

doi: 10.12131/20180168

复合蛋白源替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹生长性能、 生理代谢和生化组成的影响

朱筛成¹, 龙晓文¹, 向朝林², 张金彪³, 邓 登²,
周永昌¹, 成永旭^{1,4,5}, 吴旭干^{1,4,5}

(1. 上海海洋大学, 农业农村部鱼类营养和环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 深圳市澳华农牧有限公司, 广东深圳 518054; 3. 常州市水产技术指导站, 江苏常州 213200; 4. 上海海洋大学, 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 文章研究了复合蛋白源替代饲料中不同水平 (0%、16.67%、33.33%、50% 和 66.67%, 分别记为饲料 1[#]~5[#]) 的鱼粉对中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 幼蟹成活、生长、生理代谢和生化组成的影响。结果显示: 1) 随着鱼粉替代水平增加, 幼蟹终末体质量、增重率、特定生长率和肝胰腺指数均呈先升后降的趋势, 2[#]组最高 ($P<0.05$); 2) 肝胰腺中的谷草转氨酶、谷丙转氨酶活力和丙二醛含量均为 4[#]组最高, 而超氧化物歧化酶活力在 1[#]组最高 ($P<0.05$); 血清中的谷丙转氨酶活力在 5[#]组最高, 甘油三酯含量和超氧化物歧化酶活力则以 4[#]组最高, 而丙二醛含量在 2[#]组最高 ($P<0.05$); 3) 1[#]组躯体的粗蛋白和粗脂肪含量均显著高于其他组, 而总碳水化合物含量在 2[#]组最高 ($P<0.05$)。躯体半胱氨酸含量在 4[#]组最高, 而其他氨基酸与总氨基酸含量均在 2[#]组最高 ($P<0.05$)。结果表明, 饲料中过高的鱼粉替代水平 (33%~67%) 会降低中华绒螯蟹幼蟹生长性能和躯体营养物质的积累, 对生理代谢产生不良影响, 建议中华绒螯蟹幼蟹饲料中复合蛋白源替代鱼粉的比例为 16.67%。

关键词: 中华绒螯蟹幼蟹; 鱼粉替代; 复合蛋白源; 生长性能; 生理代谢; 生化组成

中图分类号: S 963.71

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-(2019)02-0083-10

Effects of dietary fishmeal replacement with protein mixtures on growth performance, physiological metabolism and biochemical composition of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)

ZHU Shaicheng¹, LONG Xiaowen¹, XIANG Chaolin², ZHANG Jinbiao³, DENG Deng²,
ZHOU Yongchang¹, CHENG Yongxu^{1,4,5}, WU Xugan^{1,4,5}

(1. Center for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shenzhen Alpha Feed Co., Ltd., Shenzhen 518054, China; 3. Changzhou Jintan District Fisheries Technical Extension Station, Changzhou 213200, China; 4. Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 5. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

收稿日期: 2018-07-27; 修回日期: 2018-10-15

资助项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金岗位科学家项目 (CARS-48); 江苏省海洋与渔业科技创新和推广项目 (Y2017-4); 上海市高水平地方高校建设科研项目 (A1-2801-18-1003); 上海市科委工程技术中心能力提升项目 (16DZ2281200); 深圳市澳华农牧有限公司委托项目 (D-8006-15-0054)

作者简介: 朱筛成 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事甲壳动物营养生理与饲料研究。E-mail: 1192098326@qq.com

通信作者: 吴旭干 (1978—), 男, 教授, 从事水产动物营养与育种研究。E-mail: xgwu@shou.edu.cn

Abstract: We investigated the effects of different levels (0%, 16.67%, 33.33%, 50% and 66.67%, represented as Diet 1[#] to 5[#] treatments) of fishmeal replacement by protein mixtures on the survival, growth, physiological metabolism and body biochemical composition of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). The results show that: 1) the final body mass, weight gain rate, specific growth rate and hepatosomatic index firstly increased and then decreased with increasing dietary fish meal replacement level, and the highest values were detected in Diet 2[#] treatment ($P<0.05$). 2) The highest levels of glutamic-oxalacetic transaminase (GOT), glutamic-pyruvic transaminase (GPT) and malondialdehyde in hepatopancreas were detected in Diet 4[#] treatment, while Diet 1[#] treatment had the highest activity of superoxide dismutase (SOD) in hepatopancreas ($P<0.05$). The highest activity of GPT in the serum was detected in Diet 5[#] treatment, and the highest triglyceride (TG) content and SOD activity were detected in Diet 4[#] treatment ($P<0.05$), while the highest malondialdehyde (MDA) content was detected in Diet 2[#] treatment. 3) The contents of crude protein and crude lipid in the juvenile crab's body in Diet 1[#] treatment were significantly higher than those in the other treatments, while the highest total carbohydrate content was detected in Diet 2[#] ($P<0.05$). For the body amino acids, the highest cysteine (Cys) content was detected in Diet 4[#] treatment, and the highest contents of other amino acids and total amino acids (TAA) were detected in Diet 2[#] ($P<0.05$). In conclusion, excessive dietary fishmeal replacement (33%–67%) can reduce the growth performance and accumulation of nutrients in juvenile crab's body, having a negative effect on physiological metabolism. The appropriate dietary fishmeal replacement level is suggested to be about 20%.

Key words: juvenile *Eriocheir sinensis*; fish meal replacement; protein mixtures; growth performance; physiological metabolism; biochemical composition

鱼粉因其氨基酸组成合理、适口性好等诸多优点,被广泛应用于水产饲料的生产。但由于过度捕捞和全球气候变暖等因素导致野生渔业资源减少,全球鱼粉产量不能满足水产养殖业快速发展的需要^[1-2],因此寻找鱼粉蛋白替代源已成为水产动物营养学研究的热点之一^[3-4]。目前水产饲料的鱼粉替代源主要包括陆生动物蛋白^[5-6]和植物蛋白源^[7-8]。陆生动物蛋白源通常存在灰分高、供应不稳定和价格相对较高等问题,植物蛋白源则存在氨基酸组成不平衡、含有抗营养因子和适口性差等缺点,而采用多种混合蛋白源具有营养成分互补、成本低廉和原料来源广泛等优点,因此采用复合蛋白源替代鱼粉能够提高替代效果、减轻对鱼粉的过度依赖,具有良好的应用前景^[4]。

发酵豆粕是经微生物发酵后的豆粕,不仅使抗营养因子大大降低,而且将大分子蛋白等分解成更易吸收的小分子肽,大大提高了适口性,但是缺乏赖氨酸和多不饱和脂肪酸,目前已有学者采用发酵豆粕替代凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 和中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 幼蟹饲料中的部分鱼粉^[9-10]。猪肉粉和鸡肉粉来源广泛,其粗蛋白含量较高,略高于鱼粉,除蛋氨酸和赖氨酸含量较低外,其他必需氨基酸含量相对平衡^[11]。血球蛋白粉的蛋白质含量较高(超过85%)赖氨酸含量较高,但异亮氨酸、胱氨酸和蛋氨酸等较缺乏,适口性差^[12]。虾粉的粗蛋白含量、氨基酸及脂肪酸组成与

国产鱼粉接近,富含蛋氨酸、赖氨酸等必需氨基酸及二十碳五烯酸(EPA)、二十二碳六烯酸(DHA)等必需脂肪酸,且具有较好的诱食性^[13]。此外,目前发酵豆粕的价格通常为4 000~6 000元·t⁻¹,猪肉粉、鸡肉粉、喷雾干燥猪血球蛋白粉和虾粉的价格为5 000~7 000元·t⁻¹,而鱼粉价格通常为10 000~12 000元·t⁻¹。因此采用发酵豆粕、猪肉粉、鸡肉粉、喷雾干燥猪血球蛋白粉和虾粉搭配替代鱼粉不仅可以提高氨基酸的平衡性,还可降低饲料成本,对水产养殖业的可持续发展具有重要的现实意义。

中华绒螯蟹俗称河蟹,是我国重要的经济养殖蟹类之一,2016年全国养殖总产量高达 81.2×10^4 t^[14]。采用配合饲料养殖中华绒螯蟹具有营养平衡、投喂方便和水体污染小等优点,随着中华绒螯蟹池塘养殖的推广和配合饲料的逐渐普及^[15],国内中华绒螯蟹配合饲料产量逐年上升;鱼粉供给不足已经成为优质河蟹配合饲料生产和推广的重要瓶颈之一,因此开展中华绒螯蟹配合饲料中的鱼粉替代势在必行。目前,已有部分采用单一植物蛋白源替代中华绒螯蟹配合饲料中鱼粉的报道^[16-18],但尚未见采用复合蛋白源替代鱼粉的研究。鉴于此,本文采用复合蛋白源(发酵豆粕、猪肉粉、鸡肉粉、喷雾干燥血球蛋白粉和虾粉)替代饲料中的鱼粉,探究饲料中鱼粉的替代水平对中华绒螯蟹幼蟹生长、生理代谢和生化组成的影响,以为幼蟹饲料配制和鱼粉替代源的开发等提供一定的理论依据和实践参考。

1 材料与方

1.1 实验设计与饲料

采用发酵豆粕、猪肉粉、鸡肉粉、喷雾干燥猪血球蛋白粉和虾粉配制成复合蛋白源,使其粗蛋白和粗脂肪含量与鱼粉接近。采用豆粕、菜籽粕、鱼粉和复合蛋白源等作为蛋白源,鱼油、猪油和豆油等作为脂肪源配制5种等氮等脂饲料(分别记为饲料1[#]~5[#]),使饲料中复合蛋白源替代鱼粉的比例分别为0%、16.67%、33.33%、50%和66.67%。饲料配制之前,所有原料粉碎后过80目筛,按照饲料配方(表1)中各原料的比例混匀后制成粒径

2 mm,长度4~5 mm的沉性膨化饲料。在室温条件下风干后,置于-20℃冰箱密封保存备用。实验饲料的常规营养成分和氨基酸组成见表2。

1.2 实验蟹的养殖管理

实验用蟹均取自上海海洋大学崇明基地,挑选附肢健全、活力较好,处于蜕壳间期,初始体质量为(1.59±0.02)g的幼蟹用于养殖实验。在室内循环水的聚氯乙烯(PVC)水槽(长×宽×高=18 m×0.8 m×0.3 m)中放180个四周和底部有小孔的盒子(长×宽×高为28 cm×21 cm×17.5 cm,水深12 cm),将180只蟹随机放入盒中单独养殖,在盒底放置瓦片作为隐蔽物,分为5个饲料组,每个饲料组重复

表1 实验饲料配方

Tab.1 Formulations of five experimental diets

原料 ingredient	饲料 1 [#] Diet 1 [#]	饲料 2 [#] Diet 2 [#]	饲料 3 [#] Diet 3 [#]	饲料 4 [#] Diet 4 [#]	饲料 5 [#] Diet 5 [#]
豆粕 soybean meal	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
菜粕 rapeseed meal	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
鱼粉 fish meal	24.00	20.00	16.00	12.00	8.00
复合蛋白源 protein mixtures	0.00	4.00	8.00	12.00	16.00
乌贼膏 squid meal	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
鱼溶浆 fish slurry	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30
啤酒酵母粉 brewer's yeast	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
螺旋藻粉 spirulina powder	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
面粉 wheat flour	17.48	17.48	17.48	17.48	17.48
维生素预混料 ¹ vitamin premix	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
矿物质预混料 ² mineral premix	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
氯化胆碱 (50%) choline chloride	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
甜菜碱 betaine	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
维生素C (35%) vitamin C	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
斑螯黄 (10%) canthaxanthin	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
大豆磷脂油 soy lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
鱼油 fish oil	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
猪油 pork lard	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
豆油 soybean oil	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

注: 1. 维生素预混料 (mg·kg⁻¹ 饲料): 维生素 A 125; 维生素 D₃ 30; 维生素 E 1 050; 维生素 K₃ 35.4; 维生素 B₁ 100; 维生素 B₂ 150; 维生素 B₆ 150; 维生素 B₁₂ 0.2; 维生素 C 700; 生物素 4; D-泛酸钙 250; 叶酸 25; 烟酰胺 300。2. 矿物质预混料 (mg·kg⁻¹ 饲料): 一水硫酸亚铁 200; 五水硫酸铜 96; 一水硫酸锌 360; 一水硫酸锰 120; 一水硫酸镁 240; 磷酸二氢钾 4 200; 磷酸二氢钠 500; 碘化钾 5.4; 六水氯化钴 2.1; 亚硒酸钠 3

Note: 1. vitamin mixture (mg·kg⁻¹ diet): V_A125; V_{D₃} 30; V_E 1 050; V_{K₃} 35.4; V_{B₁} 100; V_{B₂} 150; V_{B₆} 150; V_{B₁₂} 0.2; V_C 700; biotin 4; D-calcium pantothenate 250; folic acid 25; nicotinamide 300; 2. mineral mixture (mg·kg⁻¹ diet): FeSO₄·H₂O 200; CuSO₄·5H₂O 96; ZnSO₄·H₂O 360; MnSO₄·H₂O 120; MgSO₄·H₂O 240; KH₂PO₄ 4 200; NaH₂PO₄ 500; KI 5.4; CoCl₂·6H₂O 2.1; Na₂SeO₃ 3

表2 实验饲料常规营养成分与氨基酸组成

Tab.2 Proximate composition and amino acid composition of five experimental diets

项目 item	饲料 1 [#] Diet 1 [#]	饲料 2 [#] Diet 2 [#]	饲料 3 [#] Diet 3 [#]	饲料 4 [#] Diet 4 [#]	饲料 5 [#] Diet 5 [#]
常规营养成分(干质量)% proximate composition (dry mass)					
水分 moisture	8.71	9.38	9.08	9.17	9.35
粗蛋白 crude protein	37.47	37.02	37.11	37.46	37.26
粗脂肪 crude lipid	10.99	11.01	11.22	11.24	11.60
灰分 ash	8.77	8.63	8.49	8.19	7.94
总碳水化合物 total carbohydrate	22.18	22.23	22.40	22.56	22.72
氨基酸组成(干质量)/mg·g ⁻¹ amino acid composition (dry mass)					
苏氨酸 Thr	16.85	15.95	15.95	15.45	15.25
缬氨酸 Val	18.35	18.25	18.75	18.83	19.7
异亮氨酸 Ile	16.25	15.25	15.35	14.82	14.5
亮氨酸 Leu	29.80	28.95	29.95	29.26	30.15
苯丙氨酸 Phe	17.60	17.95	16.65	16.92	17.15
赖氨酸 Lys	27.30	25.40	25.75	24.57	24.10
色氨酸 Trp	7.35	7.14	6.64	6.80	6.92
蛋氨酸 Met	7.60	6.60	6.95	6.23	6.35
组氨酸 His	14.70	13.95	14.40	13.91	14.20
精氨酸 Arg	24.00	23.05	23.70	22.87	23.00
总必需氨基酸 Σ EAA	179.80	172.49	174.09	169.66	171.32
酪氨酸 Tyr	13.00	12.90	12.10	11.91	11.70
半胱氨酸 Cys	6.70	6.75	6.90	6.84	6.75
天门冬氨酸 Asp	37.30	35.95	36.55	35.57	35.95
丝氨酸 Ser	18.50	18.00	18.40	17.99	18.60
谷氨酸 Glu	67.45	63.15	64.75	62.79	62.60
脯氨酸 Pro	17.95	16.50	18.35	18.63	19.45
丙氨酸 Ala	20.15	20.35	21.45	20.91	22.55
甘氨酸 Gly	22.15	23.35	21.55	20.98	21.55
总非必需氨基酸 Σ NEAA	203.20	196.95	200.05	195.62	199.15
总氨基酸 TAA	383.00	369.44	374.14	365.28	370.47
必需氨基酸/非必需氨基酸 EAA/NEAA	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86

36 只蟹。暂养时间为 5 d, 暂养期间投喂商业饲料。养殖期间, 每日 16:00 投喂实验饲料, 投喂量约占总体质量的 2%~3%, 隔日用虹吸法吸出粪便和残饵。期间, 24 h 充氧, 采用 40 W 日光灯作为光源 (12 h 光照+12 h 黑暗), 水温>20 ℃; pH 7.0~

9.0; 平均溶解氧质量浓度>4 mg·L⁻¹; 氨氮质量浓度<0.5 mg·L⁻¹; 亚硝酸盐质量浓度<0.15 mg·L⁻¹。实验过程中测量并记录每只蟹蜕壳后 3~5 d 的体质量, 待 80% 以上个体完成第 2 次蜕壳后即停止实验。

1.3 样品和数据采集

实验过程中, 将完成 2 次蜕壳后 3~7 d 左右处于蜕壳间期的幼蟹取出。用吸水纸擦干体表水分后用电子天平 (精确度=0.01 g) 称质量。将幼蟹放在冰上麻醉后, 用 1.0 mL 无菌注射器从第 3 支步足基部抽取 0.5 mL 血淋巴样品装于 1.5 mL 离心管中, 于-40 °C 保存; 沿蟹壳侧面将蟹壳与躯体分离, 然后直接解剖取出肝胰腺并准确称质量。将肝胰腺和去除附肢的躯体分别装入自封袋中于-40 °C 中保存备用。各组幼蟹的成活率 (survival rate, SR)、增重率 (weight gain rate, WGR)、特定生长率 (specific growth rate, SGR)、蜕皮间隔 [intermolt duration, ID, 为第二次蜕壳日期与第一次蜕壳日期的间隔 (d)] 和肝胰腺指数 (hepatosomatic index, HSI) 按以下列公式进行计算:

$$SR = N_2 \times N_1^{-1} \times 100\%$$

$$WGR = (M_2 - M_1) \times M_1^{-1} \times 100\%$$

$$SGR (\% \cdot d^{-1}) = 100 \times (\ln M_2 - \ln M_1) \times T^{-1}$$

$$HSI = M_H \times M_C^{-1} \times 100\%$$

其中 N_2 为实验结束时各组幼蟹成活数量; N_1 为各组幼蟹初始数量; M_2 为实验结束时各组幼蟹的体质量; M_1 为幼蟹初始体质量; T 为养殖时间; M_H 为肝胰腺质量; M_C 为幼蟹体质量。

1.4 样品前处理和生理代谢指标测定

由于幼蟹肝胰腺和血淋巴样品量较少, 为了满足分析测试需求, 每组随机取 16 只蟹的肝胰腺和血淋巴样品, 每 4 只蟹的样品合为一个样本, 每组分别各有 4 个肝胰腺和血淋巴样本, 用于后续生理代谢指标的测定。参考赵磊等^[19]的方法制备肝胰腺匀浆液和血清, 于-40 °C 保存备用。采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定谷草转氨酶 (GOT)、谷丙转氨酶 (GPT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、丙二醛 (MDA) 和甘油三酯 (TG)。

1.5 生化组成分析

生化组成测定前, 从每组随机取 16 只幼蟹的躯体, 每 4 只蟹的躯体随机合为 1 个样本。采用 105 °C 烘干法^[20]测定饲料的水分含量, 幼蟹躯体的水分含量采用冷冻干燥法进行测定。根据 AOAC^[20]的标准方法测定饲料和幼蟹躯体中的粗蛋白和粗灰分含量。按照 Folch 等^[21]的方法提取饲料和幼蟹躯体中的总脂并测定其含量。饲料和幼蟹躯体的总碳水化合物含量采用苯酚-硫酸法进行测定^[22]。按

照 Chen 等^[23]的方法测定饲料和幼蟹躯体中的总氨基酸和色氨酸含量, 其中总氨基酸采用酸水解法测定, 而色氨酸采用碱水解法测定。半胱氨酸含量采用过甲酸氧化水解法进行测定^[24]。

1.6 数据分析及统计

采用 SPSS 16.0 软件对实验数据进行统计分析, 所有数据均以“平均值±标准误 ($\bar{X} \pm SE$)”表示。采用 Levene's 法对所有数据进行方差齐性检验, 当不满足齐性时对百分比数据进行反正弦或平方根处理。采用 One-Way ANOVA 对实验结果进行方差分析, 采用 Tukey's 进行多重比较, 取 $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 复合蛋白源替代鱼粉对幼蟹成活率和生长性能的影响

各饲料组幼蟹的成活率均在 60% 左右。幼蟹终末体质量、增重率和特定生长率均为饲料 2[#]组最高 (表 3), 且随着鱼粉替代水平增加均呈先上升后下降的趋势。幼蟹蜕皮间隔随鱼粉替代水平的提高呈延长趋势, 但各组间无显著性差异。饲料 1[#]和 2[#]组幼蟹的 HSI 显著高于饲料 3[#]和 4[#]组 ($P < 0.05$), 但与饲料 5[#]组无显著性差异。

2.2 复合蛋白源替代鱼粉对幼蟹肝胰腺和血清生理代谢指标的影响

饲料 4[#]组幼蟹肝胰腺谷草转氨酶 (GOT) 与饲料 5[#]组无显著差异, 但显著高于其他 3 组 ($P < 0.05$, 图 1-a), 饲料 4[#]组幼蟹肝胰腺 GPT 活力和 MDA 含量显著高于其他组 ($P < 0.05$, 图 1-b, 图 1-d)。饲料 1[#]组肝胰腺中的 SOD 活力显著高于其他组 ($P < 0.05$), 其余各组间差异不显著 (图 1-c)。

饲料 5[#]组血清中的 GPT 活力显著高于其他组 ($P < 0.05$), 其余各组间差异不显著 (图 2-a)。饲料 4[#]组血清中的 TG 含量显著高于饲料 1[#]组 ($P < 0.05$), 但与其他 3 组差异不显著 (图 2-b)。饲料 4[#]组幼蟹血清的 SOD 活力显著高于饲料 1[#]和 5[#]组 ($P < 0.05$, 图 2-c), 并呈先上升后下降的趋势。饲料 2[#]组血清中的 MDA 含量显著高于其他组 ($P < 0.05$), 饲料 5[#]组的 MDA 含量最低 (图 2-d)。

2.3 复合蛋白源替代鱼粉对幼蟹躯体常规生化成分和氨基酸的影响

幼蟹躯体的粗蛋白含量在饲料 1[#]组最高, 且

表3 复合蛋白源替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹生长、蜕壳和肝胰腺指数的影响

Tab.3 Effect of dietary fishmeal replacement with protein mixtures on growth, molt and hepatosomatic index of juvenile *E. sinensis*

项目 item	饲料 1 [#] Diet 1 [#]	饲料 2 [#] Diet 2 [#]	饲料 3 [#] Diet 3 [#]	饲料 4 [#] Diet 4 [#]	饲料 5 [#] Diet 5 [#]
初始体质量/g initial body mass	1.60±0.02	1.60±0.03	1.58±0.04	1.59±0.03	1.60±0.03
终末体质量/g final body mass	3.40±0.13 ^{ab}	3.63±0.26 ^a	3.13±0.22 ^{ab}	3.07±0.12 ^{ab}	2.97±0.10 ^b
增重率/% WGR	112.72±4.70 ^a	126.26 ±2.73 ^a	98.03±5.64 ^b	92.62±5.91 ^b	85.61±3.46 ^b
特定增长率/%·d ⁻¹ SGR	1.19±0.09 ^{ab}	1.26±0.10 ^a	1.09±0.10 ^{ab}	0.96±0.09 ^{ab}	0.88±0.04 ^b
蜕皮间隔/d intermolt duration	34.43±1.72	34.10±1.77	36.00±2.06	38.38±1.12	38.80±2.05
肝胰腺指数/% hepatosomatic index	9.80±0.74 ^a	9.99±0.60 ^a	6.88±0.85 ^b	6.70±0.86 ^b	8.02±0.78 ^{ab}

注：同行数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)；下表同此

Notes: Values with different letters within the same row are significantly different ($P<0.05$). The same case in the following tables.

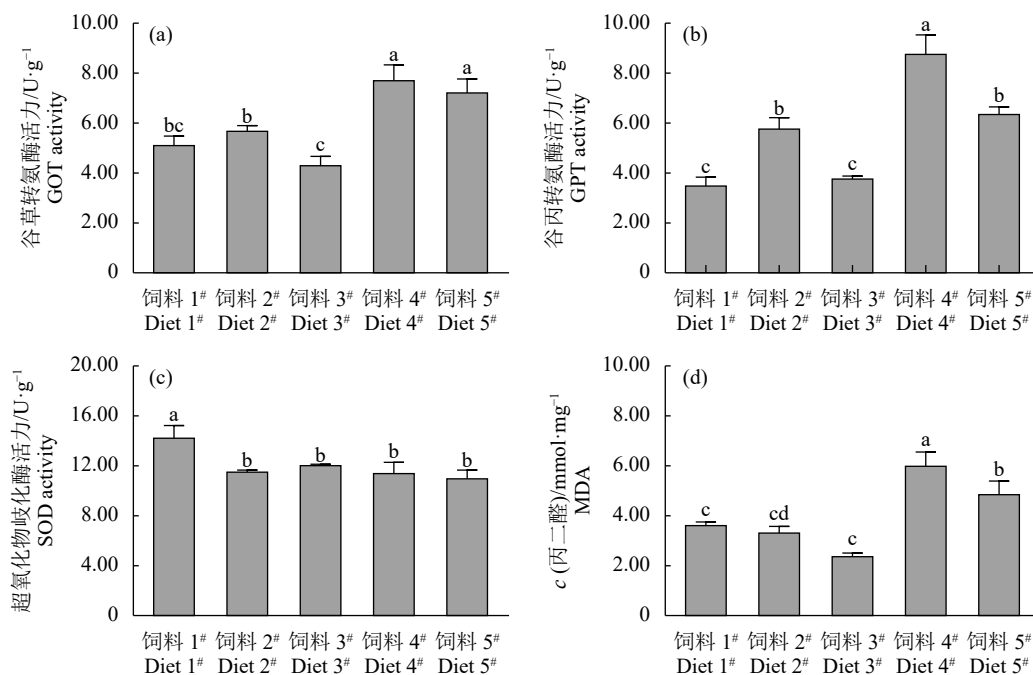


图1 复合蛋白源替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹肝胰腺生理代谢指标的影响

柱形图数值为平均值，方柱上不同字母表示差异显著($P<0.05$)；后图同此

Fig.1 Effect of fish meal replacement by protein mixtures on physiological indices in hepatopancreas of juvenile *E. sinensis*

The data are average values. Values with different letters are significantly different ($P<0.05$). The same case in the following figure.

显著高于其他组 ($P<0.05$)，饲料 3[#]组的粗蛋白含量最低 (表 4)。饲料 1[#]组幼蟹躯体粗脂肪含量显著高于其他组 ($P<0.05$)，并随饲料中鱼粉替代水平的提高呈显著降低趋势。饲料 2[#]组的躯体总碳水化合物含量显著高于饲料 4[#]和 5[#]组 ($P<0.05$)，但与其他两组间差异不显著。

幼蟹躯体的天门冬氨酸 (Asp)、苏氨酸 (Thr)、丝氨酸 (Ser)、谷氨酸 (Glu)、脯氨酸 (Pro)、甘氨酸 (Gly)、丙氨酸 (Ala)、缬氨酸 (Val)、蛋氨酸 (Met)、异亮氨酸 (Ile)、亮氨酸 (Leu)、酪氨酸

(Tyr)、苯丙氨酸 (Phe)、赖氨酸 (Lys)、组氨酸 (His)、精氨酸 (Arg)、总必需氨基酸含量 (EAA)、总非必需氨基酸 (NEAA) 和总氨基酸含量 (TAA) 均为饲料 2[#]组最高，饲料 4[#]组最低 (表 5)；饲料 1[#]~3[#]组幼蟹躯体的 EAA/TAA 显著高于饲料 4[#]和 5[#]组。

3 讨论

3.1 复合蛋白源替代鱼粉对幼蟹成活和生长的影响

本实验中，饲料中鱼粉替代对中华绒螯蟹幼蟹

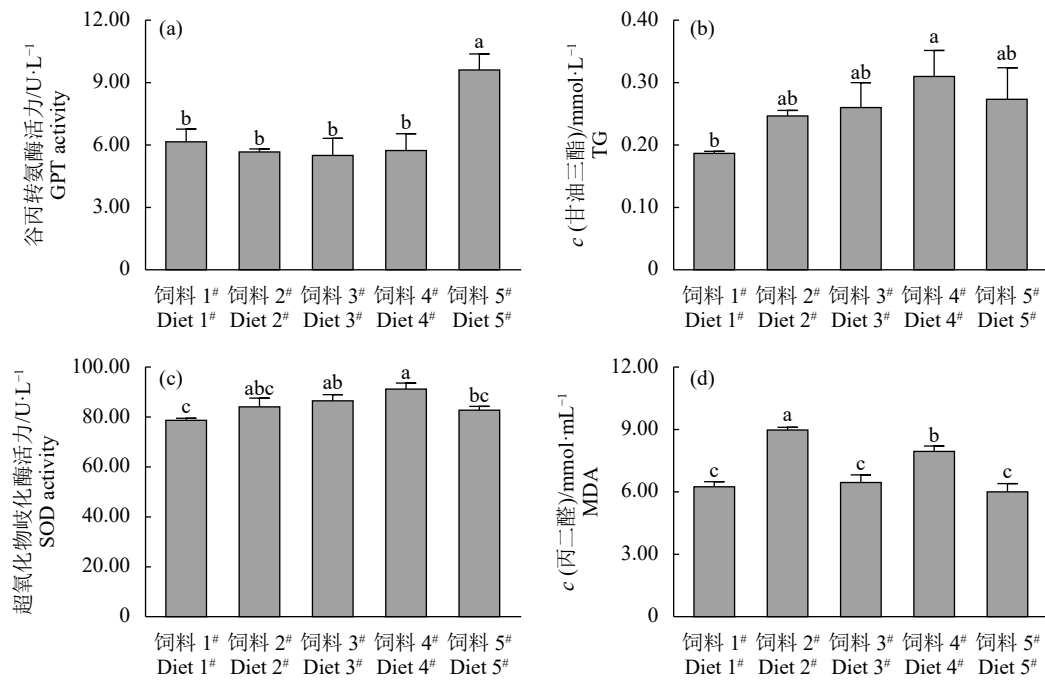


图2 复合蛋白源替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹血清生理代谢指标的影响

Fig.2 Effect of fish meal replacement by protein mixtures on physiological indices in serum of juvenile *E. sinensis*

表4 复合蛋白源替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹躯体常规生化指标的影响 (湿质量)

项目 (item)	饲料 1# (Diet 1#)	饲料 2# (Diet 2#)	饲料 3# (Diet 3#)	饲料 4# (Diet 4#)	饲料 5# (Diet 5#)	%
水分 moisture	75.11±1.57	75.22±1.05	77.69±1.12	78.35±1.18	76.33±0.69	
粗蛋白 crude protein	11.51±0.14 ^a	11.04±0.13 ^b	9.30±0.14 ^d	9.77±0.10 ^c	9.70±0.19 ^{cd}	
粗脂肪 crude lipid	2.03±0.20 ^a	1.49±0.05 ^b	1.42±0.12 ^b	1.33±0.06 ^{bc}	0.97±0.13 ^c	
总碳水化合物 total carbohydrate	0.90±0.09 ^a	0.91±0.04 ^a	0.74±0.00 ^{ab}	0.58±0.06 ^b	0.67±0.02 ^b	

的成活率无显著影响,这说明饲料中鱼粉含量对幼蟹的成活率无显著影响,与先前的研究结果^[25]类似。幼蟹终末体质量、增重率和特定生长率均为饲料 2#组最高,并随着鱼粉替代水平增加均呈先上升后下降的趋势,表明鱼粉替代水平高于 50% (基础饲料中鱼粉含量为 24%) 时,幼蟹的生长受到了抑制。Pan 等^[26]研究表明甲壳动物的生长、蜕壳受饲料营养组成的影响,当营养物质摄入不足时,甲壳动物蜕皮间隔会延长且蜕壳后的体质量增长率明显下降^[27]。本研究中,尽管各组幼蟹蜕皮间隔无显著性差异,但随饲料中鱼粉替代水平的升高呈延长趋势,这与沈城等^[28]的研究结果较为相似,反映出饲料中过高的鱼粉替代水平可能会对幼蟹的蜕壳产生不良影响。分析其可能的原因为: 1) 复合蛋白源中的发酵豆粕、猪肉粉、鸡肉粉和虾粉等原料

中的蛋白和氨基酸消化率均低于鱼粉^[29],因此高比例鱼粉替代水平会降低幼蟹对饲料蛋白和氨基酸的利用率,从而影响其生长和蜕壳; 2) 饲料中高比例鱼粉替代会降低饲料部分必需氨基酸的含量 (表 2),从而影响饲料利用效率和幼蟹的生长,这与对凡纳滨对虾的研究结果^[30]相类似; 3) 复合蛋白源中的发酵豆粕可能残留一定量的单宁、植酸、皂甙、异黄酮和大豆凝集素等抗营养因子,从而影响幼蟹对营养物质的消化利用^[31]。

肝胰腺是甲壳动物消化和存储营养物质的重要器官,HSI 的大小在一定程度上反映了肝胰腺营养物质的积累情况^[19,32]。本研究中,随着饲料替代水平的升高 (饲料 1#~4#组),HSI 呈下降趋势,其可能的原因是复合蛋白源中鸡肉粉、发酵豆粕和血粉等原料的蛋白质、氨基酸和脂肪消化率低于鱼

表5 复合蛋白源替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹躯体氨基酸的影响(湿质量)

项目 item	饲料 1 [#] Diet 1 [#]	饲料 2 [#] Diet 2 [#]	饲料 3 [#] Diet 3 [#]	饲料 4 [#] Diet 4 [#]	饲料 5 [#] Diet 5 [#]
苏氨酸 Thr	4.70±0.09 ^b	5.30±0.07 ^a	4.69±0.03 ^b	3.54±0.21 ^c	3.83±0.21 ^c
缬氨酸 Val	4.73±0.11 ^b	5.27±0.09 ^a	4.63±0.03 ^b	3.49±0.22 ^c	3.60±0.19 ^c
异亮氨酸 Ile	4.00±0.09 ^b	4.50±0.08 ^a	3.97±0.03 ^b	2.91±0.18 ^c	2.97±0.15 ^c
亮氨酸 Leu	6.88±0.14 ^b	7.82±0.12 ^a	7.05±0.05 ^b	5.14±0.32 ^c	5.22±0.29 ^c
苯丙氨酸 Phe	4.33±0.08 ^b	4.87±0.08 ^a	4.24±0.03 ^b	3.17±0.20 ^c	3.34±0.18 ^c
赖氨酸 Lys	6.90±0.14 ^b	7.86±0.13 ^a	7.12±0.04 ^b	5.16±0.32 ^c	5.37±0.29 ^c
蛋氨酸 Met	2.28±0.04 ^b	2.68±0.04 ^a	2.41±0.02 ^b	1.72±0.14 ^c	1.72±0.09 ^c
组氨酸 His	2.47±0.05 ^b	2.83±0.04 ^a	2.40±0.01 ^b	1.75±0.11 ^c	1.93±0.11 ^c
精氨酸 Arg	8.34±0.16 ^b	9.23±0.14 ^a	7.90±0.06 ^b	5.96±0.32 ^c	6.43±0.36 ^c
总必需氨基酸 Σ EAA	44.62±0.90 ^b	50.37±0.80 ^a	44.42±0.31 ^b	32.85±2.07 ^c	34.41±1.87 ^c
酪氨酸 Tyr	4.22±0.09 ^b	4.73±0.07 ^a	4.14±0.03 ^b	3.07±0.20 ^c	3.27±0.19 ^c
半胱氨酸 Cys	0.27±0.00 ^{ab}	0.31±0.05 ^{ab}	0.20±0.00 ^{bc}	0.33±0.06 ^a	0.13±0.01 ^c
天门冬氨酸 Asp	10.23±0.19 ^b	11.55±0.18 ^a	10.30±0.07 ^b	7.73±0.48 ^c	8.35±0.45 ^c
丝氨酸 Ser	4.60±0.08 ^b	5.18±0.07 ^a	4.65±0.04 ^b	3.58±0.22 ^c	3.84±0.22 ^c
谷氨酸 Glu	15.27±0.30 ^b	17.27±0.25 ^a	15.43±0.11 ^b	11.55±0.70 ^c	12.39±0.67 ^c
脯氨酸 Pro	3.95±0.10 ^b	4.55±0.01 ^a	3.87±0.00 ^b	2.93±0.17 ^c	3.07±0.15 ^c
丙氨酸 Ala	5.93±0.12 ^b	6.83±0.09 ^a	5.83±0.04 ^b	4.52±0.29 ^c	4.67±0.26 ^c
甘氨酸 Gly	6.37±0.12 ^{ab}	6.89±0.10 ^a	6.25±0.05 ^{ab}	5.27±0.33 ^c	5.68±0.32 ^{bc}
总非必需氨基酸 Σ NEAA	50.65±0.99 ^b	57.30±0.70 ^a	50.69±0.33 ^b	38.98±2.45 ^c	41.42±2.24 ^c
总氨基酸 TAA	95.27±1.89 ^b	107.67±1.50 ^a	95.11±0.64 ^b	71.77±4.57 ^c	75.84±4.11 ^c
必需氨基酸/总氨基酸 EAA/TAA	0.47±0.00 ^a	0.47±0.00 ^a	0.47±0.00 ^a	0.46±0.00 ^b	0.45±0.00 ^c

粉^[29,33],影响肝胰腺中营养物质的积累,从而导致 HSI 降低。然而,饲料 5[#]组幼蟹 HSI 相对饲料 3[#]和 4[#]组略微升高,其可能原因是猪肉粉和鸡肉粉的饱和脂肪酸含量比鱼粉高^[34],当猪肉粉和鸡肉粉添加比例过高时,饲料中 PUFA 含量明显降低,从而导致 HSI 略有上升^[32,35]。

3.2 复合蛋白源替代鱼粉对幼蟹生理代谢的影响

GOT 和 GPT 是水生动物体内最重要的 2 种转氨酶,在动物体氨基酸分解和合成中起着重要作用,其活性大小反映了氨基酸的代谢强度^[36]。这 2 种酶主要存在于肝脏中,血清中其活性通常很低,只有当组织细胞受损时才会释放到血液中。本实验中,饲料 5[#]组血清中的 GPT 活力显著高于其他组,这说明过高的鱼粉替代水平会对幼蟹的肝脏造成不良影响。血清中的脂质代谢指标可在一定程

度上反映中华绒螯蟹体内的脂质代谢情况^[37]。本研究中,饲料 2[#]~5[#]组幼蟹血清中的 TG 含量明显高于饲料 1[#]组,这可能是由于复合蛋白源中的猪肉粉和鸡肉粉中含有较多饱和脂肪酸,从而导致 2[#]~5[#]组饲料中的饱和脂肪酸含量较高,饲料中较高的饱和脂肪酸容易导致血清 TG 含量的升高^[38],其具体原因还有待进一步研究。

SOD 是生物体内重要的抗氧化酶之一,可清除机体中过多的氧自由基,从而起到保护细胞免受损伤的作用,其活力的大小反映了体内氧自由基水平的高低。本研究中,饲料 1[#]组(对照组)幼蟹肝胰腺中的 SOD 活力显著高于其他组,这可能是由于饲料 1[#]组肝胰腺总脂含量较高,更容易受到氧自由基的攻击,因此机体需提高 SOD 活力以清除体内过多的自由基,降低其对组织的危害^[39-40];而

幼蟹血淋巴中的 SOD 活力则随饲料中鱼粉替代水平的增加而升高, 这可能与血淋巴中逐渐上升的脂质含量(如 TG) 有关。MDA 是细胞脂质氧化的代谢产物, 其含量高低显示了脂质的过氧化程度^[37]。本研究发现, 当饲料中的鱼粉替代水平超过 50% 时(饲料 4[#]和 5[#]组), 幼蟹肝胰腺中的 MDA 含量显著高于其他组, 其可能原因是鱼粉含有一定量的类胡萝卜素和硒等抗氧化成分^[41], 高比例替代后则会降低机体应对氧化胁迫的能力, 从而导致肝胰腺中 MDA 含量的升高。

3.3 复合蛋白源替代鱼粉对幼蟹常规生化成分和氨基酸组成的影响

水产动物的生化组成与其饲料的营养成分密切相关, 水产动物的体成分也间接反映了其饲料质量的优劣情况^[4,18]。本研究结果显示, 高比例鱼粉替代水平(饲料 3[#]~5[#]组)会降低幼蟹躯体的粗蛋白含量, 这与对半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)^[42]和杂交鳢(*Channa sp.*)^[43]的研究结果相似, 这可能是由于复合蛋白源所含的发酵豆粕、猪肉粉、鸡肉粉和虾粉等原料中蛋白质和氨基酸的消化率低于鱼粉, 因此高比例鱼粉替代会降低幼蟹对蛋白质和氨基酸的利用率, 从而影响机体蛋白质和氨基酸的沉积率^[29]。此外, 复合蛋白源中的发酵豆粕可能残余一定量的抗营养因子, 从而影响幼蟹对营养物质的消化和利用^[31]。在本实验中, 幼蟹躯体粗脂肪含量也随鱼粉替代水平升高而下降, 这与对镜鲤(*Cyprinus carpio var. specularis*)的研究结果相似^[4], 分析其原因为: 1) 随着鱼粉替代水平的升高, 植物蛋白源比例逐渐升高, 由于植物蛋白源中非淀粉性多糖和低聚糖含量较高, 导致脂肪的消化吸收率下降, 从而影响了脂肪在幼蟹躯体的积累^[44-45]; 2) 可能是由于复合蛋白源中的鸡肉粉和猪肉粉等原料的粗脂肪消化率低于鱼粉^[33], 从而降低了幼蟹对饲料脂肪的利用率。水产动物组织中的氨基酸组成在一定程度上反映了其对饲料蛋白质的利用程度^[45-46]。本研究中, 饲料 2[#]组幼蟹躯体中的大部分氨基酸与总氨基酸含量均显著高于其他组, 这可能是由于饲料中适宜的鱼粉替代水平(16.7%)提高了饲料中氨基酸的平衡性, 从而增强了幼蟹对氨基酸的利用率和沉积率。

综上, 中华绒螯蟹幼蟹饲料中采用复合蛋白源(发酵豆粕、猪肉粉、鸡肉粉和血球蛋白粉)可

以替代 16.67% 的鱼粉, 过高比例鱼粉替代会抑制幼蟹的生长, 降低躯体蛋白质、氨基酸、脂肪和碳水化合物等营养物质的积累, 对肝胰腺和血淋巴的生理代谢产生不良影响。

参考文献:

- [1] TACON A G, METIAN M. Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: trends and future prospects[J]. *Aquaculture*, 2008, 285(1/2/3/4): 146-158.
- [2] FAO. Fishery and aquaculture statistics[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010: 9-12.
- [3] ENGIN K, CARTER C G. Fish meal replacement by plant and animal by-products in diets for the Australian short-finned eel, *Anguilla australis australis* (Richardson)[J]. *Aquacult Res*, 2005, 36(5): 445-454.
- [4] ZHOU J S, CHEN Y S, JI H, et al. The effect of replacing fish meal with fermented meal mixture of silkworm pupae, rapeseed and wheat on growth, body composition and health of mirror carp (*Cyprinus carpio var. specularis*)[J]. *Aquacult Nutr*, 2017, 23(4): 741-754.
- [5] WANG Y, GUO J L, BUREAU D P, et al. Replacement of fish meal by rendered animal protein ingredients in feeds for cuneate drum (*Nibea miichthioides*)[J]. *Aquaculture*, 2006, 252(2/3/4): 476-483.
- [6] WANG Y, LI K, HAN H, et al. Potential of using a blend of rendered animal protein ingredients to replace fish meal in practical diets for malabar grouper (*Epinephelus malabaricus*)[J]. *Aquaculture*, 2008, 281(1): 113-117.
- [7] DAVIES S J, MORRIS P C. Influence of multiple amino acid supplementation on the performance of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum), fed soya based diets[J]. *Aquacult Res*, 1997, 28(1): 65-74.
- [8] LIM S J, LEE K J. Supplemental iron and phosphorus increase dietary inclusion of cottonseed and soybean meal in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. *Aquacult Nutr*, 2008, 14(5): 423-430.
- [9] 彭松, 张敏, 李小勤, 等. 发酵豆粕替代鱼粉对凡纳滨对虾的作用效果研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(4): 103-109.
- [10] 崔燕燕, 张南南, 马倩倩, 等. 四种植物蛋白对中华绒螯蟹幼蟹生长性能、氨基酸沉积率和抗氧化酶活性的影响[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(1): 146-154.
- [11] 韩陆奇. 鸡肉粉的开发利用[J]. *肉品卫生*, 1995(12): 30.
- [12] 石学刚, 王斯佳, 李发弟, 等. 动物性蛋白饲料原料开发及应用现状[J]. *中国畜牧杂志*, 2007, 43(20): 46-50.
- [13] 曹小华, 李小奎, 蔡懋成, 等. 饲用虾粉的营养特性与新鲜度测定[J]. *粮食与饲料工业*, 2017(7): 46-50.
- [14] 农业部渔业渔政管理局. 2017年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [15] 何杰, 吴旭干, 赵恒亮, 等. 全程投喂配合饲料条件下池养中华绒螯蟹的生长性能及其性腺发育[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(3): 606-618.

- [16] JIANG H B, CHEN L Q, QIN J G, et al. Partial or complete substitution of fish meal with soybean meal and cottonseed meal in Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* diets[J]. *Aquacult Int*, 2013, 21(3): 617-628.
- [17] CAI C F, WU P, YE Y T, et al. Assessment of the feasibility of including high levels of oilseed meals in the diets of juvenile Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*): effects on growth, non-specific immunity, hepatopancreatic function, and intestinal morphology[J]. *Anim Feed Sci Tech*, 2014, 196: 117-127.
- [18] 杨霞, 叶金云, 张易祥, 等. 普通棉籽粕和发酵棉籽粕替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹生长性能、体成分及肝胰腺消化酶活性的影响[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(3): 683-693.
- [19] 赵磊, 龙晓文, 吴旭干, 等. 育肥饲料中混合植物油替代鱼油对中华绒螯蟹成体雄蟹性腺发育、脂质代谢、抗氧化及免疫性能的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(2): 455-467.
- [20] AOAC. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists[M]. 16th ed. Arlington, VA, USA: Association of Official Analytical Chemists, 1995: 1298.
- [21] FOLCH J, LEES M, SLOANE STANLEY G H. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. *J Biol Chem*, 1957, 226(1): 497-509.
- [22] KOCHERT A G. Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method[C]// HELLEBUST J A, CRAIGIE J S. Handbook of phycolocal methods: physiological and biochemical methods. London, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1978: 95-97.
- [23] CHEN D W, ZHANG M, SHRESTHA S. Compositional characteristics and nutritional quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Food Chem*, 2007, 103(4): 1343-1349.
- [24] SPINDLER M, STADLER R, TANNER H. Amino acid analysis of feedstuffs: determination of methionine and cystine after oxidation with performic acid and hydrolysis[J]. *J Agric Food Chem*, 1985, 32(6): 24-26.
- [25] YUE Y R, LIU Y J, TIAN L X, et al. Effects of replacing fish meal with soybean meal and peanut meal on growth, feed utilization and haemolymph indexes for juvenile white shrimp *Litopenaeus vannamei*, Boone[J]. *Aquacult Res*, 2012, 43(11): 1687-1696.
- [26] PAN C H, CHIEN Y H, CHENG J H. Effects of light regime, algae in the water, and dietary astaxanthin on pigmentation, growth, and survival of black tiger prawn *Penaeus monodon* post-larvae[J]. *Zool Stud*, 2001, 40(4): 371-382.
- [27] 申玉春, 陈作洲, 刘丽, 等. 盐度和营养对凡纳滨对虾蜕壳和生长的影响[J]. *水产学报*, 2012, 36(2): 290-299.
- [28] 沈城, 方华, 郭子好, 等. 发酵豆粕替代部分鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹生长性能、体成分及相关消化酶活性的影响[J]. *中国饲料*, 2016(6): 29-33.
- [29] 张璐, 陈立侨, 洪美玲, 等. 中华绒螯蟹对11种饲料原料蛋白质和氨基酸的表现消化率[J]. *水产学报*, 2007, 31(s1): 116-121.
- [30] XIE S W, LIU Y J, ZENG S, et al. Partial replacement of fish-meal by soy protein concentrate and soybean meal based protein blend for juvenile Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture*, 2016, 464: 296-302.
- [31] 张璐. 饲料蛋白源及抗营养因子对中华绒螯蟹生理生化影响的初步研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007: 40-41.
- [32] WU X G, CHANG G Y, CHENG Y X, et al. Effects of dietary phospholipid and highly unsaturated fatty acid on the gonadal development, tissue proximate composition, lipid class and fatty acid composition of precocious Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. *Aquacult Nutr*, 2010, 16(1): 25-36.
- [33] 李宗升, 吴立新, 李思萌, 等. 鸡肉粉替代鱼粉对大菱鲆生长和体组成的影响[J]. *水产科学*, 2016, 35(5): 486-491.
- [34] 高菲. 基于脂质特异性的不同动物源性饲料光谱鉴别方法与模型[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [35] 常国亮, 吴旭干, 成永旭, 等. 不同脂类营养对中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 幼蟹生长、成活、肝胰腺指数和生化成分的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(3): 276-283.
- [36] 严全根, 朱晓鸣, 杨云霞, 等. 饲料中棉粕替代鱼粉蛋白对草鱼的生长、血液生理指标和鱼体组成的影响[J]. *水生生物学报*, 2014, 38(2): 362-369.
- [37] LONG X W, WU X G, ZHAO L, et al. Effects of dietary supplementation with *Haematococcus pluvialis*, cell powder on coloration, ovarian development and antioxidation capacity of adult female Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. *Aquaculture*, 2017, 473: 545-553.
- [38] 周歧存, 麦康森, 刘永坚, 等. 动植物蛋白源替代鱼粉研究进展[J]. *水产学报*, 2005, 29(3): 404-410.
- [39] LI E C, CHEN L Q, ZENG C, et al. Comparison of digestive and antioxidant enzymes activities, haemolymph oxyhemocyanin contents and hepatopancreas histology of white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at various salinities[J]. *Aquaculture*, 2008, 274(1): 80-86.
- [40] 黄忠, 周传朋, 林黑着, 等. 饲料异亮氨酸水平对卵形鲳鲹消化酶活性和免疫指标的影响[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(1): 50-57.
- [41] 李宁, 郑银桦, 吴秀峰, 等. 大口黑鲈对饲料中酵母硒的耐受性研究[J]. *动物营养学报*, 2017, 29(6): 1949-1960.
- [42] 代伟伟, 麦康森, 徐玮, 等. 复合植物蛋白源替代鱼粉对半滑舌鳎生长、生理生化指标和肠组织结构的影响[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(1): 125-137.
- [43] 林仕梅, 马卉佳, 徐韬, 等. 复合蛋白源替代鱼粉对杂交鳢生长、体组成与生化指标的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(5): 745-754.
- [44] OPSTVEDT J, AKSNES A, HOPE B, et al. Efficiency of feed utilization in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed diets with increasing substitution of fish meal with vegetable proteins[J]. *Aquaculture*, 2003, 221(1/2/3/4): 365-379.
- [45] JI H, ZHANG J L, HUANG J Q, et al. Effect of replacement of dietary fish meal with silkworm pupae meal on growth performance, body composition, intestinal protease activity and health status in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. Jian)[J]. *Aquacult Res*, 2015, 46(5): 1209-1221.
- [46] 林建伟, 张春晓, 孙云章, 等. 鸡肉粉完全替代鱼粉饲料中补充包被氨基酸对凡纳滨对虾生长、体成分及组织氨基酸含量的影响[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(4): 700-711.