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)02-0150-18

高体鰺(*Seriola dumerili*)又称章红鱼, 俗名红甘鱼, 属鲈形目(Perciformes)、鲈科(Carangidae)、鰺属(*Seriola*), 是大洋性深海中上层鱼类, 主要分布于大西洋和地中海海域, 我国的南海与东海也有分布。高体鰺肉质鲜美、营养价值高, 深受消费者喜爱^[1]。此外, 高体鰺生长迅速、养殖 2.5 年体重可达 6 kg, 备受养殖户的欢迎, 在日本、西班牙和意大利等国家均有大规模养殖^[2]。我国福建、广东和海南等沿海海域也开展了高体鰺人工

养殖, 并成为我国南方海水网箱养殖中主要出口创汇鱼类之一^[3]。目前, 我国养殖的高体鰺主要以向国外出售其野生幼鱼和小规模成鱼为主, 对高体鰺开发利用程度远不及日本等国家, 因此, 我国深远海高体鰺养殖亟需突破和提升。高体鰺是一种掠食性鱼种, 主要以硬骨鱼类、头足类及甲壳类为食, 所以在其养殖过程, 养殖户普遍使用冰鲜杂鱼进行投喂^[4]。然而冰鲜杂鱼易携带致病性病原, 导致养殖过程病害频发, 同时伴随着饵

收稿日期: 2024-09-24; 修订日期: 2024-11-04.

基金项目: 广东省现代化海洋牧场适养品种核心技术攻关项目(2024-MRB-00-001); 广东海洋大学项目(030301022301); 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目(ZJW-2023-10).

作者简介: 陈培培(1997-), 女, 硕士研究生, 从事水产养殖与育种研究. E-mail: 19937071305@163.com

通信作者: 朱春华, 教授, 从事水域环境与养殖生态研究. E-mail: zhu860025@163.com

料营养不全面和饲料利用率低、投喂成本高昂及污染水质等问题,限制了高体鲷养殖业的健康持续发展^[5]。人工配合饲料可人为均衡营养,具有安全性能高、污染小,投喂便利且成本低的特点,现配合饲料被广泛运用于水产养殖业中,促进了该行业的绿色可持续发展^[6]。因此,使用配合饲料替代冰鲜杂鱼是未来水产养殖的发展趋势。

人工配合饲料和冰鲜杂鱼养殖对比实验已在各种经济鱼类中相继开展,由于鱼种、饲料配方及养殖环境的差异,因此配合饲料对鱼类生长性能的影响也有所不同。对驼背鲈(*Cromileptes altivelis*)^[7]的研究中,配合饲料终末体重(FBW)和增重率(WGR)显著高于冰鲜杂鱼。在对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)^[8]、尖吻鲈(*Lates calcarifer*)^[9]、黄姑鱼(*Nibea albiflora*)^[10]及珍珠龙胆石斑鱼(*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)^[11]的研究中发现,配合饲料的 FBW、WGR 和特定生长率(SGR)与冰鲜杂鱼相比均无显著差异,且饲料系数(FCR)更低。然而,在大口黑鲈^[12]、斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*)^[13]、大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)^[14]、黄斑蓝子鱼(*Siganus canaliculatus*)^[15]和乌鳢(*Channa argus*)^[16]等鱼类研究中,配合饲料的 FBW、WGR、SGR 和 FCR 均显著低于冰鲜杂鱼。这些研究证明配合饲料在一定程度上可以替代冰鲜杂鱼。

饲料对肌肉营养成分及品质的影响最为显著。在乌鳢^[17]和大口黑鲈^[18]中,配合饲料组肌肉总氨基酸、必需氨基酸和蛋白质水平显著高于冰鲜杂鱼组。对大黄鱼(*Larimichthys crocea*)^[19]和大口黑鲈^[8]的研究发现,配合饲料能改善两种鱼的体形肤色、口感和肌肉品质。此外,有研究报道^[18],大口黑鲈摄食配合饲料后肌肉中的 n-3 多不饱和脂肪酸(PUFA)较低,而饱和脂肪酸(SFA)和 n-6 PUFA 较高。然而,现有大量研究表明^[8,15,20-21],投喂配合饲料组肌肉中含有 n-3 PUFA、DHA 和 EPA 含量均显著高于冰鲜鱼组,且风味和口感也优于冰鲜杂鱼组。因此,配合饲料喂养的鱼类在营养价值和风味方面不仅能达到预期效果,还能在一定程度上超越以冰鲜杂鱼为食的鱼类。

目前,国内外对高体鲷的相关研究主要集中在

在胚胎发育^[22]、人工繁育技术^[23]、性别鉴定^[24-25]和饲料添加^[26-28]等方面。其中在饲料添加方面,Tohfuku 等^[27]报道,饲料中添加麦角硒因会通过降低高体鲷肌肉中的氧化还原电位(ORP)和活性氧(ROS)水平,从而能增强高体鲷肌肉的抗氧化活性。Kotzamanis 等^[28]研究表明,当赖氨酸添加量为配合饲料总量的 2.03%~2.11%时,高体鲷幼鱼具有最大增重和蛋白质效率。此外,笔者前期比较了配合饲料和冰鲜杂鱼投喂小规格高体鲷幼鱼对生长的影响,两组间生长性能结果无显著差异^[29]。综上所述,笔者明确了开发高体鲷专用配合饲料具有可行性。但目前关于配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲷肌肉营养价值、风味特性以及肌肉组织学等方面的比较研究尚未见报道。因此,本研究通过投喂大规格高体鲷幼鱼人工配合饲料和冰鲜杂鱼,分析对其生长、肌肉营养成分以及肝脏和肌肉中生长相关基因表达水平的影响,为高体鲷幼鱼高效配合饲料研发提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

本研究开发的人工配合饲料配方和营养成分参考团队之前的研究^[29](表 1)。高体鲷幼鱼配合饲料委托广东越群生物科技股份有限公司(揭阳)代加工,冰鲜杂鱼以冰冻的鲳鱼、玉筋鱼和沙丁鱼为主,取自福建省东山县本地市场。配合饲料与冰鲜杂鱼的营养成分、氨基酸及脂肪酸委托四川威尔检测技术股份有限公司(成都)进行检测(表 2 和表 3)。

1.2 实验用鱼饲养及管理

本研究使用的高体鲷幼鱼为南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)于 2022 年 5 月人工繁育的鱼苗。在福建省东山县富闽洋水产发展有限公司岐下村鱼排网箱(2 m×2 m×4 m)中进行养殖,养殖海域水温为(22.0±4) °C,溶解氧 5.9~8.7 mg/L,盐度 27.2~27.5, pH 8.0~8.2,氨氮低于 0.02 mg/L,亚硝酸盐低于 0.01 mg/L。实验前进行驯化:每天投喂 2 次,交替使用配合饲料和冰鲜杂鱼进行投喂。驯化完成的标志是高体鲷连续一周完全摄食

表 1 高体鲷幼鱼配合饲料组成
Tab. 1 Composition of formulated feed for *Seriola dumerili* juvenile

原料 ingredient	质量分数/% mass fraction	原料 ingredient	质量分数/% mass fraction
鱼粉 fish meal	45.00	多维 vitamin premix	0.40
面粉 flour	10.00	多矿 mineral premix	0.50
去皮豆粕 dehulled soybean meal	10.00	磷脂 soy lecithin	1.00
鸡肉粉 chicken meal	5.00	氯化胆碱 choline chloride	0.20
谷朊粉 wheat gluten	5.00	维生素 C 磷酸酯 vitamin C polyphosphate	0.10
全虾粉 whole shrimp meal	10.00	牛磺酸 taurine	0.10
发酵豆粕 fermented soybean meal	5.00	赖氨酸 lysine	0.10
豆油 soybean oil	3.00	蛋氨酸 methionine	0.10
鱼油 fish oil	3.00	总和 total	100.00
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.50		

注: 多维和多矿均由广东越群生物科技股份有限公司提供。

Note: vitamin premix and mineral premix are provided by Guangdong Yuequn Biotechnology Co., Ltd.

表 2 配合饲料与冰鲜杂鱼的营养成分和氨基酸组成(湿重)
Tab. 2 Nutritional components and amino acid composition of formulated feed and chilled trash fish (wet weight)

项目 item	配合饲料 formulated feed	冰鲜杂鱼 chilled trash fish	项目 item	配合饲料 formulated feed	冰鲜杂鱼 chilled trash fish
营养成分 nutrient			缬氨酸 Val	2.24	0.84
水分 moisture	5.9	71.4	蛋氨酸 Met	1.09	0.49
粗蛋白 crude protein	51.25	16.7	异亮氨酸 Ile	1.98	0.77
粗脂肪 crude lipid	13.2	7.8	亮氨酸 Leu	3.51	1.28
粗灰分 crude ash	16.7	3.1	酪氨酸 Tyr	1.65	0.61
氨基酸 amino acid			苯丙氨酸 Phe	2.09	0.66
天门冬氨酸 Asp	4.31	1.52	赖氨酸 Lys	3.43	1.36
苏氨酸 Thr	1.96	0.74	组氨酸 His	1.41	0.67
丝氨酸 Ser	1.95	0.71	精氨酸 Arg	2.76	1.00
谷氨酸 Glu	7.94	2.38	脯氨酸 Pro	2.42	0.68
甘氨酸 Gly	2.70	1.09	必需氨基酸总量 Σ EAA	21.03	7.92
丙氨酸 Ala	2.69	1.04	非必需氨基酸总量 Σ NEAA	23.66	8.03
胱氨酸 Cys	0.56	0.11	氨基酸总量 Σ TAA	44.69	15.95

配合饲料, 水面无残留饲料。驯化结束后, 挑选 180 尾大小规格相近[(274.93±11.17) g]的高体鲷幼鱼, 随机分为两组, 每组设置 3 个平行, 每个平行网箱放 30 尾鱼。两组分别饱食投喂配合饲料和冰鲜杂鱼, 投喂量根据天气、水温及鱼类的摄食情况而定, 每天记录各网箱鱼的投喂量以及健康和死亡情况, 养殖实验为期 60 d。

1.3 样品采集

养殖实验结束后, 高体鲷幼鱼禁食 24 h, 记录每个平行网箱中鱼的数量和体重, 计算存活率

和增重率。从配合饲料组和冰鲜杂鱼组中随机各抽取 3 尾鱼, 用于全鱼营养成分的测定。采用 100 mg/L 的 MS-222 进行麻醉后, 每组各随机抽取 9 尾鱼用于测量计算体长、体重、肥满度、脏体比及肝体比等生长指标; 随后剖取肝脏和肌肉组织置于动物组织 RNA 稳定保护液(RNA later™)中, 4 °C 过夜后, 迅速将样本存放在-80 °C 超低温冰箱中, 用于生长相关基因表达水平的测定。另外, 取两份肌肉组织样本, 一份放置于 Bouin's 液中进行固定, 用于组织学形态观察; 另一份液

表 3 配合饲料与冰鲜杂鱼的脂肪酸组成及含量(湿重)
Tab. 3 Fatty acid composition and content of formulated feed and chilled trash fish (wet weight)

			g/100 g		
脂肪酸 fatty acid	配合饲料 formulated feed	冰鲜杂鱼 chilled trash fish	脂肪酸 fatty acid	配合饲料 formulated feed	冰鲜杂鱼 chilled trash fish
C14 : 0 (肉豆蔻酸)	0.384	0.216	C22 : 1n9 (二十二碳一烯酸(芥酸))	0.0315	0.0264
C15 : 0 (十五碳酸)	0.0484	0.0618	C20 : 3n3 (顺-11,14,17-二十碳三烯酸)	0.0107	0.0071
C15 : 1n5 (顺-10-十五碳一烯酸)	0.0077	0.0108	C20 : 4n6 (花生四烯酸)	0.121	0.143
C16 : 0 (棕榈酸)	2.13	1.16	C23 : 0 (二十三碳酸)	0.0112	0.0079
C16 : 1n7 (棕榈油酸)	0.422	0.225	C24 : 0 (二十四碳酸)	0.0359	0.0186
C17 : 0 (珠光脂酸)	0.132	0.0935	C20 : 5n3 (二十碳五烯酸(EPA))	0.91	0.43
C17 : 1n7 (顺-10-十七碳一烯酸)	0.0715	0.00	C22 : 6n3 (二十二碳六烯酸(DHA))	1.19	1.13
C18 : 0 (硬脂酸)	0.585	0.4	饱和脂肪酸 SFA	3.39	2.04
C18 : 1n9c (油酸)	1.9	0.684	单不饱和脂肪酸 MUFA	2.58	1.05
C18 : 2n6c (亚油酸)	2.68	0.0862	多不饱和脂肪酸 PUFA	5.31	1.87
C20 : 0 (花生酸)	0.0552	0.0741	EPA+DHA	2.10	1.56
C18 : 3n6 (γ -亚麻酸)	0.0156	0.0099	n-3 PUFA	2.45	1.60
C20 : 1 (顺-11-二十碳一烯酸)	0.149	0.103	n-6 PUFA	2.82	0.24
C18 : 3n3 (α -亚麻酸)	0.346	0.0397	MUFA+PUFA	7.89	2.92
C21 : 0 (二十一碳酸)	0.0061	0.0119	PUFA/SFA	2.33	1.43
C20 : 2 (顺-11,14-二十碳二烯酸)	0.0225	0.0156	总脂肪酸	11.28	4.97
C20 : 3n6 (顺-8,11,14-二十碳三烯酸)	0.0136	0.0116			

氮速冻,用于常规营养成分、氨基酸和脂肪酸含量的测定。

1.4 生长参数相关计算

增重率(weight growth rate, WGR, %)=($W_d - W_0$)/ $W_0 \times 100$;

特定生长率(specific growth rate, SGR, %/d)=($\ln W_d - \ln W_0$)/ $d \times 100$;

成活率(survival rate, SR, %)= $N_d/N_0 \times 100$;

肥满度(condition factor, CF, g/cm^3)= $W_d/L^3 \times 100$

脏体比(viscerosomatic index, VSI, %)= $W_v/W \times 100$

肝体比(hepatosomatic index, HSI, %)= $W_h/W \times 100$

式中, d 为饲养天数; N_0 为初始尾数(尾); N_d 为终末尾数(尾); W_d 为终末均重(g); W_0 为初始均重(g); W_v 为内脏重(g); W_h 为肝脏重(g); W 为体重(g); L 为体长(cm)。

1.5 总 RNA 的提取、cDNA 的合成及实时荧光定量 PCR (qPCR)检测

根据 TRIzol 试剂盒(Invitrogen, 15596108, 美

国)的说明书提取肝脏和肌肉组织的总 RNA。取 1 μ L 提取的总 RNA 用 1.5%琼脂糖凝胶电泳检测其质量;另取 1 μ L 总 RNA 用 2000 超微量核酸蛋白测定仪(Thermo Scientific, 美国)检测其浓度和质量。将质量检测合格的 RNA 各取 1 μ g, 按照 PrimeScriptTM RT reagent Kit with gDNA Eraser (Perfect Real Time)试剂盒(TaKaRa, RR047A, 日本)的说明书合成 cDNA, 并于 -20 $^{\circ}$ C 下保存备用。

采用 qPCR 检测高体鲮肝脏和肌肉中生长相关基因的表达水平。反应在 Roche light Cycler 96 实时荧光定量 PCR 仪(Roche, 瑞士)上进行。qPCR 参照 SYBR Green Real Time PCR Master Mix (TOYOBO, QPK-201, 日本)试剂盒的说明书进行, 反应体系为: SYBR Green Real Time PCR Master Mix 10 μ L, 上下游引物各 0.5 μ L, cDNA 模板 1 μ L, 用无酶水补齐至 20 μ L。反应程序为: 预变性 95 $^{\circ}$ C 60 s; 95 $^{\circ}$ C 30 s, 60 $^{\circ}$ C 20 s, 72 $^{\circ}$ C 20 s, 40 个循环; 溶解曲线: 95 $^{\circ}$ C 10 s, 65 $^{\circ}$ C 60 s, 97 $^{\circ}$ C 1 s; 冷却: 37 $^{\circ}$ C 30 s。以 β -actin 为内参基因^[29], 本研究所使用引物序列见表 4。运用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$

表 4 qRT-PCR 引物序列
Tab. 4 Primer sequences for qRT-PCR

目的基因 target gene	引物 primer	序列 sequence	登录号 accession number
<i>β-actin</i>	F	TGATGAAGCCCAGAGCAAGAG	XM_022757055.1
	R	CGTTGTAGAAGGTGTGATGCCA	
<i>MyoG</i>	F	CTGAGTGCTGCTGACTCTCC	XM_022745308.1
	R	ATGTCCACAGGAAAGGCCAC	
<i>MyoD1</i>	F	CATGACGGATTTCAACGGGC	XM_022764572.1
	R	CGGTCACCTTCAGACCACC	
<i>MyoD2</i>	F	TCAGCCGATGACCTCTACGA	XM_022748574.1
	R	GCCCTCACATGCTCATCCTT	
<i>Myf5</i>	F	TACTACGACAGAGCGTGTGC	XM_022749558.1
	R	GGTCGACGAAGCTGGACTTG	
<i>Myf6</i>	F	TGACCATTCCACTGCAGCAA	XM_022749482.1
	R	CAGTCTCTGACACGTCCCC	
<i>MSTN</i>	F	AGAAGCTCCGAACATCAGCC	XM_022740345.1
	R	TTGTCATCTCCCAGCACGTC	
<i>COL1A1A</i>	F	CTGGAGAGACCTGCGTAACC	XM_022747977.1
	R	AACTGGAAGCCGTCGTTCAT	
<i>COL1A1B</i>	F	GTATTGGAGCCCCGGTATG	XM_022742451.1
	R	CTTCTCACCTGAGCACCAG	
<i>COL1A2</i>	F	ACTGGTTCAGAAGCACCGAG	XM_022747000.1
	R	TGTTCTGGCTAGCCTGGTTG	
<i>IGF-1</i>	F	CTGTGTGTCCTCACCTGAC	XM_022749759.1
	R	TTCATCAACAATGCCGCGTG	
<i>IGF-2</i>	F	AACCGTGGGATCGTAGAGGA	XM_022754221.1
	R	TCCTGTTTTAGTGCGGGCAT	

注: *β-actin*: β -肌动蛋白; *MyoG*: 肌细胞生成素; *MyoD*: 肌源性分化因子; *Myf5*: 肌细胞因子 5; *Myf6* (也称 *Mrf4*): 肌细胞因子 6; *MSTN*: 肌肉生长抑制素; *COL1A1*: I 型胶原蛋白编码基因; *COL1A2*: I 型胶原蛋白 $\alpha 2$ 链; *IGF-1*: 胰岛素样生长因子 1; *IGF-2*: 胰岛素样生长因子 2.

Note: *β-actin*: β -actin beta; *MyoG*: myogenin; *MyoD*: myoblast determination protein; *Myf5*: myogenic factor 5; *Myf6* (or *Mrf4*): myogenic factor 6; *MSTN*: myostatin; *COL1A1*: Collagen type I alpha 1 chain; *COL1A2*: Collagen type I alpha 2 chain; *IGF-1*: insulin-like growth factor-1; *IGF-2*: insulin-like growth factor-2.

方法计算肝脏和肌肉中生长相关基因的相对表达水平。

1.6 肌肉肌纤维组织学特性的观察

将分离出的肌肉组织切小块, 置于超过其 15 倍体积的 Bouin's 液中固定过夜。委托赛维尔生物科技有限公司(武汉)制作肌肉组织石蜡切片。肌肉组织经 24 h 固定后, 再通过梯度酒精进行脱水、二甲苯透明、浸蜡包埋后、用石蜡切片机进行连续切片(厚度 5 μm), 经苏木精/伊红(HE)染色并使用中性树脂封片后, 使用正置荧光显微镜(尼康, 日本)进行观察拍照。于 10 \times 20 倍镜下捕捉成

像拍摄, 每组取 3 个平行视野, 每个视野选取 30 条肌纤维测其肌纤维横截面积。每根肌纤维测定其长轴和短轴, 多次测量求两者的平均值作为肌纤维直径(参考苏建等^[30]的方法)。利用 Image J 软件测出每个视野下的面积和视野内肌纤维的根数(20 倍镜), 将其换算成每平方毫米的根数, 作为样本的肌纤维密度。使用 Excel 2016 软件处理数据, 再使用 SPSS 16.0 对各参数进行显著性差异分析。

1.7 全鱼和肌肉常规营养成分、肌肉氨基酸和脂肪酸含量的测定及肌肉营养价值的评价

全鱼样本检测常规营养成分, 肌肉样本则包

括常规营养成分、水解氨基酸和脂肪酸。常规营养成分的测定均遵循国家标准, 水分采用 105 °C 烘干失水法(GB/T 6435-2014)测定; 粗灰分采用马弗炉 550 °C 灼烧质量法(GB/T 6438-2007)测定; 粗蛋白采用凯氏定氮法(GB/T 6432-2018)测定; 粗脂肪采用索氏抽提法(GB/T 6433-2006)测定; 粗纤维采用过滤法(GB/T 6434-2006)测定; 钙采用乙二胺四乙酸二钠络合滴定法(GB/T 6436-2018)测定; 总磷采用分光光度法(GB/T 6437-2018)测定; 水溶性氯化物根据(GB/T 6439-2007)描述的方法进行测定; 氨基酸依据(GB 5009.124-2016)测定; 脂肪酸采用气相色谱分析法(GB5009.168-2016)测定。

将肌肉样品中各种必需氨基酸的百分含量(%) 换算成每克氮中氨基酸的毫克量(mg/g N), 根据联合国粮农组织/世界卫生组织(FAO/WHO)建议的每克氮氨基酸评分标准模式和全鸡蛋蛋白的氨基酸模式进行比较, 蛋白质的氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)和必需氨基酸指数(EAAI)计算公式:

$$\text{AAS} = \frac{\text{待评蛋白质氨基酸含量(mg/g N)}}{\text{FAO 评分模式氨基酸含量(mg/g N)}}$$

$$\text{CS} = \frac{\text{待评蛋白质氨基酸含量(mg/g N)}}{\text{全鸡蛋蛋白质中同种氨基酸含量(mg/g N)}}$$

式中, 氨基酸含量是指每克氮中氨基酸的毫克量。

$$\text{EAAI} = \frac{\text{氨基酸含量(mg/g N)}}{\text{肌肉氨基酸百分含量} \times 6.25 \times 1000 / \text{肌肉蛋白质的百分含量}}$$

$$\text{EAAI} = \left[\frac{100A}{AE} \times \frac{100B}{BE} \times \frac{100C}{CE} \times \dots \times \frac{100H}{HE} \right]^{1/n}$$

式中, n 为比较的必需氨基酸个数, A, B, C, \dots, H 分别为样品中各必需氨基酸含量(mg/g N), AE, BE, CE, \dots, HE 分别为全鸡蛋蛋白质相对应的必需氨基酸含量(mg/g N)^[31]。

1.8 数据处理

原始数据经 Excel 2016 软件进行初步整理后, 采用 SPSS 16.0 统计分析软件处理, 实验数据均以平均值±标准误($\bar{x} \pm \text{SE}$)表示。采用独立样本 t 检验法比较两组之间的差异性。显著性水平设为 $P < 0.05$, 极显著水平设为 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲈幼鱼生长性能的影响

由表 5 可知, 相较于冰鲜杂鱼组, 投喂配合饲料的高体鲈幼鱼的 FBW、WGR 和 SGR 均极显著降低($P < 0.01$), 两组间 SR、CF、VSI 及 HSI 无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲈肝脏和肌肉中生长相关基因表达水平的影响

由图 1 可知, 在肝脏中, 与冰鲜杂鱼组相比, 配合饲料组 *IGF-2* 基因的表达量极显著降低($P < 0.01$), *IGF-1* 基因的表达量无显著变化($P > 0.05$)。

由图 2 可知, 肌肉中, 与冰鲜杂鱼组相比, 配合饲料组高体鲈幼鱼肌肉中 *MyoG*、*MyoD1*、*MyoD2*

表 5 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲈幼鱼生长性能的影响

Tab. 5 Effects of formulated feed and chilled trash fish on the growth performance of *Seriola dumerili* juvenile

生长性能 growth performance	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group
终末体重/g final body weight (FBW)	476.00±2.19	557.10±1.65**
终末体长/cm final body length (FBL)	26.94±0.09	28.77±0.13**
增重率/% weight gain rate (WGR)	73.14±0.79	102.64±0.60**
特定增长率/(%/d) specific growth rate (SGR)	0.92±0.01	1.18±0.01**
脏体指数/% viscerosomatic index (VSI)	6.04±0.25	5.93±0.20
肝体指数/% hepatosomatic index (HSI)	1.39±0.11	1.35±0.03
肥满度/(g/cm ³) condition factor (CF)	2.44±0.02	2.34±0.04
成活率/% survival rate (SR)	97.79	95.47

注: **表示两组间差异极度显著($P < 0.01$)。

Note: ** indicated that the difference between the two groups was extremely significant ($P < 0.01$).

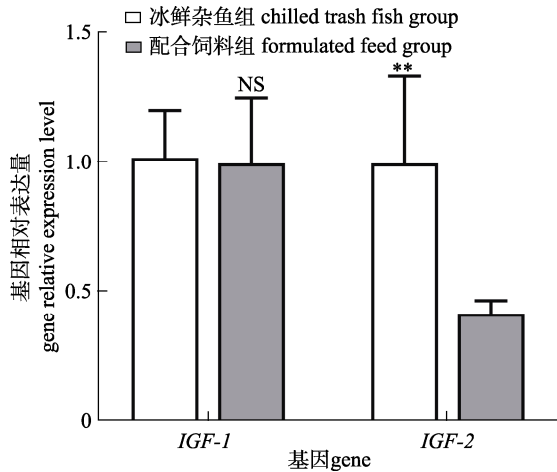


图 1 高体鲷幼鱼肝脏中生长相关基因的相对表达量
**表示两组间差异极度显著($P<0.01$), 标有 NS 者
表示两组间无显著性差异($P>0.05$).

Fig. 1 Relative expression levels of growth-related genes in the liver of *Seriola dumerili* juvenile
** indicated that the difference between the two groups was extremely significant ($P<0.01$), and NS indicated that there was no significant difference between the two groups ($P>0.05$).

和 *COL1A1A* 基因的表达量显著升高($P<0.05$), 而 *Myf6* 基因的表达量显著降低($P<0.05$); 两组间肌肉中 *COL1A1B*、*COL1A2*、*Myf5*、*MSTN* 基因的表达量无显著差异($P>0.05$).

2.3 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲷全鱼和肌肉营养成分的影响

由表 6 可知, 配合饲料组高体鲷全鱼粗蛋白、水溶性氯化物、钙、粗灰分和总磷含量均极显著

高于冰鲜杂鱼组($P<0.01$), 而粗脂肪含量极显著降低($P<0.01$); 两组间全鱼的水分和粗纤维含量无显著差异($P>0.05$).

配合饲料组高体鲷肌肉粗蛋白质和粗纤维含量显著高于冰鲜杂鱼组($P<0.05$), 两组间粗脂肪、水分、水溶性氯化物、钙、粗灰分和总磷含量均无显著差异($P>0.05$).

2.4 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲷幼鱼肌肉组织学影响分析

由图 3 可知, 相较于冰鲜杂鱼组, 配合饲料组肌纤维平均直径增大, 横截面积变大, 间隙减小。从表 7 具体数据统计结果可知, 配合饲料组肌纤维横截面积显著大于冰鲜杂鱼组($P<0.05$), 相应的, 肌纤维数量和肌纤维密度极显著低于冰鲜杂鱼组($P<0.01$)。肌纤维直径(20~70 μm)的比例比较中, 冰鲜杂鱼组极显著大于配合饲料($P<0.01$), 而在较大直径(>70 μm), 冰鲜杂鱼组显著低于配合饲料组($P<0.05$), 两组在较小直径(<20 μm)中无显著差异($P>0.05$).

2.5 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲷幼鱼肌肉氨基酸及脂肪酸影响

由表 8 可知, 高体鲷幼鱼肌肉中所含氨基酸种类齐全, 两组高体鲷幼鱼的肌肉均检测到 16 种氨基酸, 除组氨酸(His)外, 配合饲料组肌肉中 15 种氨基酸含量均极显著高于冰鲜杂鱼组($P<0.01$);

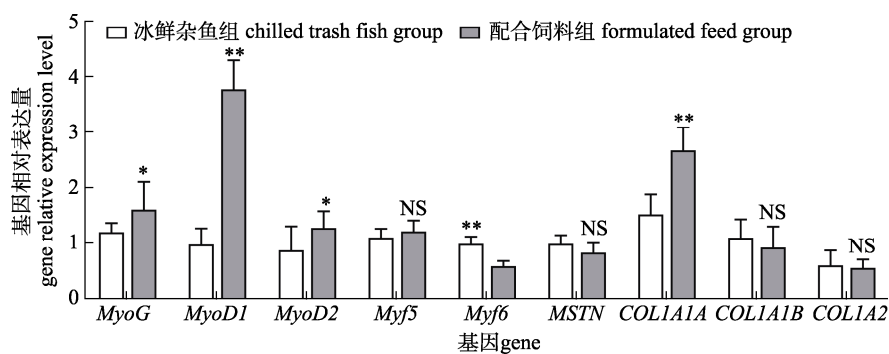


图 2 高体鲷幼鱼肌肉中肌调节因子、编码胶原蛋白和肌肉生长负调控因子编码基因的相对表达量
*表示两组间有显著性差异($P<0.05$), **表示两组间极显著差异($P<0.01$), NS 表示两组间无差异($P>0.05$).

Fig. 2 Relative expression levels of genes encoding muscle myogenic regulator factors, encoding collagen, and negative regulators of muscle growth in muscle of *Seriola dumerili* juvenile

* indicated that there was a significant difference between the two groups ($P<0.05$), ** indicated that there was extremely significant difference between groups ($P<0.01$), and NS indicated that there was no significant difference between the two groups ($P>0.05$).

表 6 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲷幼鱼全鱼及肌肉营养成分的影响(湿重)

Tab. 6 Effects of feeding formulated feed and chilled trash fish on whole-body and muscle nutrient composition of *Seriola dumerili* juvenile (wet weight)

营养成分 nutrient	全鱼 whole-body		肌肉 muscle	
	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group
	水分 moisture	71.32±0.17	70.70±0.18	73.80±0.11
粗蛋白质 crude protein	18.84±0.10**	17.75±0.14	21.94±0.09*	21.33±0.16
粗脂肪 crude lipid	4.63±0.04	6.57±0.37**	1.83±0.06	2.09±0.13
粗纤维 crude fiber	0.40±0.05	0.75±0.12	0.08±0.01*	0.03±0.01
粗灰分 crude ash	4.08±0.00**	3.50±0.02	1.72±0.01	1.74±0.02
钙 calcium	1.03±0.01**	0.89±0.01	0.05±0.01	0.05±0.00
总磷 total phosphorus	0.74±0.00**	0.65±0.01	0.30±0.00	0.29±0.00
水溶性氯化物 water soluble chloride	0.38±0.00**	0.33±0.01	0.12±0.00	0.12±0.00

注: *表示两组间有显著性差异($P<0.05$), **表示两组间差异极度显著($P<0.01$).

Note: * indicated that there was significant difference between the two groups ($P<0.05$), ** indicated that the difference between the two groups was extremely significant ($P<0.01$).

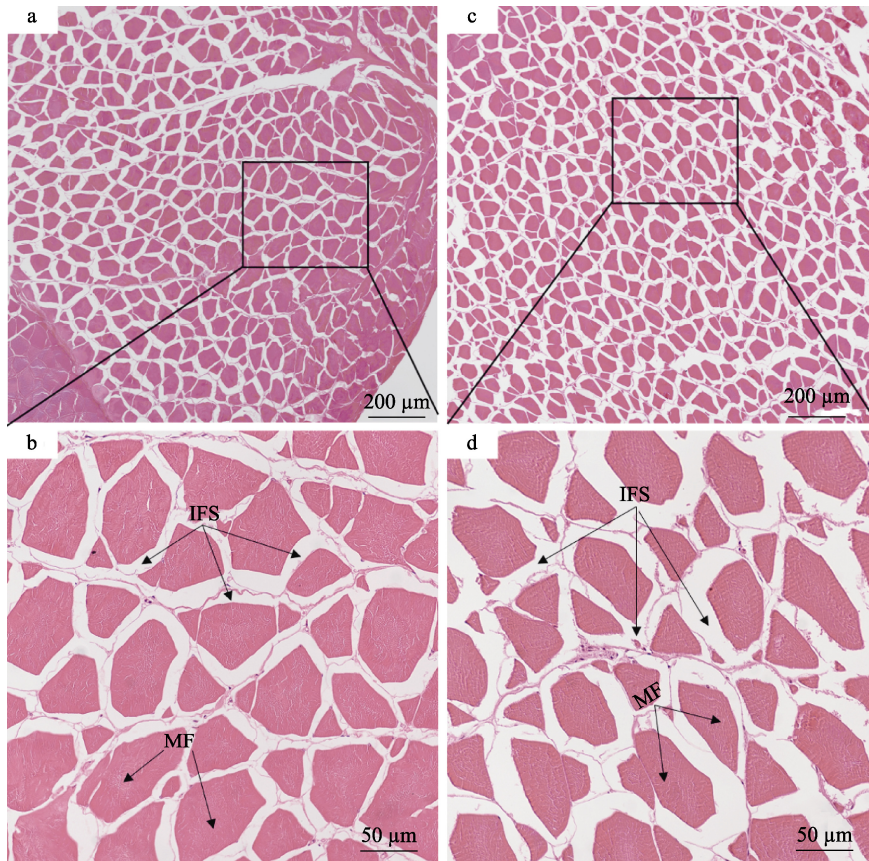


图 3 高体鲷幼鱼肌肉组织横截面

a、b 为配合饲料组在虚拟显微镜下, 放大倍数为 100 和 400 倍; c、d 为冰鲜鱼组在虚拟显微镜下, 放大倍数为 100 和 400 倍. MF: 肌纤维, IFS: 肌纤维间隙.

Fig. 3 Muscle tissue cross section of *Seriola dumerili* juvenile

a and b are the muscle morphology of the formulated feed group under the virtual microscope, with the magnification being 100 and 400 times; c and d are the muscle morphology of the chilled trash fish group under the virtual microscope, with the magnification being 100 and 400 times. MF: muscle fiber, IFS: interfibrillar space.

表 7 配合饲料和冰鲜杂鱼对高体鲷幼鱼肌纤维结构特性的影响

Tab. 7 Effects of formulated feed and chilled fish on muscle fiber structure characteristics of *Seriola dumerili* juvenile

肌纤维特性 muscle fiber characteristic	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group
平均肌纤维横截面积/(mm ² /个)average fiber cross-sectional area	0.004 3±0.00	0.002 9±0.00**
肌纤维数量/个 muscle fiber quantity	71.95±1.07	110.18±2.33**
肌纤维密度/(个/mm ²)muscle fiber density	143.9±2.14	220.37±4.66**
肌纤维直径百分比/%muscle fiber diameter		
	<20 μm	0.71±0.71
	20–70 μm	16.43±5.7*
	>70 μm	82.86±6.35
		3.33±1.67
		52.5±3.01**
		44.66±4.36**

注: **表示两组间差异极显著(P<0.01).

Note: ** indicates that the difference between the two groups is extremely significant (P<0.01).

表 8 高体鲷幼鱼肌肉氨基酸组成与含量(湿重)

Tab. 8 Composition and content of amino acids in muscle of *Seriola dumerili* juvenile (wet weight)

氨基酸 amino acid	配合饲料组 formulated feed group		冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group		氨基酸 amino acid	配合饲料组 formulated feed group		冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group		%	
	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group		配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group		
天冬氨酸 Asp ^{&}	2.10±0.01**	1.96±0.02	组氨酸 His [*]	0.65±0.00	0.64±0.01	苏氨酸 Thr [#]	0.97±0.00**	0.91±0.01	精氨酸 Arg [*]	1.32±0.02**	1.21±0.01
丝氨酸 Ser	0.86±0.00**	0.80±0.01	脯氨酸 Pro	0.69±0.02*	0.62±0.01	谷氨酸 Glu ^{&}	3.09±0.01**	2.90±0.02	蛋氨酸 Met [#]	0.67±0.01**	0.62±0.01
谷氨酸 Glu ^{&}	3.09±0.01**	2.90±0.02	∑EAA	8.04±0.04**	7.48±0.07	甘氨酸 Gly ^{&}	1.00±0.02**	0.88±0.01	∑NEAA	9.74±0.04**	9.02±0.08
丙氨酸 Ala ^{&}	1.22±0.01**	1.12±0.01	∑NEAA	9.74±0.04**	9.02±0.08	缬氨酸 Val [#]	1.00±0.01**	0.91±0.01	∑HEAA	1.98±0.02**	1.85±0.02
缬氨酸 Val [#]	1.00±0.01**	0.91±0.01	∑HEAA	1.98±0.02**	1.85±0.02	异亮氨酸 Ile [#]	0.93±0.01**	0.86±0.01	∑DAA	7.41±0.05**	6.87±0.05
异亮氨酸 Ile [#]	0.93±0.01**	0.86±0.01	∑DAA	7.41±0.05**	6.87±0.05	亮氨酸 Leu [#]	1.70±0.01**	1.58±0.02	∑TAA	19.76±0.10**	18.35±0.17
亮氨酸 Leu [#]	1.70±0.01**	1.58±0.02	∑TAA	19.76±0.10**	18.35±0.17	酪氨酸 Tyr	0.79±0.00**	0.74±0.01	∑EAA/∑TAA (%)	40.69	40.76
酪氨酸 Tyr	0.79±0.00**	0.74±0.01	∑EAA/∑TAA (%)	40.69	40.76	苯丙氨酸 Phe [#]	0.84±0.00**	0.78±0.01	∑EAA/∑NEAA (%)	82.55	82.93
苯丙氨酸 Phe [#]	0.84±0.00**	0.78±0.01	∑EAA/∑NEAA (%)	82.55	82.93	赖氨酸 Lys [#]	1.93±0.01**	1.82±0.02	∑DAA/∑TAA (%)	37.5	37.44
赖氨酸 Lys [#]	1.93±0.01**	1.82±0.02	∑DAA/∑TAA (%)	37.5	37.44						

注: #必需氨基酸; *半必需氨基酸; &呈味氨基酸; ∑EAA.必需氨基酸总量; ∑NEAA.非必需氨基酸总量; ∑HEAA.半必需氨基酸总量; ∑DAA 呈味氨基酸总量; ∑TAA 氨基酸总量; 本检测未检出胱氨酸、半胱氨酸和色氨酸. *表示两组间有显著性差异(P<0.05), **表示两组间差异极度显著(P<0.01), 无标注者表示两组间无显著性差异(P>0.05).

Note: #, essential amino acids (EAA); *, half-essential amino acids (HEAA); &, delicious amino acids (DAA); ∑EAA, total essential amino acids; ∑NEAA, total non-essential amino acids; ∑HEAA, total half-essential amino acids; ∑DAA, total delicious amino acids; ∑TAA, total amino acids. Cystine, cysteine and tryptophan were not detected in this test. * indicates significant difference between the two groups (P<0.05), ** indicates the difference between the two groups is extremely significant (P<0.01), and the unmarked indicates that there is no significant difference between the two groups (P>0.05).

同时, 配合饲料组肌肉的氨基酸总量(TAA)、必需氨基酸(EAA)和呈味氨基酸(DAA)含量也都极显著高于冰鲜鱼组(P<0.01)。由 EAAI、AAS 和 CS 分值可知(表 9), 配合饲料组肌肉必需氨基酸指数和评分均高于冰鲜杂鱼组, 且两组第一限制性氨基酸均为 Phe 和 Tyr, 第二限制性氨基酸均为 Met, 此外, 除以上两种限制性氨基酸和缬氨酸(Val)的 AAS 小于 1、CS 小于 0.7 外, 其他氨基酸 AAS 均大于 1, CS 均大于 0.7, 高于 FAO/WHO 评分标准。

由表 10 可知, 两组高体鲷幼鱼的肌肉样本中均含有 18 种脂肪酸。通过比较分析后, 发现两组肌肉中饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFA)和多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)总量无显著差异(P>0.05), 且最高的 PUFA 均为 DHA。其中配合饲料组中 n-6 PUFA 含量显著高于冰鲜杂鱼组(P<0.05), 而冰鲜杂鱼组 EPA、DHA 及 n-3 PUFA 含量极显著高于配合饲料组(P<0.01)。

表 9 高体鲷幼鱼肌肉必需氨基酸营养价值评价

Tab. 9 Assessment of essential amino acid nutritional value in the muscle tissue of *Seriola dumerili* juvenile

氨基酸 amino acid	FAO/WHO 标准/ (mg/g N) FAO/WHO standard	鸡蛋蛋白标准/ (mg/g N) egg protein standard	配合饲料组 formulated feed group			冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group		
			氨基酸含量/ (mg/g N) amino acid content	AAS	CS	氨基酸含量/ (mg/g N) amino acid content	AAS	CS
苏氨酸 Thr	250	292	277.26	1.11	0.95	265.18	1.06	0.91
缬氨酸 Val	310	411	285.24	0.92	0.69	267.52	0.86	0.65
蛋氨酸 Met ^{&}	220	386	192.00	0.87	0.50	182.75	0.83	0.47
异亮氨酸 Ile	250	331	264.36	1.06	0.80	251.20	1.00	0.76
亮氨酸 Leu	440	534	483.34	1.10	0.91	463.55	1.05	0.87
苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr [#]	380	565	237.86	0.63	0.42	228.64	0.60	0.40
赖氨酸 Lys	340	441	549.99	1.62	1.25	532.50	1.57	1.21
必需氨基酸指数 EAAI			74.25			70.9		

注: #表示第一限制性氨基酸, &表示第二限制性氨基酸。

Note: # represents the first limiting amino acid, & represents the second limiting amino acid.

表 10 高体鲷幼鱼肌肉脂肪酸组成与含量(湿重)

Tab. 10 Composition and content of fatty acids in muscle of *Seriola dumerili* juvenile (wet weight)

脂肪酸 fatty acid	g/100g	
	配合饲料组 formulated feed group	冰鲜杂鱼组 chilled trash fish group
C14 : 0 (肉豆蔻酸)	0.025±0.001	0.027±0.000
C16 : 0 (棕榈酸)	0.143±0.005	0.134±0.000
C16 : 1n7 (棕榈油酸)	0.031±0.001*	0.025±0.000
C17 : 0 (珠光脂酸)	0.007±0.000	0.007±0.000
C18 : 0 (硬脂酸)	0.063±0.002*	0.046±0.000
C18 : 1n9c (油酸)	0.127±0.004**	0.082±0.001
C18 : 2n6c (亚油酸)	0.132±0.004**	0.028±0.001
C20 : 1 (顺-11-二十碳一烯酸)	0.009±0.000	0.014±0.001**
C18 : 3n3 (α-亚麻酸)	0.011±0.001**	0.007±0.000
C20 : 4n6 (花生四烯酸)(ARA)	0.010±0.000*	0.009±0.000
C20 : 5n3 (二十碳五烯酸)(EPA)	0.048±0.001	0.064±0.001**
C24 : 1n9 (顺-15-二十四碳一烯酸)	0.006±0.000	0.008±0.000**
C22 : 6n3 (二十二碳六烯酸)(DHA)	0.134±0.003	0.224±0.003**
饱和脂肪酸 SFA	0.238±0.009	0.214±0.001
单不饱和脂肪酸 MUFA	0.173±0.006**	0.128±0.001
多不饱和脂肪酸 PUFA	0.334±0.01	0.332±0.004
EPA + DHA	0.181±0.005	0.288±0.004**
n-3 PUFA	0.192±0.005	0.295±0.004**
n-6 PUFA	0.141±0.005**	0.037±0.001
n-3/n-6	1.359±0.01	7.970±0.130**
MUFA+PUFA	0.507±0.016*	0.459±0.005
PUFA/SFA	1.404±0.009	1.551±0.014**
总脂肪酸	0.744±0.024	0.673±0.005

注: *表示两组间有显著性差异($P<0.05$), **表示两组间差异极显著($P<0.01$), 无标注者表示两组间无显著性差异($P>0.05$)。

Note: * indicates significant difference between the two groups ($P<0.05$), ** indicates difference between the two groups is extremely significant ($P<0.01$), and the unmarked indicates no significant difference between the two groups ($P>0.05$).

3 讨论

3.1 生长性能

饲料是影响鱼类生长的最重要因素, 其配方和质量对鱼类影响显著^[8]。在本研究中, 配合饲料组的高体鲷 FBW、WGR 和 SGR 显著低于冰鲜杂鱼组, 其中 FBW 达到冰鲜杂鱼组的 85.4%, 这与大口黑鲈^[12]、斜带石斑鱼^[13]、珍珠龙胆石斑鱼^[32]和大菱鲆^[14]等研究结果一致。可能以冰鲜杂鱼作为肉食鱼类高体鲷的天然饵料, 其蛋白质是完全动物蛋白, 适口性和诱食性均较强^[32], 而高体鲷对配合饲料的营养特性适应度略差一些, 这提示后续要优化配合饲料的适口性。此外, 在驼背鲈^[7]、珍珠龙胆石斑鱼^[11]和尖吻鲈^[9]的研究中, 配合饲料组的生长性能可以达到或超过冰鲜杂鱼饲料水平, 这与本研究结果不一致, 原因可能与鱼类大小和品种不同有关。本实验中配合饲料组高体鲷幼鱼存活率(SR)和肥满度(CF)在数值上高于冰鲜杂鱼组, 这与黄姑鱼^[10]和珍珠龙胆石斑鱼^[11]研究结果一致, 这表明配合饲料的安全性更高, 能在营养储备和健康状况上表现更佳。高体鲷作为国内新兴深远海鱼类, 具有极高研究及商业价值, 其专用配方饲料是未来集约化深远海养殖的趋势。尽管本研究显示, 使用配合饲料饲喂高体鲷后, 其生长指标略有下降, 但这为后续饲料研发奠定了理论基础, 有助于进一步优化饲料配方。

3.2 营养成分及组织学分析

鱼的营养价值主要由蛋白质和脂肪含量所决定^[33]。鱼类的营养成分与其饲料的营养结构密切相关,通常鱼体蛋白质含量与饲料蛋白质水平呈正相关,但会受到蛋白质利用率的影响。冰鲜杂鱼营养不均衡且水分含量高。在干物质基础上,冰鲜杂鱼蛋白质水平通常要高于配合饲料。在大口黑鲈^[18]、鳊(*Siniperca chuatsi*)^[34]和黄姑鱼^[10]等鱼类中,研究发现冰鲜杂鱼的蛋白质水平(以干物质计)均高于人工配合饲料,但两组间肌肉蛋白质含量并无显著差异。与之相似,高体鳊配合饲料的蛋白质水平低于冰鲜杂鱼,但全鱼和肌肉的粗蛋白含量均显著高于冰鲜杂鱼组。由此推测,配合饲料组高体鳊蛋白质含量的增加量主要体现在其肌肉蛋白含量的增长。此外,从利用率来看,该配合饲料可更大程度上提高高体鳊对蛋白质利用能力,并能减少海洋渔业资源的浪费,表明本研究配合饲料蛋白质水平配比较为合理。脂肪为鱼类生长提供所需能量、必需脂肪酸及调节代谢等作用^[35]。对黄姑鱼^[36]、白甲鱼(*Onychostoma simus*)^[35]和珍珠龙胆石斑鱼^[37]等鱼类的研究表明,在一定范围内,鱼体脂肪含量与饲料脂肪水平呈线性关系。本研究中,配合饲料脂肪水平(14.03%)显著低于冰鲜杂鱼(27.27%)。相应的,配合饲料组全鱼粗脂肪含量显著降低,比冰鲜杂鱼组减少了 30%,这与上述线性关系结论相一致。造成此结果的原因可能是多余的脂肪储存在了腹部^[38]。另一方面,配合饲料的脂肪水平较冰鲜杂鱼的脂肪水平更为合理,饲喂高脂肪冰鲜杂鱼则造成了高体鳊体内脂肪的大量堆积。此外,过量的脂肪水平还会增加鱼类疾病风险以及资源浪费。总体来说,高体鳊的肌肉被用于制作“高档刺身”,因此肌肉的营养价值就尤为重要。本研究结果能表明由配合饲料饲喂的高体鳊,其肌肉蛋白质和脂肪营养与冰鲜杂鱼相当。因此,本研究配合饲料可作为替代冰鲜杂鱼的选择。

鱼肌纤维代表肌肉发育,与肉质相关,其中肌纤维直径、密度和横截面积是评价肌肉质构特性的决定因素^[39]。研究表明,肌肉硬度、黏附性、弹性、咀嚼性和胶着性与纤维密度呈正相关,而

与纤维直径和横截面积呈负相关,同时肌纤维密度具有先增生后肥大的特点^[40]。此外,肌肉的嫩度与硬度成反比关系,因此,肌纤维密度低且横截面积大的肌肉嫩度越高^[41]。不同的鱼种和饲料配方对鱼类肉质影响不同。陈剑斌等^[42]和牛树辉等^[34]研究发现,鳊摄食人工配合饲料后,其肌肉硬度增加。邵俊杰等^[43]报道,使用配合饲料饲喂大口黑鲈后,其肌纤维密度和肌肉硬度低于冰鲜杂鱼组。在本研究中,相较于冰鲜杂鱼组,配合饲料组肌纤维密度和间隙均显著减小,肌纤维直径($>70\ \mu\text{m}$)和横截面积均显著升高,这说明在本实验条件下配合饲料能加速肌纤维向生长肥大的阶段过渡,从而横截面积增大。配合饲料组肌纤维密度低且横截面积增大的特点,在一定范围内使高体鳊肉质口感和嫩度更好。

3.3 肌肉氨基酸组成及营养价值评价

肌肉中氨基酸含量和组成是衡量蛋白质品质的关键,尤指人体所需的必需氨基酸和呈味氨基酸^[44]。动物蛋白质的风味主要取决于呈味氨基酸的组成与含量,其中 Glu 和 Asp 为呈鲜味氨基酸, Gly 和 Ala 为呈甘味氨基酸^[45]。在本实验配合饲料组肌肉 16 种氨基酸中, Glu 含量最高, Asp 次之,并且这两种氨基酸和必需氨基酸含量均显著高于冰鲜杂鱼组,这可能是因为配合饲料氨基酸水平高。此外,配合饲料组呈味氨基酸(7.41%)的总含量显著高于冰鲜杂鱼组(6.87%),且 $\sum\text{DAA}/\sum\text{TAA}$ 的比值也较高。这说明配合饲料饲喂的高体鳊肌肉鲜甜程度优于冰鲜杂鱼,风味效果更好,这与大口黑鲈^[46]和珍珠龙胆石斑鱼^[37]研究结果一致。FAO/WHO 标准要求高质量蛋白质的 EAA/TAA 比例约为 40%, EAA/NEAA 比例应高于 60%^[47]。本研究中,两组肌肉中 EAA/TAA 的比值(40.69%~40.76%)和 EAA/NEAA 比值(82.55%~82.93%)均符合理想蛋白质模式要求,且两组 EAA/TAA 无显著差异。以上结果表明,配合饲料饲喂出的高体鳊肌肉蛋白质水平与冰鲜杂鱼相当,同是优质动物蛋白质。EAAI 是评价蛋白质质量的指标,其值越大代表氨基酸组成更平衡,蛋白质质量越高^[48]。本研究中,与冰鲜杂鱼组 EAAI 值(70.9)相比,配合饲料组更高(74.25),能说明配合饲料饲喂出的

高体鲈肌肉,其氨基酸组成较合理平衡,蛋白质品质更佳。

赖氨酸(Lys)是谷物类第一限制性氨基酸,具有促进人体蛋白质利用及增强免疫力的功能,对人类重要^[49]。在本实验中,两组 Lys 含量高,且配合饲料组 Lys 水平(1.93%)高于冰鲜杂鱼组(1.82%),这归因于配合饲料中添加 Lys 的作用。因此,食用饲以配合饲料的高体鲈肌肉,可以更好的补充以谷物为主食的人群中 Lys 不足问题,对人体有益。根据 AAS 和 CS 分值,两组高体鲈肌肉中第一限制性氨基酸皆为苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr),第二限制性氨基酸均为蛋氨酸(Met)。而在鳊^[34]和大口黑鲈^[50]中,以冰鲜鱼和配合饲料投喂后,其肌肉中第一限制性氨基酸均为蛋氨酸和半胱氨酸(Met+Cys)。这可能与本配合饲料添加 1% Met 的影响有关。这一结果表明后续高体鲈配合饲料中可能需适当补充 Phe+Tyr 及 Met,以满足高体鲈对氨基酸的需求。同时,此结果为后续高体鲈饲料配方的优化提供参考依据。从以上氨基酸角度来看,本研究配合饲料配方通过实现氨基酸的均衡配比,使高体鲈肌肉的蛋白质营养价值更高,并能提升风味的鲜甜程度。

3.4 肌肉脂肪酸组成分析

饲料的脂肪种类及水平能直接影响养殖鱼类肌肉脂肪酸组成^[51]。研究表明,食物来源主要影响鱼类肌肉的不饱和脂肪酸(UFA)^[21],和本研究中的两组 SFA 无显著差异,UFA 有显著差异的结果一致。PUFA 在人体内功能多样,如改善血液循环和调节脂质代谢的功能,WHO 建议的 PUFA/SFA 适宜比例是 0.40^[52],本研究中,配合饲料和冰鲜鱼组的 PUFA/SFA 比例分别为 1.40 和 1.55,两组均高于推荐值,表明两组高体鲈都有高食用价值,但冰鲜鱼组 PUFA 所占比例更高。n-3 和 n-6 PUFA 参与促进生长、脂质代谢和抗炎等生理过程,但两者代谢途径相似存在代谢竞争,n-3 PUFA 的增加会导致 n-6 PUFA 的合成减少,因此 n-3 PUFA 可以部分抵消 n-6 PUFA 的不良影响^[53]。根据 WHO 推荐,食物中 n-3/n-6 大于 1 对人体健康有益^[54],两组 n-3/n-6 (1.36~7.97)均远大于该参考

值,但配合饲料组(1.36)比值显著低于冰鲜杂鱼组(7.97)。DHA 和 EPA 是 n-3 PUFA 的重要类型,具有促进脑部发育、增强免疫力和抗炎等功能^[34]。本研究中配合饲料组 EPA+DHA 占比为 24.36%,显著低于冰鲜杂鱼组的 42.77%,这反映出配合饲料的不足之处。综上所述,可能与本研究饲料中添加过量豆油有关。研究表明,当大量地使用植物油时,会引起鱼肉显著地积累 n-6 PUFA 和减少 n-3 PUFA 含量^[55-56]。此外,Turchini 等^[57]研究表明,饲料中添加植物性豆油会造成亚油酸(C18:2n)在鱼肌肉中快速沉积,导致全鱼亚油酸含量随着豆油水平增加而升高,鱼体会出现 n-6 PUFA 升高而 n-3 PUFA 含量下降的特点。同时,何凌云^[58]的研究则直接表明,斜带石斑鱼肌肉中亚油酸含量与豆油替代水平呈显著正相关,而肌肉中 EPA 和 DHA 含量与豆油替代水平呈显著负相关。本研究中出现相似结果,配合饲料肌肉脂肪酸中亚油酸含量比冰鲜鱼组提高了 371.46%,这提示豆油添加量多;而 DHA 和 EPA 降低了 33.33%和 67.16%,说明配合饲料中鱼油添加量偏少,导致肌肉亚油酸积多而 n-3 PUFA 降低。本实验结果表明目前豆油:鱼油=1:1 达不到高体鲈最适生长性能的比例,这提示后续需要调整饲料配方中豆油与鱼油的比例。此外,配合饲料中豆油添加量偏多的结果可能也是造成高体鲈生长性能偏低冰鲜杂鱼的原因之一,但此猜想需进一步验证。

3.5 肝脏及肌肉中生长相关基因表达水平

生肌调节因子(myogenic regulatory factors, MRFs)家族中包括 *MyoD*、*MyoG*、*Myf5* 和 *Myf6* (或者 *MRF4*), *MyoD* 和 *Myf5* 在肌肉发育初期调控着成肌细胞的增殖,*MyoG* 和 *Myf6* 共同负责后期成肌细胞的分化和融合^[59]。研究证明,饲料营养水平对 MRFs 的表达具有调控作用。珍珠龙胆石斑鱼中,鱼粉被 6%酶解鸡肉粉替代后,*MyHC* 和 *Myf5* 基因在肌肉中的表达水平显著提高,加快了肌肉细胞的分化^[60]。黄鳢(*Monopterus albus*)中,高水平的大豆浓缩蛋白替代鱼粉后,降低了 *MyoD* 和 *MyoG* 的表达丰度,但是对 *Myf5* 的表达影响不显著^[61]。肌肉生长抑制素(MSTN)是肌肉发

育和生长的抑制因子,与 *MyoD* 功能相反^[62]。在本实验中,投喂配合饲料后,肌肉中 *MyoD1*、*MyoD2* 和 *MyoG* 的表达量显著提高,而 *MSTN* 的表达量并无显著变化,表明本配合饲料的营养水平利于肌细胞的生长,这与前文配合饲料组肌肉蛋白质水平更高及肌纤维横截面积增大的结果一致。所有脊椎动物的生长主要由生长激素(GH)和胰岛素样生长因子(IGF)轴的协调作用调控,IGF 主要由肝细胞合成和分泌,对鱼类生长影响显著,目前常使用 IGF 作为分析生长反应的生物标志物^[63]。饲料中 n-3/n-6 脂肪酸比值大小对鱼虾的生长影响显著,对黄河鲤(*Cyprinus carpio*)^[64]和日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)^[65]的研究发现,在一定范围内,饲料中 n-3/n-6 比值升高不仅能提高鱼虾的增重率和特定生长率,肌肉组织中 IGF 生长相关基因也受到同样的影响。本实验中,配合饲料组 IGF-2 的表达水平显著降低,这应该与前文已经介绍的配合饲料 n-3/n-6 水平偏低有关,n-3 PUFA 偏低导致生长效果及相关生长基因下降。I 型胶原蛋白是肌肉胶原蛋白的成分,其 $\alpha 1$ 和 $\alpha 2$ 蛋白肽链由 *COL1A1* 和 *COL1A2* 基因编码,具有维持组织结构稳定性的功能,其中肌肉的硬度随着胶原蛋白含量的增加而变硬^[40]。在本实验中,投喂配合饲料后高体鰺幼鱼肌肉中 *COL1A1A* 的相对表达量显著升高,促进了胶原蛋白基因的表达,理论上会提升肉质的硬度,但这与本研究中肌肉组织学中肌纤维直径和横截面积增大的结果不一致,这可能因为该基因未进一步翻译。本研究结果表明,与冰鲜杂鱼相比,配合饲料能促进肌肉生长调控因子和胶原蛋白基因的显著表达,加快肌细胞的生长和肥大。

4 结论

本实验中,与冰鲜杂鱼相比,配合饲料显著提高高体鰺幼鱼肌肉蛋白质价值、氨基酸水平及改善肉质风味,且促进肌肉生长正调控因子及胶原蛋白基因的表达水平显著上调;但后续需要调整饲料配方中豆油与鱼油的比例和改善配合饲料的适口性。因此,开发高体鰺幼鱼配合饲料具有

很大的优势,但其饲料配方仍需进一步优化完善。

参考文献:

- [1] Hossain M S, Koshio S, Ishikawa M, et al. Effects of dietary administration of inosine on growth, immune response, oxidative stress and gut morphology of juvenile amberjack, *Seriola dumerili*[J]. *Aquaculture*, 2017, 468(1): 534-544.
- [2] Sicuro B, Luzzana U. The state of *Seriola* spp. other than yellowtail (*S. quinqueradiata*) farming in the world[J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2016, 24(4): 314-325.
- [3] Liao Z Q. Culture technology of *Seriola dumerili* in net cage[J]. *China Fisheries*, 2003(12): 60-61. [廖志强. 高体鰺网箱养殖技术[J]. *中国水产*, 2003(12): 60-61.]
- [4] Matallanas J, Casadevall M, Carrasson M, et al. The food of *Seriola dumerili* (Pisces: Carangidae) in the Catalan Sea (Western Mediterranean)[J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1995, 75(1): 257-260.
- [5] Kim J H, Gomez D K, Choresca C H, et al. Detection of major bacterial and viral pathogens in trash fish used to feed cultured flounder in Korea[J]. *Aquaculture*, 2007, 272(1-4): 105-110.
- [6] Liu L J, Peng K. Research progress on substitution of iced trash fish with aquatic compound feed[J]. *Feed Research*, 2021, 44(21): 141-144. [刘丽杰, 彭凯. 水产配合饲料替代冰鲜杂鱼的研究进展[J]. *饲料研究*, 2021, 44(21): 141-144.]
- [7] Shapawi R, Mustafa S, Ng W K. A comparison of the growth performance and body composition of the humpback grouper, *Cromileptes altivelis* fed on farm-made feeds, commercial feeds or trash fish[J]. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 2011, 6(5): 523-534.
- [8] Xu X Y, Yang H, Xu Z, et al. The comparison of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed trash fish and formula feeds: Growth, flesh quality and metabolomics[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 966248.
- [9] Bunlipatanon P, Songseechan N, Kongkeo H, et al. Comparative efficacy of trash fish versus compounded commercial feeds in cage aquaculture of Asian seabass (*Lates calcarifer*) (Bloch) and tiger grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*) (Forsskål)[J]. *Aquaculture Research*, 2014, 45(3): 373-388.
- [10] Zeng Y Q, Wang L G, Xu D D, et al. Effect of compound feed and chilled trash fish on growth performance, feed utilization, growth-related gene expression and cultured water quality of *Nibea albiflora*[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2022, 41(4): 299-307, 314. [曾延清, 王立改, 徐冬冬, 等. 投喂配合饲料和冰鲜

- 杂鱼对黄姑鱼生长性能、饲料利用、生长相关基因表达和养殖水质的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 299-307, 314.]
- [11] Ye G L, Dong X H, Yang Q H, et al. A formulated diet improved digestive capacity, immune function and intestinal microbiota structure of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) when compared with chilled trash fish[J]. *Aquaculture*, 2020, 523: 735230.
- [12] Mou M M, Jiang Y, Luo Q, et al. Effects of formulated diet and fresh frozen *Hypophthalmichthys molitrix* on growth, plasma biochemical index and antioxidant ability and histology of *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(9): 1408-1416. [牟明明, 蒋余, 罗强, 等. 配合饲料和冰鲜鲢对大口黑鲈生长、血浆生化指标、抗氧化能力和组织学的影响[J]. 水产学报, 2018, 42(9): 1408-1416.]
- [13] Chen D H, Zheng L Y, Lin J B, et al. Effects of different feed and coarse fish on growth and immunity of grouper (*Epinephelus coioides*)[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 28(4): 309-314. [陈度煌, 郑乐云, 林建斌, 等. 不同饲料与小杂鱼对斜带石斑鱼生长和免疫力影响的研究[J]. 福建农业学报, 2013, 28(4): 309-314.]
- [14] Niu H X, Lei J L, Chang J, et al. Effects of fresh frozen trash fish and commercial feeds on growth, lipid metabolism and antioxidant function of turbot (*Scophthalmus maximus* L.)[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, 25(11): 2696-2704. [牛化欣, 雷霖霖, 常杰, 等. 冰鲜野杂鱼和商品饲料对大菱鲆生长、脂质代谢及抗氧化功能的影响[J]. 动物营养学报, 2013, 25(11): 2696-2704.]
- [15] Xu S D, Liu X B, Wang S Q, et al. Effects of different diets on growth performance and flesh protein and fatty acid composition in juvenile *Siganus canaliculatus*[J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(6): 529-535. [徐树德, 刘雪兵, 王树启, 等. 不同类型饲料对黄斑篮子鱼幼鱼生长及肌肉蛋白质和脂肪酸组成的影响[J]. 海洋渔业, 2014, 36(6): 529-535.]
- [16] Hou Y, Hou Y B, Yao L, et al. Effects of chilled trash fish and different carbohydrate levels in puffed feed on growth performance and glucose metabolism of snakehead[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2018, 44(2): 199-208. [侯涌, 侯艳彬, 姚垒, 等. 冰鲜鱼和膨化饲料中不同糖类水平对乌鳢生长性能及糖代谢的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(2): 199-208.]
- [17] Yuan J L, Guo J L, Liu M, et al. Comparison of growth performances and nutritional quality of muscle in snakehead *Channa argus* fed different diets at different stocking densities [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2017, 32(5): 534-543. [原居林, 郭建林, 刘梅, 等. 不同饲料类型和放养密度对乌鳢生长特性及营养品质的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(5): 534-543.]
- [18] Huang A X, Chen J M, Shen B Q, et al. Comparison analysis of body composition, body profile index and muscle nutritive value of largemouth bass fed with different diets[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(2): 42-45, 53. [黄爱霞, 陈建明, 沈斌乾, 等. 摄食不同饲料对大口黑鲈全鱼及肌肉营养组成的影响[J]. 科技通报, 2019, 35(2): 42-45, 53.]
- [19] Ma R, Meng Y Q, Zhang W B, et al. Comparative study on the organoleptic quality of wild and farmed large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(1): 260-274.
- [20] Plaietch P, Tamtin M, Chaikul S L, et al. Comparison on growth performance and meat quality of sea bass fed with trash fish and pellets[C]// *Proceedings of the 45th Kasetsart University Annual Conference. Kasetsart: Fisheries*, 2008: 156-166.
- [21] Zhou P P, Jin M, Wu W J, et al. Comparison of nutrient components of large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea* Richardson) cultured in different modes, fed different feeds and from different strains[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(4): 969-980. [周飘苹, 金敏, 吴文俊, 等. 不同养殖模式、投喂不同饵料及不同品系大黄鱼营养成分比较[J]. 动物营养学报, 2014, 26(4): 969-980.]
- [22] Chen C S, Huang J M, He H W, et al. Morphological studies of the embryos, larvae juvenile and young fish of *Seriola dumerili*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1998, 5(1): 25-29. [陈昌生, 黄佳鸣, 何华武, 等. 高体鲷胚胎及仔稚幼鱼的形态观察[J]. 中国水产科学, 1998, 5(1): 25-29.]
- [23] Zhu C H, Deng Q X, Huang Y, et al. A kind of oxytocin and artificial breeding method of *Seriola dumerili*: CN113925954A [P]. 2022-01-14. [朱春华, 邓秋霞, 黄洋, 等. 一种高体鲷的催产剂及人工繁育方法: CN113925954A[P]. 2022-01-14.]
- [24] Deng Q X, Zhao N, Ru X Y, et al. Sex-inclined piwi-interacting RNAs in serum exosomes for sex determination in the greater amberjack (*Seriola dumerili*)[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(4): 3438.
- [25] Papadaki M, Mandalakis M, Anastasiou T I, et al. Histological evaluation of sex differentiation and early sex identification in hatchery-produced greater amberjack (*Seriola dumerili*) reared in sea cages[J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2021, 47(6): 1777-1792.
- [26] Sarih S, Djellata A, Roo J, et al. Effects of increased protein, histidine and taurine dietary levels on egg quality of greater amberjack (*Seriola dumerili*, Risso, 1810)[J]. *Aquaculture*, 2019, 499: 72-79.

- [27] Tohfuku T, Ando H, Morishita N, et al. Dietary intake of selenoneine enhances antioxidant activity in the muscles of the amberjack *Seriola dumerili* grown in aquaculture[J]. Marine Biotechnology, 2021, 23(6): 847-853.
- [28] Kotzamanis Y, Fawole F J, Brezas A, et al. Dietary lysine requirement of greater amberjack juvenile (*Seriola dumerili*, Risso, 1810)[J]. Aquaculture Nutrition, 2021, 27(6): 2107-2118.
- [29] Yang T L, Huang Y, Ru X Y, et al. Effects of formula feed replacing chilled fish on growth and liver transcriptome of juvenile *Seriola dumerili*[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(5): 92-99. [杨桐林, 黄洋, 茹笑影, 等. 配合饲料替代冰鲜鱼对高体鲷幼鱼生长及肝脏转录组的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(5): 92-99.]
- [30] Su J, Luo Y, Jiao X L, et al. Effect of the ecological fish farming technique on the muscle quality of crucian carp (*Carassius auratus*)[J]. Journal of Aquaculture, 2017, 38(4): 22-25. [苏建, 罗煜, 焦晓磊, 等. 池塘生态养殖技术对鲫鱼肌肉品质的影响[J]. 水产养殖, 2017, 38(4): 22-25.]
- [31] Wang L N, Tian Y S, Tang J, et al. Analysis and quality evaluation of nutritional components in the muscle of *Epinephelus moara*, *E. lanceolatus* and hybrid “Yunlong grouper”[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(7): 1085-1093. [王林娜, 田永胜, 唐江, 等. 云纹石斑鱼、鞍带石斑鱼及杂交“云龙斑”肌肉营养成分分析及品质评价[J]. 水产学报, 2018, 42(7): 1085-1093.]
- [32] Cong L M, Wang W F, Gao C R, et al. Effects of compound diet and fresh frozen *Ammodytes personatus* on growth, antioxidant ability and lipid metabolism of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) juveniles[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(9): 1398-1407. [丛林梅, 王蔚芳, 高淳仁, 等. 配合饲料和冰鲜太平洋玉筋鱼对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长、抗氧化和脂质代谢的影响[J]. 水产学报, 2016, 40(9): 1398-1407.]
- [33] Godoy A C, Santos O O, Oxford J H, et al. Soybean oil for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in finishing diets: Economic, zootechnical and nutritional meat improvements [J]. Aquaculture, 2019, 512: 734324.
- [34] Niu S H, Li H Y, Pan H J, et al. Effects of live prey fish and artificial diet on nutrient compositions and texture properties in the muscle of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(1): 37-44. [牛树辉, 李红燕, 潘厚军, 等. 鲜活饵料和人工配合饲料对鳊肌肉营养成分和质构特性的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(1): 37-44.]
- [35] Xiang X, Zhou X H, Chen J, et al. Effects of dietary lipid level on growth performance, body composition and serum biochemical indices of juvenile *Onychostoma sima*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2013, 25(8): 1805-1816. [向泉, 周兴华, 陈建, 等. 饲料脂肪水平对白甲鱼幼鱼生长性能、体组成和血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2013, 25(8): 1805-1816.]
- [36] Chen J M, Shen B Q, Jiang J H, et al. Comparative feeding trial *Nibeia japonica* with formulated feed or trash fish paste[J]. Feed Industry, 2014, 35(6): 24-26. [陈建明, 沈斌乾, 姜建湖, 等. 用人工配合饲料和鲜鱼浆养殖日本黄姑鱼对比试验[J]. 饲料工业, 2014, 35(6): 24-26.]
- [37] Ma L, Li M Z, Zheng Y K, et al. Effect of nutritional components in the muscle of *Epinephelus lanceolatus* ♂ × *Epinephelus fuscoguttatus* ♀ cultured by artificial compound feed and fresh frozen bait[J]. Feed Research, 2020, 43(5): 22-27. [马林, 李明泽, 郑艳坤, 等. 人工配合饲料与冰鲜饵料对珍珠龙胆石斑鱼肌肉营养成分的影响[J]. 饲料研究, 2020, 43(5): 22-27.]
- [38] Peng K, Xiao H F, Mo W Y, et al. Effects of replacing fish meal with black soldier fly larvae meal on growth performance, physical indexes, body composition and nutrient retention rates of *Micropterus salmoides*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(11): 6340-6348. [彭凯, 萧鸿发, 莫文艳, 等. 黑水虻幼虫粉替代鱼粉对加州鲈生长性能、形体指标、体成分及营养物质沉积率的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(11): 6340-6348.]
- [39] Periago M J, Ayala M D, López-Albors O, et al. Muscle cellularity and flesh quality of wild and farmed sea bass, *Dicentrarchus labrax* L.[J]. Aquaculture, 2005, 249(1-4): 175-188.
- [40] Johnston I A, Alderson R, Sandham C, et al. Patterns of muscle growth in early and late maturing populations of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)[J]. Aquaculture, 2000, 189(3-4): 307-333.
- [41] He J Z, Feng P F, Zhou D Y, et al. Effects of turtle-rice co-culture system on the muscle quality of *Trionyx sinensis*[J]. Journal of Aquaculture, 2022, 43(2): 24-30. [何金钊, 冯鹏霏, 周大颜, 等. 稻鳖生态种养对黄沙鳖肌肉品质的影响[J]. 水产养殖, 2022, 43(2): 24-30.]
- [42] Chen J B, Yu J Q, Xu H Z, et al. Effects of compound feed and bait fish on growth, gastrointestinal structure and function and meat quality of *Siniperca chuatsi*[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(10): 84-98. [陈剑斌, 于俊琦, 徐杭忠, 等. 配合饲料和饵料鱼对鳊生长、胃肠结构功能及肉质的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(10): 84-98.]
- [43] Shao J J, Zhong L Q, Zhu Y X, et al. Effects of formulated feed and chilled trash fish on growth performance and meat quality of largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. Fisheries

- Science, 2023, 42(1): 81-88. [邵俊杰, 钟立强, 朱昱璇, 等. 配合饲料和冰鲜鱼对大口黑鲈生长和品质的影响[J]. 水产科学, 2023, 42(1): 81-88.]
- [44] Wang J L, Liu W, Li P L, et al. Evaluation of nutritive quality and nutrient components in the muscles of wild and farmed chum salmon (*Oncorhynchus keta*)[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2019, 39(2): 126-132. [王继隆, 刘伟, 李培伦, 等. 野生和养殖大麻哈鱼肌肉营养成分与品质评价[J]. 广东海洋大学学报, 2019, 39(2): 126-132.]
- [45] Hu Y, Zhou C S, Hu L H, et al. Comparative analysis of the nutritional composition in the muscles and skins of *Anguilla japonica* cultured in the seawater and freshwater[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015, 39(4): 730-739. [胡园, 周朝生, 胡利华, 等. 海、淡水养殖日本鳗鲡肌肉和鱼皮营养成分分析比较[J]. 水生生物学报, 2015, 39(4): 730-739.]
- [46] Wang G J, Guan S J, Wu R Q, et al. Analysis and evaluation on nutritional composition in muscles of big mouth bass, *Micropterus salmoides*[J]. Marine Fisheries, 2008, 30(3): 239-244. [王广军, 关胜军, 吴锐全, 等. 大口黑鲈肌肉营养成分分析及营养评价[J]. 海洋渔业, 2008, 30(3): 239-244.]
- [47] Yang Y K, Huang X L, Shu H, et al. Comparative analysis of nutritional composition of muscle from *Siganus oramin* living in different habitats[J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(1): 128-135. [杨育凯, 黄小林, 舒琥, 等. 不同生境下黄斑篮子鱼肌肉营养成分比较分析[J]. 南方水产科学, 2023, 19(1): 128-135.]
- [48] Wang J Y, Zhang D R, Ma J J, et al. Nutritional components analysis and nutritive value evaluation of ♀ *Epinephelus fuscoguttatus* × ♂ *E. lanceolatus* muscles[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015, 37(4): 61-69. [王际英, 张德瑞, 马晶晶, 等. 珍珠龙胆石斑鱼肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 海洋湖沼通报, 2015, 37(4): 61-69.]
- [49] Li W W, Huang T Q, Gu W, et al. The analysis of muscle nutrient composition of six representative breeding population of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(9): 1425-1434. [李文文, 黄天晴, 谷伟, 等. 六个虹鳟代表性繁育群体肌肉营养成分分析[J]. 水生生物学报, 2023, 47(9): 1425-1434.]
- [50] Li Z F, Gong W B, Wang J L, et al. Evaluation of effects of frozen fresh fish and artificial compound feed on muscle quality and health status of *Micropterus salmoides*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(11): 4180-4188. [李志斐, 龚望宝, 王金林, 等. 冰鲜杂鱼和人工配合饲料对大口黑鲈肌肉品质及健康状况影响的评价[J]. 动物营养学报, 2017, 29(11): 4180-4188.]
- [51] Francis D S, Turchini G M, Jones P L, et al. Growth performance, feed efficiency and fatty acid composition of juvenile Murray cod, *Maccullochella peelii*, fed graded levels of canola and linseed oil[J]. Aquaculture Nutrition, 2007, 13(5): 335-350.
- [52] Wang L N, Tian Y S, Li Z T, et al. Analysis and quality evaluation of nutritional components in the muscle of *Epinephelus fuscoguttatus*, *E. fuscoguttatus* ♀ × *E. tukula* ♂ and *E. fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(9): 113-121. [王林娜, 田永胜, 李振通, 等. 棕点石斑鱼、杂交“金虎斑”及珍珠龙胆的肌肉营养成分分析及品质评价[J]. 水产学报, 2023, 47(9): 113-121.]
- [53] Jin M, Lu Y, Yuan Y, et al. Regulation of growth, antioxidant capacity, fatty acid profiles, hematological characteristics and expression of lipid related genes by different dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*)[J]. Aquaculture, 2017, 471: 55-65.
- [54] Sánchez-Machado D I, López-Cervantes J, López-Hernández J, et al. Fatty acids, total lipid, protein and ash contents of processed edible seaweeds[J]. Food Chemistry, 2004, 85(3): 439-444.
- [55] Bell J G, Henderson R J, Tocher D R, et al. Substituting fish oil with crude palm oil in the diet of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects muscle fatty acid composition and hepatic fatty acid metabolism[J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132(2): 222-230.
- [56] Bell J G, McEvoy J, Tocher D R, et al. Replacement of fish oil with rapeseed oil in diets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) affects tissue lipid compositions and hepatocyte fatty acid metabolism[J]. The Journal of Nutrition, 2001, 131(5): 1535-1543.
- [57] Turchini G M, Torstensen B E, Ng W K. Fish oil replacement in finfish nutrition[J]. Reviews in Aquaculture, 2009, 1(1): 10-57.
- [58] He L Y. Effects of replacing fish oil with soybean oil or palm oil in diets on growth performance, fatty acid composition and fat metabolism of grouper (*Epinephelus coioides*)[D]. Xiamen: Jimei University, 2019. [何凌云. 大豆油或棕榈油替代鱼油对斜带石斑鱼生长性能、脂肪酸组成及脂肪代谢的影响[D]. 厦门: 集美大学, 2019.]
- [59] Johansen K A, Overturf K. Quantitative expression analysis of genes affecting muscle growth during development of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Marine Biotechnology, 2005, 7(6): 576-587.
- [60] Yang X Y, Song Z L, Zhi X Y, et al. Effects of replacing fish

- meal with enzyme-digested poultry by-product meal on muscle quality and expression of muscle growth-related factors of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(12): 6999-7011. [杨烜懿, 宋紫菱, 植心妍, 等. 酶解鸡肉粉替代鱼粉对珍珠龙胆石斑鱼肌肉营养品质及肌肉生长相关基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(12): 6999-7011.]
- [61] Chen D X. Cloning and regulate expression of the MRFs in the *Monopterus albus* and analysis the evolutionary relationship[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. [陈敦学. 黄鳝生肌调节因子(MRFs)家族基因的克隆与营养调控及进化分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.]
- [62] Nadjar-Boger E, Hinitz Y, Funkenstein B. Structural and functional analysis of myostatin-2 promoter alleles from the marine fish *Sparus aurata*: Evidence for strong muscle-specific promoter activity and post-transcriptional regulation [J]. Molecular and Cellular Endocrinology, 2012, 361(1-2): 51-68.
- [63] Chandhini S, Trumbo B, Jose S, et al. Insulin-like growth factor signalling and its significance as a biomarker in fish and shellfish research[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2021, 47(4): 1011-1031.
- [64] Pang X L, Tian X, Wang L Y, et al. Effects of dietary n-3/n-6 polyunsaturated fatty acids ratio on growth performance and growth-related genes mRNA expression in common carp (*Cyprinus carpio haematopterus*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(2): 492-504. [庞小磊, 田雪, 王良炎, 等. 饲料中 n-3/n-6 多不饱和脂肪酸水平对黄河鲤鱼幼鱼生长性能及生长相关基因 mRNA 表达的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(2): 492-504.]
- [65] Jiang Z T, Liu B, Ge X P, et al. Effects of dietary n-3/n-6 fatty acid ratio on growth performance, body composition, serum antioxidant capacity and related genes expression of oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(10): 2109-2122. [蒋振廷, 刘波, 戈贤平, 等. 饲料不同 n-3/n-6 脂肪酸比值对日本沼虾生长、虾体组分、血清抗氧化及相关基因表达的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(10): 2109-2122.]

Effects of formulated feed and chilled trash fish on growth and muscle nutrient components of juvenile greater amberjack (*Seriola dumerili*)

CHEN Peipei¹, RU Xiaoying², HUANG Yang^{1,2}, LI Jin¹, YANG Jiahui¹, YANG Tonglin¹, ZHU Kunfeng¹, ZOU Yifan¹, ZHU Chunhua^{1,2}

1. Fisheries College of Guangdong Ocean University; Guangdong Research Center on Reproductive Control and Breeding Technology of Indigenous Valuable Fish Species; Guangdong Provincial Engineering Laboratory for Mariculture Organism Breeding, Zhanjiang 524088, China;
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhanjiang 524025, China

Abstract: *Seriola dumerili* is a high-quality “sashimi” food, favored by consumers throughout the world because of its meaty texture and high nutritional value. At present, artificial culturing of *Seriola dumerili* is performed in Fujian, Guangdong, and Hainan, China, typically using a chilled trash fish diet, which results in frequent occurrence of diseases during culturing. To explore the effectiveness at replacement of chilled trash fish with artificial formulated feed, the present study was designed to investigate the effects of formulated feed and chilled trash fish on the growth and muscle nutrient composition of *Seriola dumerili*. A total of 180 *Seriola dumerili* with an initial body weight of (274.93±11.17) g were randomly assigned to two groups with three replicates each, with 30 fish per group which were fed either chilled trash fish or formulated feed for 60 d. The results showed that: 1. In terms of growth performance, the final body weight (FBW), weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR) of the formulated feed group were extremely significantly lower than those of the chilled trash fish group ($P<0.01$), whereas no significant differences ($P>0.05$) were observed between the two groups in terms of survival rate (SR), condition factor (CF), hepatosomatic index (HSI), and viscerosomatic index (VSI). 2. The results of growth-related gene expression levels showed that the mRNA expression of *MyoG*, *MyoD1*, *MyoD2*, and *COL1A1A* was significantly up-regulated ($P<0.05$) in the muscle of the formulated feed group, whereas liver *IGF-2* mRNA was highly significantly down-regulated ($P<0.01$). 3. In terms of body composition, no significant differences were found between the two groups with regard to the crude lipid and crude protein content of muscle ($P>0.05$). The whole-body crude lipid content and muscle fiber density in the formulated feed group were significantly lower than those in the chilled trash fish group ($P<0.01$), whereas their crude protein content and average fiber cross-sectional area were significantly higher ($P<0.01$). No significant differences were found between the two groups in terms of moisture, water-soluble chloride, calcium, crude ash, and total phosphorus contents in muscle tissue ($P>0.05$). 4. The contents of total amino acids (TAA), essential amino acids (EAA), and palatable amino acids (DAA) in muscle tissue of the formulated feed group were significantly higher than those in the chilled trash fish group ($P<0.01$). According to the EAAI, AAS, and CS scores, the muscle EAA index and score of the formulated feed group were higher than those of the chilled trash fish group; the first limiting amino acids of the two groups were Phe and Tyr, and the second limiting amino acid was Met. 5. No significant difference in total saturated fatty acids (SFA) and polyunsaturated fatty acids (PUFA) in muscle was observed between the two groups ($P>0.05$), and the most abundant PUFA was DHA. The content of n-6 PUFA in the formulated feed group was significantly higher than that in the chilled trash fish group ($P>0.05$), whereas EPA, DHA, and n-3 PUFA levels were higher in the chilled trash fish group ($P<0.01$). In conclusion, compared with the chilled trash fish group, the formulated feed significantly increased muscle protein level, amino acid composition, and nutritional value, and it promoted the expression of muscle growth and collagen genes, whereas the growth performance and n-3 PUFA levels were low. This study demonstrated that chilled trash fish can be replaced by artificial formulated feed in *Seriola dumerili* aquaculture; however, formulated feed should be further adjusted and optimized in the subsequent feed research with regard to the n-3 PUFA level.

Key words: *Seriola dumerili*; formulated feed; chilled trash fish; growth performance; nutrient composition

Corresponding author: ZHU Chunhua. E-mail: zhu860025@163.com