文章编号：1674-5566(2025)03-0562-13　　DOI：10. 12024/jsou. 20240504537

雌雄专用育肥饲料对中华绒螯蟹亚成体育肥性能、生理代谢和生化组成的影响

刘若晨[1,2,3]，朱筛成[1,2,3]，张光宝[1,2,3]，顾　伟[4]，向朝林[4]，邓　登[4]，赵金山[5]，吴旭干[1,2,3,5]

(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. 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心，上海　201306；3. 上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心，上海　201306；4. 深圳市澳华集团股份有限公司，广东 深圳　518054；5. 东营市惠泽农业科技有限公司，山东 东营　257503)

摘　要：中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)单性化养殖是一种具有推广潜力的养殖方式，基于雌雄营养需求配制雌雄专用饲料是实现精准投喂的重要前提。为了研究雌雄专用育肥饲料对雌、雄中华绒螯蟹亚成体养殖性能、生理代谢和生化组成的影响，采用2×2因子实验设计(2种饲料×2种性别)，在室外池塘围隔中开展了为期80 d的养殖实验，实验包括雄蟹投喂雄体专用饲料组、雄蟹投喂雌体专用饲料组、雌蟹投喂雌体专用饲料组和雌蟹投喂雄体专用饲料组(分别记为MM、MF、FF和FM)，每组各设置4个重复围隔。结果显示：饲料对雌雄蟹的生长、成活率、产量及饲料系数均无显著差异($P>0.05$)，而雌雄蟹性别之间生长、产量和饲料系数存在显著差异($P<0.05$)；FF组肝胰腺指数(HSI)和性腺指数(GSI)高于FM组，且在80 d时GSI差异显著($P<0.05$)；除FF组肝胰腺中的总脂含量显著高于FM组外($P<0.05$)，两种饲料对可食组织中的常规生化成分含量均无显著差异($P>0.05$)；就抗氧化和免疫指标而言，MM组肝胰腺中谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性显著高于其他各组($P<0.05$)，而FF组肝胰腺中的总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性最高；饲料和性别因素对血淋巴中酸性磷酸酶(ACP)活性均具有显著影响；就蛋白质和脂质代谢指标而言，MM组肝胰腺胰蛋白酶活性最高，脂肪酶活性最低；FF组肝胰腺中甘油三酯(TG)、血淋巴中总蛋白(TP)、TG、总胆固醇(TC)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)和高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量均最高。研究表明，雄蟹投喂雄体专用饲料可以提高抗氧化和免疫性能，促进蛋白质沉积；雌蟹投喂雌体专用饲料可以增加肝胰腺中的TG沉积，加速卵巢发育速度。综上，雌雄专用育肥饲料可提高河蟹雌雄分养条件下的育肥养殖效果，促进中华绒螯蟹雌雄单性化养殖技术的推广应用。

关键词：中华绒螯蟹；雌雄专用育肥饲料；生长；性腺发育；生理代谢

中图分类号：S 963. 71　　**文献标志码**：A

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)俗称河蟹，是我国重要的养殖经济蟹类之一，2022年全国养殖总量达8.15×10^5 t[1]。雌雄池塘混养是我国河蟹养殖的主要方式[2-3]，由于雌雄个体在成蟹养殖阶段的生长速度、蜕壳时间[3]、营养需求[4]、摄食行为[5]和上市时间[6-7]等方面均存在较大差异，因此中华绒螯蟹全雌或全雄养殖引起了产业界的广泛兴趣[8]。研究[2]表明，中华绒螯蟹雌雄分养(单性化养殖)可以提高养殖成活率和成蟹平均体质量，且有利于分批捕捞上市，具有较强的应用前景。

目前中华绒螯蟹雌雄分养关键养殖技术尚处于起步阶段，有限的研究主要集中在水草种植模式[9]、放养密度[10]和营养需求[4,11-12]等方面。中华绒螯蟹亚成体和性腺发育阶段，雌雄蟹饲料中的适合蛋白质水平分别为38%和42%左右[4]，饲

收稿日期：2024-05-05　　**修回日期**：2024-06-19

基金项目：上海市河蟹产业技术体系项目(沪农科产字〔2022〕第4号)；上海市崇明区农业科创项目(2022CNKC-01-05)；山东省东营市黄河三角洲产业领军人才项目(DYRC202100215)；深圳市澳华集团股份有限公司横向项目(2022310031003781)

作者简介：刘若晨(1999—)，男，硕士研究生，研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail：18503043615@163.com

通信作者：吴旭干，E-mail：xgwu@shou.edu.cn

料中适宜总脂含量分别为14%和10%左右，红球藻来源反式左旋虾青素最佳含量分别为60 mg/kg[11]和30 mg/kg[12]；进一步采用复合蛋白源替代雄蟹和雌蟹育肥饲料中的鱼粉，发现雌雄育肥饲料中的适宜鱼粉替代比例分别为33.33%和50.00%[13]。研究表明，中华绒螯蟹雌雄成体的营养需求存在较大差异，研发雌雄专用育肥饲料不仅有助于精准营养投喂，且能提高养殖效果。迄今为止，有关中华绒螯蟹雌雄专用饲料的研究主要是在室内实验条件下进行的单一营养素的研究，尚未见在室外池塘养殖条件下投喂雌雄专用育肥饲料的报道，这非常不利于中华绒螯蟹单性化养殖技术的提高和推广。

鉴于此，本研究在先前研究的基础上，基于雌雄成蟹的营养需求配制成雌雄专用育肥饲料，并在室外池塘养殖条件下投喂尚未生殖蜕壳的中华绒螯蟹亚成体，系统研究雌雄专用育肥饲料对中华绒螯蟹亚成体养殖性能、生理代谢、抗氧化、免疫性能和生化组成的影响，以期为中华绒螯蟹雌雄专用育肥饲料开发和应用提供科学依据和实践参考。

1　材料与方法

1.1　实验设计与饲料

本研究中所有样本采集、实验流程、研究方法均严格按照《上海海洋大学实验室动物伦理规范》和上海海洋大学伦理委员会制定的规章制度执行。

采用豆粕、菜粕、花生粕、鱼粉和鸡肉粉等作为主要蛋白源，采用磷脂油、鱼油和豆油作为主要脂肪源，采用破壁的雨生红球藻粉作为天然虾青素源。根据先前研究设定雌雄育肥饲料的主要营养参数[4,7,13-15]，配制成雌雄专用育肥饲料，其饲料配方及常规营养成分见表1。实验饲料由湖州海皇生物科技有限公司定制，为沉性膨化饲料，粒径和长度分别为3.0和4.5 mm，55 ℃干燥后装袋，于−20 ℃保存备用。

表1　实验饲料配方及常规营养成分

Tab. 1　Formulations of experimental diets and their proximate composition　　%

原料 Ingredient	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	原料 Ingredient	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet
豆粕 Soybean meal	11.00	10.00	多维预混料[2] Vitamin premix	0.60	0.60
发酵豆粕 Fermented soybean meal	12.00	11.00	氯化胆碱 Choline chloride (60%)	0.30	0.30
菜粕 Rapeseed meal	7.00	7.00	L−蛋氨酸 L−Methionine (50%)	0.22	0.20
花生粕 Peanut meal	5.00	5.00	维生素E Vitamin E	0.08	0
鱼粉 Fish meal	20.00	28.00	腐殖酸钠 Sodium humate (60%)	0.50	0.50
大豆浓缩蛋白 Soybean protein concentrate	0	2.00	雨生红球藻粉 *Haematococcus pluvialis* powder	0.20	0.10
鸡肉粉 Chicken meal	4.00	4.00	鱼油 Fish oil	3.50	0
南极磷虾粉 Antarctic krill meal	2.00	2.00	豆油 Soybean oil	3.50	1.00
酵母膏 Yeast extract	2.00	2.00	大豆磷脂油 Soy lecithin	3.00	1.00
喷雾干燥血球蛋白粉 Spray dried hemoglobin powder	0	2.50	常规营养成分 Proximate composition		
高筋面粉 Starch	15.60	15.80	水分 Moisture	10.29	10.48
谷朊粉 Wheat gluten	2.50	0	粗蛋白 Crude protein	39.26	44.71
米糠 Rice bran	5.00	5.00	总脂肪 Total lipid	15.16	10.21
矿物质预混料[1] Mineral premix	2.00	2.00	灰分 Ash	9.39	10.19

注：1. 矿物质预混料（mg/kg 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；磷酸二氢钙 15 000；2. 维生素预混料（mg/kg 饲料）：维生素A 125；维生素D_3 30；维生素E 1 050；维生素K_3 35.4；维生素B_1 100；维生素B_2 150；维生素B_6 150；维生素B_{12} 0.2；维生素C 1 050；生物素 4；D−泛酸钙 250；叶酸 25；烟酰胺 300。

Notes：1. Mineral mixture（mg/kg diet）：$FeSO_4 \cdot H_2O$ 200；$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 96；$ZnSO_4 \cdot H_2O$ 360；$MnSO_4 \cdot H_2O$ 120；$MgSO_4 \cdot H_2O$ 240；KH_2PO_4 4 200；NaH_2PO_4 500；KI 5.4；$CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 2.1；Na_2SeO_3 3；$Ca(H_2PO_4)_2$ 15 000；2. Vitamin mixture（mg/kg diet）：retinol acetate 125；cholecalciferol 30；alpha−tocopherol 1 050；menadione 35.4；thiamine 100；riboflavin 150；Vitamin B_6 150；vitamin B_{12} 0.2；ascorbic acid 1 050；biotin 4；D−calcium pantothenate 250；folic acid 25；nicotinamide 300.

1.2 实验设计与养殖管理

实验用蟹取自上海海洋大学崇明基地，挑选附肢健全、活力较好的雌、雄亚成体蟹用于养殖实验。雌、雄蟹初始平均体质量分别为(85.51±0.54)和(108.46±0.45) g。养殖实验在4个室外土池(长×宽×高=15.5 m×8.0 m×1.2 m)中进行，每个池塘中均设置4个规格一致(面积为26 m^2)且相互独立的网围。为防止各网围中河蟹混杂、逃逸及敌害生物进入，网围上沿内外均缝制双层光滑塑料板(长度20 cm)，围网底部使用砖块包裹网片后埋入土下30 cm。

实验采用2×2因子设计，共分为4组，单养雌体组投喂雌蟹专用育肥料(记为FF组)和雄蟹专用育肥料(记为FM组)，单养雄体组投喂雌蟹专用育肥料(记为MF组)和雄蟹专用育肥料(记为MM组)，每个实验组重复4个网围，共计16个网围。2022年7月中旬采用漂白粉对实验水泥池进行消毒，两周后在网围底部种植伊乐藻(*Elodea nuttallii*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)等沉水植物作为蟹的隐蔽场所，水面固定放置少量空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*，俗称水花生)，水生植物覆盖率为40%~60%。8月中旬投放实验蟹，每个网围根据实验设计随机投放40只蟹，经过一周适应暂养后正式开始实验，养殖实验周期为80 d。

实验期间每日18:00投喂实验饲料，初始投喂量占蟹体质量的2%~4%，根据饵料残留和蟹生长情况逐步调整投喂量。定期清除过多的水生植物，防止其疯长造成水体缺氧和妨碍饲料投喂。网围底部放置纳米增氧盘，夜间及阴雨天开启增氧设备对各围网进行增氧。每周测定1次水体亚硝酸盐和氨氮，每日测定水体pH和溶解氧，根据水质指标适当换水或补充新水。水质指标：pH 7.0 ~ 9.0；溶氧> 4 mg/L；氨氮< 0.5 mg/L；亚硝酸盐< 0.15 mg/L。

1.3 样品采集

在实验40 d时，停止投喂饲料1 d，开始采集解剖。每实验组随机采样8只蟹，干毛巾擦干蟹体表水分后，使用电子天平称重(精确度=0.01 g)，据此计算平均体质量、增重率(Weight gain rate，WGR)和特定生长率(Specific growth rate，SGR)；然后用1.0 mL无菌注射器从第三步足基部抽取血淋巴后，分别注入2个2 mL无菌离心管中，于−40 ℃保存用于后续血淋巴中营养物质代谢、抗氧化和免疫指标分析；将头胸甲与躯体分开，取出全部性腺和肝胰腺，并准确称重，用于计算第40天的性腺指数(Gonadosomatic index，GSI)和肝胰腺指数(Hepatosomatic index，HSI)，将肝胰腺装入自封袋于−40 ℃保存，用于后续生理代谢指标分析。

$$R_{WGR} = (W_t - W_{t-1})/W_{t-1}\times100\% \quad (1)$$

$$R_{SGR} = (\ln W_t-\ln W_{t-1})/D\times100\% \quad (2)$$

$$I_{GSI} = W_g/W\times100\% \quad (3)$$

$$I_{HSI} = W_h/W\times100\% \quad (4)$$

式中：R_{WGR}为增重率，%；R_{SGR}为特定生长率，%；I_{GSI}为性腺指数，%；I_{HSI}为肝胰腺指数，%；W_t和W_{t-1}分别为t和t−1月的平均体质量，g；D为采样的间隔天数，d；W_g和W_h分别为采样性腺和肝胰腺质量，g；W为采样蟹质量，g。

在实验80 d时结束实验，停食1 d。排干池水后捕捞全部成蟹，称重并统计各实验组成活数量，据此计算平均体质量、WGR、SGR、成活率(Survival rate，SR)、单位产量(Yield，g/m^2)及饲料系数(Feed conversion rate，FCR)。每实验组随机采样8只蟹，解剖取出肝胰腺、性腺和肌肉后称重，计算GSI、HSI、出肉率(Meat yield，MY)和总可食用率(Total edible yield，TEY)。将肝胰腺、性腺和肌肉样品保存于−20 ℃中后续用于常规生化测定。

$$R_{FCR} = W_d/(W_f - W_0) \quad (5)$$

$$Y_{MY} = W_m/W\times100\% \quad (6)$$

$$Y_{TEY} = I_{GSI}+I_{HSI}+Y_{MY} \quad (7)$$

式中：R_{FCR}为饲料系数；Y_{MY}为出肉率，%；Y_{TEY}为总可食用率，%；W_d为各实验组总消耗饲料量，g；W_f为各组实验蟹总质量，g；W_0为实验初的蟹总质量，g；W_m为肌肉质量，g。

1.4 生理指标测定

称取0.2 g左右肝胰腺湿样，加入1 mL预冷的生理盐水，采用微型匀浆器IKA匀浆30 s后，立即在4 ℃、12 000 r/min条件下离心20 min，并取中层清液再次离心后，取中间清液用于后续抗氧化、免疫和营养物质代谢指标分析。血淋巴样品在常温下解冻后，用IKA匀浆器匀浆30 s，于4 ℃、12 000 r/min条件下离心20 min，取上清液备用。准确称取0.1 g肝胰腺冻干样品，按照FOLCH等[16]的方法提取总脂，所得总脂用甲醇定容至2 mL，用于甘油三酯(TG)和总胆固醇(TC)含量的测定。

血清中的血蓝蛋白（Hc）含量根据NICKERSON等[17]的方法测定，低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）和高密度脂蛋白胆固醇（HLD-C）采用苏州科铭生物技术有限公司所生产的试剂盒测定，总抗氧化能力（T-AOC）、谷胱甘肽过氧化物酶（GSH-Px）、超氧化物歧化酶（T-SOD）、丙二醛（MDA）等抗氧化指标，碱性磷酸酶（AKP）、酸性磷酸酶（ACP）、谷草转氨酶（GOT）、谷丙转氨酶（GPT）等免疫相关酶和胰蛋白酶（Trypsin）、脂肪酶（Lipase）、游离氨基酸（TAA）和尿素氮（BUN）等生理代谢指标均采用南京建成生物试剂盒进行测定。

1.5　生化组成分析

参照AOAC[18]的标准方法，实验饲料中水分含量采用105 ℃烘干法测定，成蟹组织中的水分含量采用冷冻干燥法测定；实验饲料和成蟹组织中的粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定；灰分含量采用550 ℃灼烧法测定。参考FOLCH等[16]的方法提取饲料和成蟹组织中的总脂并测定其含量。

1.6　数据分析

采用SPSS 27.0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（Mean±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。采用双因素方差分析（Two-way ANOVA）检验性别与饲料对各项指标间交互作用，当主因素或相互作用显著时，用单因素方差分析（One-way ANOVA）检验各试验组间的差异。所有分析取$P<0.05$为差异显著。

2　结果

2.1　雌雄专用育肥饲料对亚成体生长、成活率及产量的影响

如表2所示，在生长性能和养殖效果中，实验蟹成活率未受性别和饲料影响（$P>0.05$）。双因素方差分析发现，性别和饲料对实验蟹生长性能及养殖效果无显著交互作用（$P>0.05$）；未发现饲料影响其生长性能及养殖效果（$P>0.05$），但雌、雄蟹的体质量、80 d增重率和特定生长率、产量及饵料系数存在显著差异（$P<0.05$）。单因素方差分析表明，在性别相同的情况下，MM组80 d增重率及特定生长率高于MF组，FF组80 d增重率及特定生长率高于FM组，但差异均不显著（$P>0.05$）；在投喂同种饲料情况下，雄蟹两组体质量、80 d增重率和特定生长率均显著高于雌蟹两组（$P<0.05$），而雌、雄蟹产量及饵料系数差异不显著（$P>0.05$）。

表2　雌、雄蟹专用育肥料对中华绒螯蟹亚成体生长、存活及养殖效果的影响

Tab. 2　Effects of gender-specific fattening diets on growth, survival, and culture effect of pre-adult *E. sinensis*

项目 Items	雄蟹 Male		雌蟹 Female		双因素方差分析 Two-way ANOVA		
	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	性别 Sex	饲料 Diet	性别×饲料 Sex×Diet
初始体质量 IBW/g	108.39±0.27	107.71±0.22	84.82±0.37	84.19±0.71	–	–	–
第40天体质量 BW_{40}/g	191.22±4.39^a	188.51±7.97^a	148.25±6.37^b	144.14±5.93^b	<0.001	0.592	0.912
1~40天增重率 WGR_{40}/%	76.42±4.07	74.98±7.24	74.83±7.64	71.18±6.75	0.685	0.701	0.868
1~40天特定生长率 SGR_{40}/(%/d)	1.41±0.06	1.38±0.10	1.38±0.11	1.33±0.10	0.651	0.670	0.901
第80天体质量 BW_{80}/g	226.43±2.85^a	219.91±2.06^a	160.37±4.43^b	164.68±1.60^b	<0.001	0.716	0.090
1~80天增重率 WGR_{80}/%	107.61±1.58^a	104.17±1.85^{ab}	89.16±6.14^c	95.65±1.76^{bc}	0.001	0.648	0.152
1~80天特定生长率 SGR_{80}/(%/d)	0.91±0.01^a	0.89±0.01^{ab}	0.79±0.04^c	0.84±0.01^{bc}	0.002	0.649	0.166
成活率 SR/%	62.50±3.95	61.88±2.58	60.00±13.81	66.25±9.87	0.913	0.743	0.689
单位产量 Yield/(g/m^2)	182.73±12.29	175.71±8.39	125.23±29.86	139.27±20.15	0.027	0.855	0.586
饲料系数 FCR	2.64±0.09	2.77±0.09	3.13±0.29	2.99±0.02	0.038	0.991	0.412

注：同行数据不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

Notes: Values with different letters within the same row are significantly different ($P<0.05$).

2.2　雌雄专用育肥饲料对性腺指数和可食率的影响

如表3所示，实验蟹80 d HSI和总可食用率未受性别和饲料的影响（$P>0.05$）。双因素方差分析发现，性别和饲料对实验蟹性腺指数和可食率无显著交互作用（$P>0.05$）；未发现饲料影响其

性腺指数和可食率(P>0.05),但雌、雄蟹的40 d肝胰腺指数和性腺指数、80 d性腺指数、出肉率存在显著差异(P<0.05)。单因素方差分析表明,在性别相同的情况下,FF组80 d性腺指数显著高于FM组(P<0.05);在投喂同种饲料的情况下,雌蟹两组40 d和80 d性腺指数均显著高于雄蟹两组(P<0.05),雄蟹两组出肉率均显著高于雌蟹两组(P<0.05)。

表3 雌、雄蟹专用料对中华绒螯蟹亚成体性腺发育和可食率的影响

Fig. 3 Effects of gender-specific fattening diets on fattening performance of pre-adult *E. sinensis*

项目 Items	雄蟹 Male		雌蟹 Female		双因素方差分析 Two-way ANOVA		
	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	性别 Sex	饲料 Diet	性别×饲料 Sex×Diet
第40天							
肝胰腺指数 HSI/%	7.63±0.62^{b}	7.97±0.34^{b}	9.00±0.55^{ab}	10.46±0.50^{a}	0.001	0.090	0.282
性腺指数 GSI/%	1.31±0.08^{b}	1.16±0.07^{b}	2.72±0.45^{a}	2.82±0.15^{a}	<0.001	0.928	0.607
第80天							
肝胰腺指数 HSI/%	6.69±0.23	6.58±0.25	5.99±0.40	6.67±0.24	0.394	0.205	0.244
性腺指数 GSI/%	3.51±0.29^{c}	3.66±0.23^{c}	10.07±0.59^{b}	11.16±0.22^{a}	<0.001	0.090	0.190
出肉率 MY/%	32.18±0.55^{a}	32.25±0.81^{a}	27.57±0.99^{b}	25.79±0.58^{b}	<0.001	0.259	0.225
总可食用率 TEY/%	42.46±0.52	42.41±0.69	43.63±0.55	44.03±0.54	0.072	0.692	0.755

注:同行数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Notes: Values with different letters within the same row are significantly different (P<0.05).

2.3 雌雄专用育肥饲料对成体可食组织常规营养组成的影响

如表4所示,在可食组织常规营养组成中,实验蟹肝胰腺水分、粗蛋白以及肌肉各项指标未受性别和饲料的影响(P>0.05)。双因素方差分析发现,性别和饲料对实验蟹肝胰腺总脂肪具有显著交互作用(P<0.05),对肝胰腺水分、灰分及性腺各项指标无显著交互作用(P>0.05),且未发现饲料影响其各项可食组织营养组成(P>0.05),但雌、雄蟹肝胰腺总脂肪、灰分及性腺各项指标存在显著差异(P<0.05)。单因素方差分析表明,在性别相同的情况下,FF组肝胰腺总脂肪显著高于FM组(P<0.05);在投喂相同饲料的情况下,投喂雌蟹专用料雌蟹肝胰腺总脂肪显著高于雄蟹(P<0.05),雄蟹两组肝胰腺灰分、性腺水分及灰分显著高于雌蟹两组(P<0.05),雌蟹两组性腺粗蛋白及总脂肪显著高于雄蟹两组(P<0.05)。

2.4 雌雄专用育肥饲料对成体抗氧化能力及免疫性能的影响

如表5所示,在肝胰腺抗氧化和免疫指标中,实验蟹总抗氧化能力、总超氧化物歧化酶、丙二醛及碱性磷酸酶含量未受性别和饲料的影响(P>0.05)。双因素方差分析发现,性别和饲料对实验蟹肝胰腺各项抗氧化和免疫指标无显著交互作用(P>0.05);饲料对其谷胱甘肽过氧化物酶含量影响显著(P<0.05);雌、雄蟹酸性磷酸酶含量存在显著差异(P<0.05)。单因素方差分析表明,在性别相同的情况下,MM组谷胱甘肽过氧化物酶含量显著高于MF组(P<0.05);在投喂相同饲料的情况下,雄蟹两组酸性磷酸酶含量均高于雌蟹两组,但差异不显著(P>0.05)。

如表6所示,在血淋巴抗氧化和免疫指标中,实验蟹超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶、丙二醛、血蓝蛋白含量未受性别和饲料的影响(P>0.05)。双因素方差分析发现,性别和饲料对实验蟹血淋巴碱性磷酸酶含量有显著交互作用(P<0.05);饲料对其酸性磷酸酶含量影响显著(P<0.05);雌、雄蟹在总抗氧化能力、碱性磷酸酶、酸性磷酸酶含量存在显著差异(P<0.05)。单因素方差分析表明,在性别相同的情况下,MM组碱性磷酸酶含量显著高于MF组(P<0.05),FF组酸性磷酸酶含量显著高于FM组(P<0.05);在投喂相同饲料的情况下,投喂雄性专用料雄蟹碱性磷酸酶含量显著高于雌蟹(P<0.05),投喂雄性专用料酸性雌蟹磷酸酶含量显著高于雄蟹(P<0.05)。

表4　雌、雄蟹专用料对中华绒螯蟹成体可食组织中常规营养组成的影响(湿质量)

Tab. 4　Effects of gender-specific fattening diets on the proximate composition of edible parts of adult *E. sinensis* (wet mass)

%

项目 Items	雄蟹 Male		雌蟹 Female		双因素方差分析 Two-way ANOVA		
	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	性别 Sex	饲料 Diet	性别×饲料 Sex×Diet
肝胰腺 Hepatopancreas							
水分 Moisture	61.15±3.75	58.3±1.66	58.72±3.02	51.09±2.58	0.107	0.412	0.081
粗蛋白 Crude protein	9.59±0.43	9.17±0.29	9.26±0.37	9.44±0.22	0.924	0.385	0.715
总脂肪 Total lipids	26.03±1.53[b]	30.62±1.58[b]	30.64±1.90[b]	37.66±1.82[a]	0.003	0.486	0.003
灰分 Ash	1.40±0.03[a]	1.37±0.07[a]	1.14±0.03[b]	1.20±0.06[b]	0.001	0.390	0.862
性腺 Gonads							
水分 Moisture	73.37±0.45[a]	72.54±0.34[a]	49.32±0.59[b]	48.86±0.18[b]	<0.001	0.397	0.701
粗蛋白 Crude protein	18.69±0.24[b]	19.36±0.33[b]	33.79±0.11[a]	33.69±0.01[a]	<0.001	0.106	0.219
总脂肪 Total lipids	0.92±0.06[b]	0.74±0.02[b]	15.39±0.17[a]	15.59±0.17[a]	<0.001	0.167	0.937
灰分 Ash	1.95±0.04[a]	2.05±0.04[a]	1.11±0.06[b]	1.16±0.06[b]	<0.001	0.717	0.147
肌肉 Muscle							
水分 Moisture	77.86 ± 0.15	78.12±0.16	77.76±0.13	77.55±0.62	0.499	0.962	0.632
粗蛋白 Crude protein	19.96 ± 0.45	19.36±0.04	19.90±0.11	19.34±0.59	0.908	0.160	0.955
总脂肪 Total lipids	1.11±0.01	1.12±0.03	1.12±0.04	1.20±0.06	0.311	0.311	0.384
灰分 Ash	1.07±0.06	1.10±0.03	1.21±0.01	1.18±0.02	0.059	0.965	0.694

注：同行数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Notes: Values with different letters within the same row are significantly different (P<0.05).

表5　雌、雄蟹专用料对中华绒螯蟹成体肝胰腺中抗氧化和免疫指标的影响

Tab. 5　Effects of gender-specific fattening diets on the hepatopancreas antioxidant and immunity parameters of adult *E. sinensis*

项目 Items	雄蟹 Male		雌蟹 Female		双因素方差分析 Two-way ANOVA		
	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	性别 Sex	饲料 Diet	性别×饲料 Sex×Diet
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mg prot)	5.56±0.58	6.53±0.68	5.28±1.06	4.66±0.66	0.260	0.974	0.434
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot)	7.06±1.12	8.33±2.07	7.68±1.17	9.84±1.76	0.627	0.243	0.907
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot)	157.13±28.95[a]	83.86±10.99[b]	140.95±14.21[ab]	110.06±19.64[ab]	0.810	0.020	0.314
丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	3.27±0.39	2.90±0.45	3.14±0.20	2.76±0.39	0.964	0.271	0.858
碱性磷酸酶 AKP/(U/mg prot)	58.62±3.04	59.04±3.52	48.20±8.32	59.85±12.72	0.572	0.479	0.510
酸性磷酸酶 ACP/(U/mg prot)	30.47±4.85[a]	23.27±5.17[ab]	21.35±2.22[ab]	13.71±1.75[b]	0.026	0.091	0.897

注：同行数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Notes: Values with different letters within the same row are significantly different (P<0.05).

2.5　雌雄专用育肥饲料对成体蛋白质及脂质代谢的影响

如表7所示，在肝胰腺蛋白质和脂质代谢中，实验蟹谷丙转氨酶、谷草转氨酶、总胆固醇含量未受性别和饲料影响(P>0.05)。双因素方差分析发现，性别和饲料对实验蟹脂肪酶具有显著交互作用(P<0.05)；饲料对其甘油三酯具有显著影响(P<0.05)；雌、雄蟹胰蛋白酶具有显著差异(P<0.05)。单因素方差分析表明，在性别相同的情况下，MF组脂肪酶含量显著高于MM组(P<0.05)，FF组甘油三酯含量显著高FM组(P<0.05)；在投喂相同饲料的情况下，雄蟹两组胰蛋白酶含量显著高于雌蟹两组(P<0.05)，投喂雄性专用料雌蟹脂肪酶含量显著高于雄蟹(P<0.05)。

如表8所示，在血淋巴蛋白质和脂质代谢中，实验蟹总蛋白、游离氨基酸、谷丙转氨酶及谷草转氨酶含量未受性别和饲料的影响(P>0.05)。双因素方差分析发现，性别和饲料对实验蟹高密度脂

蛋白胆固醇含量有显著交互作用(P<0.05);饲料对其尿素氮和甘油三酯含量有显著影响(P<0.05);雌、雄蟹在甘油三酯、总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇含量存在显著差异(P<0.05)。单因素方差分析表明,在性别相同的情况下,FM组尿素氮含量显著高于FF组(P<0.05),FF组高密度脂蛋白胆固醇含量显著高于FM组(P<0.05);在饲料相同的情况下,投喂雄性专用料雌蟹尿素氮、高密度脂蛋白胆固醇含量显著高于雄蟹,雌蟹两组甘油三酯及总胆固醇含量显著高于雄蟹两组。

表6 雌、雄蟹专用料对中华绒螯蟹成体血淋巴中抗氧化和免疫指标的影响
Tab. 6 Effects of gender-specific fattening diets on the serum antioxidant and immunity parameters of adult *E. sinensis*

项目 Items	雄蟹 Male		雌蟹 Female		双因素方差分析 Two-way ANOVA		
	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	性别 Sex	饲料 Diet	性别×饲料 Sex×Diet
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	5.21±0.67	5.99±0.43	5.74±0.28	4.30±0.82	0.045	0.098	0.097
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mL)	442.47±9.97	406.45±18.37	427.84±15.40	393.63±24.33	0.523	0.128	0.938
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mL)	405.00±54.27	531.43±39.15	610.00±80.97	691.43±103.63	0.050	0.129	0.791
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	5.21±0.77	5.82±0.96	6.17±1.07	5.00±0.63	0.775	0.443	0.860
碱性磷酸酶 AKP/(U/100 mL)	2.82±0.35^{a}	1.75±0.28^{b}	1.09±0.17^{b}	1.69±0.14^{b}	0.009	0.454	0.016
酸性磷酸酶 ACP/(U/100 mL)	0.93±0.17^{b}	1.23±0.13^{b}	1.42±0.19^{b}	2.50±0.26^{a}	0.007	0.020	0.052
血蓝蛋白 Hc/(mg/mL)	39.51±4.33	37.10±3.83	45.46±2.68	43.41±4.23	0.567	0.124	0.962

注:同行数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。
Notes: Values with different letters within the same row are significantly different (P<0.05).

表7 雌、雄蟹专用料对中华绒螯蟹成体肝胰腺中蛋白质和脂质代谢生理指标的影响
Tab. 7 Effects of gender-specific fattening diets on the hepatopancreas protein and lipid metabolism of adult *E. sinensis*

项目 Items	雄蟹 Male		雌蟹 Female		双因素方差分析 Two-way ANOVA		
	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	性别 Sex	饲料 Diet	性别×饲料 Sex×Diet
谷丙转氨酶 GPT/(U/mg prot)	4.81±0.62	4.40±0.70	5.44±1.16	5.01±1.29	0.506	0.635	0.945
谷草转氨酶 GOT/(U/mg prot)	4.63±0.79	4.60±0.72	4.65±0.43	4.86±0.66	0.902	0.844	0.922
胰蛋白酶 Trypsin/(U/μg prot)	5.63±0.55^{a}	5.07±0.37^{ab}	3.98±0.22^{bc}	3.15±0.38^{c}	0.001	0.062	0.983
脂肪酶 Lipase/(μmol/min/mg prot)	1.98±0.08^{b}	2.66±0.11^{a}	2.51±0.10^{a}	2.44±0.25^{a}	0.140	0.132	0.027
甘油三酯 TG/(μmol/g)	75.89±6.91^{b}	84.62±2.75^{ab}	69.70±5.70^{b}	92.20±3.22^{a}	0.560	0.021	0.379
总胆固醇 TC/(μmol/g)	9.11±0.45	9.22±1.31	9.57±1.37	10.42±2.06	0.405	0.306	0.676

注:同行数据不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。
Notes: Values with different letters within the same row are significantly different (P<0.05).

3 讨论

3.1 雌雄专用育肥饲料对中华绒螯蟹生长、育肥性能的影响

蛋白质是水产动物重要的营养物质之一。过低的饲料蛋白水平会导致蛋白质合成代谢能力降低,抑制动物生长[19],过高的饲料蛋白水平则会导致蛋白质分解代谢增加,含氮代谢产物的排放增多,不仅会造成蛋白质的浪费而且还会导致养殖环境恶化,最终对动物生长发育造成不利影响[20]。在本研究中饲料相同的情况下雄蟹两组在育肥80 d后体质量、增重率以及特定生长率均要高于雌蟹两组,导致生殖蜕壳后的雌雄中华绒螯蟹生长差异显著,这与倪国彬等[21]的研究结果一致。此外,尽管雌蟹投喂雌性专用料、雄蟹投喂雄性专用料时表现出一定的生长优势,但在最终养殖效果方面饲料对各组没有显著影响。

表 8　雌、雄蟹专用料对中华绒螯蟹成体血淋巴中蛋白质和脂质代谢生理指标的影响

Tab. 8　Effects of gender-specific fattening diets on the serum protein and lipid metabolism of adult *E. sinensis*

项目 Items	雄蟹 Male		雌蟹 Female		双因素方差分析 Two-way ANOVA		
	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	雄蟹专用料 Male diet	雌蟹专用料 Female diet	性别 Sex	饲料 Diet	性别×饲料 Sex×Diet
总蛋白 TP/(mg/mL)	53.25±8.36	41.95±4.50	56.89±7.15	66.45±7.04	0.303	0.393	0.178
游离氨基酸 T-AA/(μmol/mL)	15.14±1.48	14.12±0.93	14.46±0.31	13.78±0.44	0.848	0.571	0.713
尿素氮 BUN/(mmol/L)	3.24±0.32[b]	2.62±0.20[b]	4.04±0.23[a]	2.58±0.28[b]	0.517	0.004	0.439
谷丙转氨酶 GPT/(U/mL)	6.35±0.66	7.25±0.13	6.57±0.36	6.66±0.60	0.706	0.786	0.973
谷草转氨酶 GOT/(U/mL)	11.01±1.11	12.52±0.95	10.43±2.23	11.04±1.20	0.543	0.812	0.813
甘油三酯 TG/(μmol/L)	302.99±21.89[b]	343.55±30.81[b]	436.68±20.88[a]	450.14±37.85[a]	<0.001	0.019	0.586
总胆固醇 TC/(μmol/L)	484.08±59.37[b]	537.33±44.21[b]	714.51±59.81[a]	784.21±35.97[a]	0.001	0.343	0.826
低密度脂蛋白胆固醇 LDL-C/(μmol/L)	355.06±41.40[c]	387.48±40.45[bc]	536.64±82.21[ab]	612.84±48.18[a]	0.009	0.517	0.607
高密度脂蛋白胆固醇 HDL-C/(μmol/L)	118.37±5.80[ab]	104.17±4.73[b]	104.17±16.58[b]	151.52±9.47[a]	0.241	0.241	0.039

注：同行数据不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Notes: Values with different letters within the same row are significantly different ($P<0.05$).

中华绒螯蟹完成生殖蜕壳后性腺开始迅速发育，但在土池条件下雌雄性腺发育的时间并不同步，通常认为雌蟹生殖蜕壳时间早于雄蟹[22]。在本研究中，育肥 40 d 后雌蟹肝胰腺指数、性腺指数均高于雄蟹，且在育肥 80 d 后雌雄蟹肝胰腺指数迅速下降，性腺指数则大幅度上升。研究[23]表明，中华绒螯蟹在育肥期间积累在肝胰腺中的营养物质会持续转移到性腺中，促进性腺发育，从而导致肝胰腺指数下降。投喂雌性专用料对于雌蟹性腺发育有显著影响，一方面是因为雌性专用料中鱼油含量较高，而鱼油中富含的高度不饱和脂肪酸，对雌蟹亚成体性腺发育具有促进作用[24]；另一方面，对于育肥期间的雌蟹，雄性专用料中蛋白质含量偏高，较高的蛋白质含量会增加中华绒螯蟹氨基酸代谢负担[4]，可能导致肝胰腺和性腺之间营养物质转运效率降低，性腺发育减慢[25]。

3.2　雌雄专用育肥饲料对中华绒螯蟹可食组织常规营养成分的影响

肝胰腺、性腺和肌肉作为中华绒螯蟹重要的可食部分，其生化组成是评价河蟹营养价值的重要指标。吴仁福等[26]研究发现，由鱼油、豆油和磷脂油组成的混合脂肪源促进了中性脂肪在肝胰腺中的沉积，而杨家岳等[27]研究结果表明脂肪水平的提高对肌肉粗脂肪含量无显著影响。这与本研究结果基本一致，对于雌蟹，摄食雌性专用料组其肝胰腺中总脂肪含量显著高于摄食雄性专用料组，但在肌肉组织中两者无显著差异，这暗示肌肉中的常规营养组成具有一定的保守性，以维持肌肉组织的正常生理功能，如运动和保护内脏器官等。育肥 80 d 后，雌蟹性腺中粗蛋白、总脂肪含量均显著高于雄蟹，具有较高的营养价值，这与雄蟹性腺中较高的水分含量有关。此外，相比于雄蟹，雌蟹在性腺快速发育期需要进行大量能量物质储备，以供后续越冬和繁殖的需要[28]。

3.3　雌雄专用育肥饲料对中华绒螯蟹抗氧化及免疫性能的影响

总抗氧化能力(T-AOC)和总超氧化物歧化酶(T-SOD)均为评价甲壳动物抗氧化性能的重要指标[29-31]。在本研究中，各组间雌、雄蟹肝胰腺和血淋巴中总抗氧化能力和总超氧化物歧化酶活性均较高，推测与育肥饲料中提供了丰富的虾青素有关。谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)可以促进过氧化氢与还原型谷胱甘肽反应从而清除氧自由基，以起到保护细胞膜结构和功能完整[32]。本实验中在性别相同的情况下投喂雄性专用料的中华绒螯蟹肝胰腺 GSH-Px 含量显著高于投喂雌性专用料，推测由于雄蟹料鱼粉含量较高因而饲料中硒元素含量较高[33]，而硒元素是 GSH-Px 重要的组成成分[34]，这可能促进雄蟹料组河蟹体内谷胱甘肽过氧化物酶合成。

酸性磷酸酶(ACP)和碱性磷酸酶(AKP)在甲壳动物新陈代谢和免疫系统中起重要作用[35]。ACP 是溶酶体的组成部分，在细胞进行吞噬和包囊反应中 ACP 会释放到血清中，反映

机体免疫水平[36]。AKP能够催化有机单磷酯水解,产生无机磷酸有利于钙、磷的转运,促进营养物质的吸收与释放[37]。崔培等[38]以不同蛋白水平的虾青素饲料投喂锦鲤(*Cyprinus carpio*)时发现,鱼体内的AKP随着饲料中蛋白质含量的提高逐步上升。这与本研究结果类似,雄蟹投喂雄料组血清中的AKP含量最高。SUN等[39]研究发现,过低的饲料脂质水平降低抗氧化酶活性并影响脂质代谢途径,与本研究结果类似,雌蟹投喂雌性料血清中的ACP含量最高,这说明较高的脂质水平能够提高抗氧化酶活性,增强河蟹免疫性能。

3.4 雌雄专用育肥饲料对中华绒螯蟹蛋白质和脂质代谢的影响

谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)是动物体内两种重要的转氨酶,其活力的高低反映肝功能受损情况[40],通常肝脏受损后会释放到血清中[41]。有研究[4]表明亚成体中华绒螯蟹饲料中蛋白质含量较低会影响体内氨基酸沉积,蛋白质含量高于32.3%则会加速河蟹体内氨基酸代谢,增加氨基酸沉积。范陈伟等[42]研究发现,随着饲料蛋白质水平提高,体内GOT和GPT也随之上升。本研究中,两种饲料组的中华绒螯蟹体内GOT和GPT没有显著差异,说明两种饲料蛋白质含量处在中华绒螯蟹较为适宜的水平,使中华绒螯蟹既不会降低其氨基酸代谢活力,也不会因长期摄入高蛋白导致中华绒螯蟹肝脏受损。中华绒螯蟹肝胰腺中胰蛋白酶,血清中总蛋白和游离氨基酸含量的高低能够有效反映体内蛋白质消化吸收水平[43]。血清尿素氮是反映动物体内蛋白质代谢的重要指标,通常尿素氮含量与饲料蛋白利用率呈负相关[44],本研究中雌蟹投喂雄料组尿素氮含量显著高于雌料组,说明饲料中较多的蛋白质被氧化代谢,造成了蛋白质的浪费。

脂肪酶(Lipase)能够催化脂质水解释放出游离脂肪酸供机体储存或氧化供能,在脂质代谢过程中起重要作用[45]。赵磊等[40]研究发现,低水平混合植物油替代鱼油导致中华绒螯蟹机体中脂肪酶含量较低,然而随着替代水平上升,脂肪酶含量也逐步提高。与本研究结果类似,雄蟹投喂雌蟹料体内脂肪酶含量显著高于投喂雄蟹料,肝胰腺中TG的含量是甲壳动物脂类营养的重要指标,本研究中雌蟹投喂雌性料组肝胰腺中的TG含量显著高于雄蟹料组,较高的TG积累能够促进肝胰腺发育[46],雌蟹投喂雌性料HSI略高于雄性料也印证了这一点。雌蟹投喂雌蟹料TC、LDL-C、HDL-C均高于雄性料,虾蟹类体内缺乏将乙酸合成胆固醇的能力,需要从外源饵料中补充胆固醇,再通过血淋巴转运到其他组织[47],其中血淋巴中主要的脂蛋白LDL-C和HDL-C在转运胆固醇过程中起着重要作用[48],这暗示提高饲料中脂肪添加量有利于雌蟹对胆固醇吸收利用。

4 结论

雄蟹投喂雄性专用育肥饲料能够提高雄体抗氧化和免疫性能,促进蛋白质沉积。对于雌蟹而言,投喂雌性专用育肥饲料可以有效提高机体抗氧化和免疫能力,促进卵巢发育,增加雌体肝胰腺中的甘油三酯含量。综上所述,基于雌雄中华绒螯蟹育肥期间的营养需求,制成的雌雄专用育肥饲料可提高河蟹雌雄分养条件下的育肥养殖效果,促进中华绒螯蟹雌雄单性化养殖技术的推广应用。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

[1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2023[M]. 北京:中国农业出版社,2023.
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. 2023 China fishery statistical year book[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2023.

[2] 葛永春,吴旭干,姜晓东,等. 河蟹雌雄分养对其亚成体养殖性能和性腺发育的影响[J]. 上海海洋大学学报,2017,26(2):221-226.
GE Y C, WU X G, JIANG X D, et al. Effects of mono-sex culture on the culture performance and gonad development of pre-adult *Eriocheir sinensis*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(2): 221-226.

[3] 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.
HE J, WU X G, ZHAO H L, et al. Growth performance and gonadal development of pond-reared Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) fed formulated diets during the whole culture process[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(3): 606-618.

[4] ZHU S C, LONG X W, TURCHINI G M, et al.

Towards defining optimal dietary protein levels for male and female sub-adult Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* reared in earthen ponds: performances, nutrient composition and metabolism, antioxidant capacity and immunity[J]. Aquaculture, 2021, 536: 736442.

[5] 刘文明，朱筛成，赵金山，等. 不同发育阶段中华绒螯蟹摄食行为及其对饵料的选择性[J]. 上海海洋大学学报，2024，33(2)：327-340.
LIU W M, ZHU S C, ZHAO J S, et al. Feeding behavior and feeding selectivity on the different feeds of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) at different development stages[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(2): 327-340.

[6] WU X G, ZHU S C, ZHANG H C, et al. Fattening culture improves the gonadal development and nutritional quality of male Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*[J]. Aquaculture, 2020, 518: 734865.

[7] LONG X W, GUO Q, WANG X C, et al. Effects of fattening period on ovarian development and nutritional quality of adult female Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*[J]. Aquaculture, 2020, 519: 734748.

[8] 张光宝，姜晓东，陈文彬，等. 水草种植模式对全雄中华绒螯蟹成蟹养殖性能和经济效益的影响[J]. 南方水产科学，2023，19(2)：107-115.
ZHANG G B, JIANG X D, CHEN W B, et al. Effect of submerged macrophytes planting mode on performance and economic profit of all-male adult *Eriocheir sinensis* culture[J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(2): 107-115.

[9] 张光宝，姜晓东，庄振俊，等. 中华绒螯蟹“长荡湖 1 号”新品系选育第二代(G2)生长、性腺发育和养殖性能的研究[J]. 海洋与湖沼，2023，54(5)：1444-1453.
ZHANG G B, JIANG X D, ZHUANG Z J, et al. Evaluation on growth, gonadal development, and culture performance of “Changdang Lake 1” new stain of second-generation of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2023, 54(5): 1444-1453.

[10] ZHANG G B, JIANG X D, ZHOU W Q, et al. Stocking density affects culture performance and economic profit of adult all-female Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) reared in earthen ponds[J]. Aquaculture, 2024, 581: 740352.

[11] 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.

[12] WU X G, ZHAO L, LONG X W, et al. Effects of dietary supplementation of *Haematococcus Pluvialis* powder on gonadal development, coloration and antioxidant capacity of adult male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(10): 5214-5223.

[13] ZHU S C, LONG X W, TURCHINI G M, et al. Dietary fishmeal replacement with a mixed-blend protein evokes sex-specific differences on culture performance and physiological effects on Chinese mitten crab[J]. Aquaculture Nutrition, 2020, 26(6): 2043-2058.

[14] 龙晓文，赵磊，麻楠，等. 饲料中添加雨生红球藻粉对中华绒螯蟹成体雄蟹生化组成的影响[J]. 动物学杂志，2018，53(2)：278-291.
LONG X W, ZHAO L, MA N, et al. Effects of dietary supplementation powder of *Haematococcus pluvialis* on the body biochemical composition of adult male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Chinese Journal of Zoology, 2018, 53(2): 278-291.

[15] 麻楠，龙晓文，赵磊，等. 饲料中添加合成虾青素对中华绒螯蟹成体雌蟹性腺发育、色泽和抗氧化能力的影响[J]. 水生生物学报，2017，41(4)：755-765.
MA N, LONG X W, ZHAO L, et al. Effects of dietary supplementation of synthetic astaxanthin on ovarian development, coloration and antioxidant capacity of adult female Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(4): 755-765.

[16] FOLCH J, LEES M, STANLEY G H S. A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues[J]. Journal of Biological Chemistry, 1957, 226(1): 497-509.

[17] NICKERSON K W, VAN HOLDE K E. A comparison of molluscan and arthropod hemocyanin-Ⅰ.Circular dichroism and absorption spectra[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry, 1971, 39(4): 855-872.

[18] AOAC. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists[M]. 16th ed. Washington: AOAC, 1998.

[19] BAI Y C, ZHANG L B, XIA S D, et al. Effects of dietary protein levels on the growth, energy budget, and physiological and immunological performance of green, white and purple color morphs of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*[J]. Aquaculture, 2016, 450: 375-382.

[20] CHO C Y, HYNES J D, WOOD K R, et al. Development of high-nutrient-dense, low-pollution diets and prediction of aquaculture wastes using biological approaches[J]. Aquaculture, 1994, 124(1/4): 293-305.

[21] 倪国彬，何杰，赵恒亮，等. 池塘养殖中华绒螯蟹二龄雌体生长规律和生殖蜕壳时间的研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版)，2015，34(2)：125-131.
NI G B, HE J, ZHAO H L, et al. The study of growth

pattern and puberty molting time of pond-reared female Chinese mitten crab during the second year culture[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2015, 34(2): 125-131.

[22] 黄姝, 王中清, 茅海成, 等. 中华绒螯蟹在实验室条件下的成蟹阶段蜕壳与生长观察[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(3): 359-365.
HUANG S, WANG Z Q, MAO H C, et al. Observation on molting and growth of adult Chinese mitten crab reared in the laboratory condition[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(3): 359-365.

[23] 成永旭, 堵南山, 赖伟. 不同阶段中华绒螯蟹肝胰腺的脂类及脂肪酸组成[J]. 动物学报, 1998, 44(4): 420-429.
CHENG Y X, DU N S, LAI W. Lipid composition in hepatopancreas of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* at different stages[J]. Acta Zoologica Sinica, 1998, 44(4): 420-429.

[24] 吴旭干, 成永旭, 沈竑, 等. 饲料中磷脂和高度不饱和脂肪酸对中华绒螯蟹育肥和卵巢发育的影响[C]//2005年上海市动物学会学术会议论文集. 上海: 上海市动物学会, 2005.
WU X G, CHENG Y X, SHEN H, et al. Effect of dietary phospholipid and highly unsaturated fatty acids on fattening and ovarian development of the Chinese mitten-handed crab (*Eriocheir sinensis*)[C]//Proceedings of the Shanghai Zoological Society Academic Conference. Shanghai, 2005.

[25] RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ H, VILLARREAL H, GARCÍA-ULLOA M, et al. Evaluation of practical diets containing different protein levels on gonad development of female redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus*[J]. Aquaculture Nutrition, 2009, 15(4): 347-355.

[26] 吴仁福, 龙晓文, 侯文杰, 等. 育肥饲料中混合植物油替代鱼油对三疣梭子蟹育肥性能、生理代谢指标和生化组成的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(2): 505-522.
WU R F, LONG X W, HOU W J, et al. Effects of dietary fish oil replacement by blending vegetable oils on fattening performance, physiological metabolism indices and biochemical composition of adult female *Portunus trituberculatus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(2): 505-522.

[27] 杨家岳, 程镇燕, 黄亚冬, 等. 饲料不同蛋白和脂肪水平对三疣梭子蟹生长性能、免疫功能和氨基酸组成的影响[J]. 饲料研究, 2021, 44(21): 57-63.
YANG J Y, CHENG Z Y, HUANG Y D, et al. Effect of dietary different protein and lipid levels on growth performance, immune function and amino acid composition of *Portunus trituberculatus*[J]. Feed Research, 2021, 44(21): 57-63.

[28] SUI L Y, SUN H X, WU X G, et al. Effect of dietary HUFA on tissue fatty acid composition and reproductive performance of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards) broodstock [J]. Aquaculture International, 2011, 19(2): 269-282.

[29] 郭婷. 铬暴露对草鱼的氧化损伤及抗氧化能力的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
GUO T. Effect of chromium on oxidative damage and antioxidant capacity of *Ctenopharyngodon idellus*[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.

[30] MARITIM A C, SANDERS R A, WATKINS III J B, et al. Diabetes, oxidative stress, and antioxidants: a review [J] Journal of Biochemical and Molecular Toxicology, 2003, 17(1): 24-38.

[31] 周永昌, 姜晓东, 龙晓文, 等. 中草药对中华绒螯蟹幼蟹生长及免疫力的影响[J]. 水产科学, 2019, 38(2): 188-193.
ZHOU Y C, JIANG X D, LONG X W, et al. Effects of Chinese herbal compounds on growth performance and immune capacities of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. Fisheries Science, 2019, 38(2): 188-193.

[32] 滕丹, 张驰. 谷胱甘肽过氧化物酶与人类几种疾病的研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(22): 97-99.
TENG D, ZHANG C. Research progress of glutathione peroxidase and several human diseases[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(22): 97-99.

[33] 王新星, 孔凡华, 许团辉, 等. 水解鱼蛋白营养组成及评价[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(3): 104-110.
WANG X X, KONG F H, XU T H, et al. Evaluation on the nutritional composition of fish protein hydrolysate[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(3): 104-110.

[34] 汤小朋, 陈磊, 熊康宁, 等. 硒蛋白-哺乳动物谷胱甘肽过氧化物酶家族研究进展[J]. 生命的化学, 2019, 39(6): 1076-1081.
TANG X P, CHEN L, XIONG K N, et al. Research progress of selenoprotein − mammalian glutathione peroxidases family[J]. Chemistry of Life, 2019, 39(6): 1076-1081.

[35] 田瑜, 揭育鹍, 曾祥兵, 等. 密度对拟穴青蟹抗氧化、非特异性免疫能力的影响[J]. 南方水产科学, 2023, 19(3): 60-67.
TIAN Y, JIE Y K, ZENG X B, et al. Effect of density on antioxidant and nonspecific immunity of mud crab (*Scylla paramamosain*)[J]. South China Fisheries Science, 2023, 19(3): 60-67.

[36] 赵曼曼, 姜敬哲, 何健, 等. 哈维弧菌和鲍类疱疹病毒刺激对杂色鲍免疫相关因子的影响[J]. 海洋科学, 2015, 39(11): 39-48.
ZHAO M M, JIANG J Z, HE J, et al. The effect of *Vibrio harveyi* and abalone herpesvirus on immune factors of *Haliotis diversicolor*[J]. Marine Sciences, 2015, 39(11): 39-48.

[37] 许敏. 白鲢肠碱性磷酸酶的分离纯化及其性质研究[D]. 重庆：西南大学，2007.
XU M. Isolation, Purification and some properties of intestinal alkaline phosphatase from *Hypophthalmichthys molitrix*[D]. Chongqing: Southwest University, 2007.

[38] 崔培，姜志强，王雪，等. 不同蛋白水平的虾青素饲料对锦鲤体色、生长及免疫的影响[J]. 上海海洋大学学报，2012，21(3)：382-388.
CUI P, JIANG Z Q, WANG X, et al. Effects of dietary protein levels on body pigmentation, growth and immunology of ornamental carp (*Cyprinus carpio* L.)[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2012, 21(3): 382-388.

[39] SUN P, JIN M, JIAO L F, et al. Effects of dietary lipid level on growth, fatty acid profiles, antioxidant capacity and expression of genes involved in lipid metabolism in juvenile swimming crab, *Portunus trituberculatus* [J]. British Journal of Nutrition, 2020, 123(2): 149-160.

[40] 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.
ZHAO L, LONG X W, WU X G, et al. Effects of fish oil replacement by blending vegetable oils in fattening diets on gonadal development, lipid metabolism, antioxidant and immune capacities of adult male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(2): 455-467.

[41] ZHANG J, ZHAO N N, SHARAWY Z, et al. Effects of dietary lipid and protein levels on growth and physiological metabolism of *Pelteobagrus fulvidraco* larvae under recirculating aquaculture system (RAS) [J]. Aquaculture, 2018, 495: 458-464.

[42] 范陈伟，姜晓东，何先林，等. 饲料蛋白水平对池塘养殖脊尾白虾生长、生理指标和体组成的影响[J]. 广东农业科学，2020，47(10)：140-148.
FAN C W, JIANG X D, HE X L, et al. Effects of dietary protein levels on growth, physiological indexes and body composition of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(10): 140-148.

[43] 李彬. 饲料蛋白质水平对三种规格草鱼生长、饲料利用以及氮代谢的影响[D]. 武汉：华中农业大学，2014.
LI B. Effects of dietary protein levels on growth, feed utilization and nitrogen metabolism of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) in three growth stages [J]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.

[44] TORRALLARDONA D, CONDE R, ESTEVE-GARCÍA E, et al. Use of spray dried animal plasma as an alternative to antimicrobial medication in weanling pigs [J]. Animal Feed Science and Technology, 2002, 99(1/4): 119-129.

[45] 郭占林，李嘉尧，甘信辉，等. 不同脂肪源对红螯光壳螯虾幼虾生长、消化酶活性及其肌肉生化组成的影响[J]. 中国水产科学，2010，17(5)：996-1004.
GUO Z L, LI J Y, GAN X H, et al. Influence of different lipid sources on growth, digestive enzyme activity and fatty acid composition in juvenile red claw crayfish, *Cherax quadricarinatus* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(5): 996-1004.

[46] 赵亚婷，吴旭干，常国亮，等. 饲料中DHA含量对中华绒螯蟹幼蟹生长、脂类组成和低氧胁迫的影响[J]. 水生生物学报，2013，37(6)：1133-1144.
ZHAO Y T, WU X G, CHANG G L, et al. Effects of dietary DHA levels on growth, lipid composition and hypoxia stress of juvenile Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, 37(6): 1133-1144.

[47] 温小波，陈立侨. 磷脂和胆固醇在虾蟹类营养中的研究进展[J]. 淡水渔业，2000，30(5)：25-27.
WEN X B, CHEN L Q. Progress on researches of phosphatide and cholesterol in nutrition of shrimps and crabs[J]. Freshwater Fisheries, 2000, 30(5): 25-27.

[48] 胡俊茹，易昌金，王国霞，等. 黑水虻虫油替代豆油对黄颡鱼幼鱼生长、血清生化指标和肝脏脂滴面积的影响[J]. 水生生物学报，2020，44(4)：717-727.
HU J R, YI C J, WANG G X, et al. Effects of dietary soybean oil replaced with black soldier fly larvae oil on growth performance, plasma biochemical indexes and liver lipid droplets of juvenile yellow catfish [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(4): 717-727.

Effects of gender-specific fattening diets on fattening performance, physiological metabolism and biochemical composition of pre-adult Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)

LIU Ruochen[1,2,3], ZHU Shaicheng[1,2,3], ZHANG Guangbao[1,2,3], GU Wei[4], XIANG Chaolin[4], DENG Deng[4], ZHAO Jinshan[5], WU Xugan[1,2,3,5]

(1. *Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*; 2. *Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*; 3. *National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*; 4. *Shenzhen Aohua Agriculture and Animal Husbandry Co., Ltd., Shenzhen* 518054, *Guangdong, China*; 5. *Dongying Huize Agricultural Technology Co., Ltd., Dongying* 257503, *Shandong, China*)

Abstract: Monosex cultivation of Chinese mitten crab is a potentially promising aquaculture method. Customizing gender-specific diets based on the nutritional requirements of males and females is a crucial prerequisite for precise feeding. This study employed a 2×2 factorial experimental design (2 diets × 2 genders) and conducted an 80-day aquaculture experiment in outdoor pond enclosures. The research investigated the effects of gender-specific fattening diets on the cultivation performance, physiological metabolism, and biochemical composition of pre-adult male and female Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*). The experiment consisted of four groups: males fed with male-specific diet (MM), males fed with female-specific diet (MF), females fed with female-specific diet (FF), and females fed with male-specific diet (FM). Each group had four replicate enclosures. The results show that: Feeds had no significant effect on the growth, survival rate, yield, and feed conversion (P>0.05). However, gender had a significant impact on growth, yield, and feed conversion at day 80 (P<0.05); The hepatosomatic index (HSI) and gonadosomatic index (GSI) of the FF group were higher than those of the FM group, and the GSI difference was significant on the 80th day (P<0.05). The total fat content in the hepatopancreas was significantly higher in the FF group than in the FM group (P<0.05). However, there were no significant differences in conventional biochemical components in edible tissues between the dietary groups (P>0.05); Concerning antioxidant and immune indicators, the glutathione peroxidase (GSH-Px) activity in the hepatopancreas was significantly higher in the MM group than in the other groups (P<0.05), while the FF group had the highest total superoxide dismutase (T-SOD) activity in the hepatopancreas. Both diet and gender factors significantly influenced acid phosphatase (ACP) activity in the serum (P<0.05); Regarding protein and lipid metabolism, the MM group had the highest trypsin activity in the hepatopancreas and the lowest lipase activity. The FF group had significantly higher triglyceride (TG) content in the hepatopancreas (P<0.05). The FF group had the highest levels of total protein (TP), TG, total cholesterol (TC), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) and high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) in the serum. In conclusion, male crabs fed fed male-specific diet demonstrated enhanced antioxidant and immune capacity, promoting protein deposition; female crabs fed female-specific diet accelerated ovarian development and increased triglyceride deposition in the hepatopancreas.

Key words: *Eriocheir sinensis*; gender-specific fattening feeds; growth; gonadal development; nutritional metabolism