

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220329003

http://www.yykxjz.cn/

杨帅帅, 朱筛成, 张冬冬, 潘祯祥, 李嘉尧, 吴旭干, 郑善玉. 2种饵料模式对稻田养殖中华绒螯蟹幼蟹养殖性能和生理代谢的影响. 渔业科学进展, 2023, 44(4): 188-200

YANG S S, ZHU S C, ZHANG D D, PAN Z X, LI J Y, WU X G, ZHENG S Y. Effects of two feeding modes on the culture performance and physiological metabolism of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) reared in rice fields. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(4): 188-200

2种饵料模式对稻田养殖中华绒螯蟹幼蟹养殖性能和生理代谢的影响*

杨帅帅¹ 朱筛成¹ 张冬冬¹ 潘祯祥¹
李嘉尧¹ 吴旭干^{1,2,3①} 郑善玉⁴

(1. 上海海洋大学 上海水产养殖工程技术研究中心 上海 201306; 2. 上海海洋大学 农业农村部鱼类营养与环境生态研究中心 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. 淮安市淮阴区农业农村局 江苏 淮安 223300)

摘要 为优化稻田养殖中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)幼蟹的饵料模式,本研究分别采用配合饲料和传统饵料(豆粕、麸皮、玉米和小麦)投喂稻田养殖中华绒螯蟹幼蟹 152 d,每种投喂组各 3 个重复,比较 2 种饵料模式对幼蟹养殖性能、蛋白质代谢、消化酶、抗氧化和免疫指标的影响。结果显示,配合饲料组的雌蟹和雄蟹体质量均高于传统饵料组,但差异不显著($P>0.05$);就养殖性能而言,2 种饵料模式下,配合饲料组正常幼蟹的平均体质量及产量、1 龄早熟蟹平均体质量及其产量、总产量和成活率均略高于传统饵料组,饵料系数显著低于传统饵料组($P<0.05$);就蛋白质代谢而言,配合饲料组雌蟹和雄蟹血淋巴中的总蛋白含量显著高于传统饵料组($P<0.05$),而传统饵料组雄蟹血淋巴中的尿素氮含量和肝胰腺中的谷草转氨酶活力显著高于配合饲料组($P<0.05$);配合饲料组雌蟹和雄蟹肝胰腺中的脂肪酶均显著高于传统饵料组($P<0.05$),而雄蟹的 α -淀粉酶活力显著低于传统饵料组;配合饲料组的雌蟹血淋巴中总抗氧化能力、碱性磷酸酶、酸性磷酸酶活力和肝胰腺中酸性磷酸酶活力均显著高于传统饵料组($P<0.05$)。综上所述,投喂配合饲料可以提高稻田扣蟹的养殖性能、促进蛋白质沉积和脂类吸收、增强幼蟹抗氧化和免疫能力、提高蟹种质量。

关键词 中华绒螯蟹; 稻蟹共生; 饵料模式; 养殖性能; 生理代谢

中图分类号 Q958 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)04-0188-13

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)是我国重要的经济蟹类(He *et al.*, 2014)。据 2021 年渔业统计年鉴,我国中华绒螯蟹扣蟹年产量为 6.54 万 t,成蟹年产量为 77.5 万 t (农业农村部渔业渔政管理局等, 2021)。目前,中华绒螯蟹的扣蟹和成蟹养殖在我国绝大部分地

区主要在池塘中进行(王少兵等, 2018),稻田扣蟹养殖主要在东北地区(Bao *et al.*, 2022)。稻蟹共生具有“一水两用、稻蟹互利共生”的优点,稻田中的天然饵料可以减少扣蟹养殖的饲料投入,中华绒螯蟹的粪便和残饵又可以为水稻生长提供部分氮磷元素,从而

* 农业农村部和国家发改委产业强镇项目(发改农经 2019-245)、外交部亚洲合作资金项目(125A0607)和安徽省中央引导地方科技发展专项资金(01907d06020008)共同资助。杨帅帅, E-mail: 648671153@qq.com

① 通信作者: 吴旭干, E-mail: xgwu@shou.edu.cn

收稿日期: 2022-03-29, 收修改稿日期: 2022-04-25

减少饲料用量和水稻施肥量,为稻渔综合种养可持续发展提供了样板(Bao *et al.*, 2022)。尽管,我国已经在稻蟹养殖的田间工程、水稻种植方式、中华绒螯蟹养殖密度和生态效益方面取得了一定进展(孙富余等, 2010; 吕东锋等, 2010; Bao *et al.*, 2022),但关于稻蟹养殖模式下适宜的饵料投喂种类均未见报道,在河蟹池塘养殖过程中,投喂的饵料是以豆粕、玉米和小麦为主的传统饵料和配合饲料,现尚不清楚在稻田扣蟹养殖过程中适宜的投喂饵料种类以及不同饵料对中华绒螯蟹的生长和生理代谢的影响。

由于配合饲料具有营养全面、质量稳定和便于投喂等优点,因此,研发实用廉价的中华绒螯蟹配合饲料是促进中华绒螯蟹产业可持续发展的重要抓手(杨丽丽等, 2011)。尽管,科研工作者已经研发出中华绒螯蟹扣蟹和成蟹养殖阶段的系列化配合饲料(何杰等 2016),但由于养殖者的投喂习惯和饲料价格等原因,目前,我国扣蟹养殖过程中主要采用传统饵料(豆粕、菜粕、玉米、麸皮和小麦)或传统饵料和配合饲料混合投喂的饵料模式(姜晓东等, 2017)。尽管先前有大量研究表明,投喂中华绒螯蟹配合饲料有诸多优点,如提高幼蟹成活率(杨丽丽等, 2011)、降低幼蟹早熟率(Wu *et al.*, 2011)、提高幼蟹非特异性免疫力和抗病力(姜晓东等, 2017)、提高蟹种质量(姜晓东等, 2017)、养殖性能和经济效益(王少兵等, 2018)等,但这些研究都是在室内养殖条件或者池塘养殖条件下进行的。稻田与池塘的养殖环境差异较大,2 种养殖环境下扣蟹的饲料来源和环境胁迫可能也存在较大差异,因此,探讨稻田扣蟹养殖的饵料模式具有重要的现实意义。迄今为止,尚无稻田扣蟹养殖条件下饵料模式的相关研究,这不利于稻蟹养殖模式的优化和中华绒螯蟹产业高质量发展。鉴于此,本研究系统比较扣蟹在稻田养殖的条件下,投喂配合饲料和传统饵料对中华绒螯蟹幼蟹的养殖性能和生理代谢指标的影响,以期中华绒螯蟹稻田养殖技术优化和开发应用配合饲料提供实验依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计及实验用蟹

实验于上海海洋大学宣城基地的 6 个面积为 3 000 m² 稻田养殖池塘中进行,稻田池塘均呈“回”字形,四周为环沟,边台宽为 4 m,环沟宽为 3 m,沟深为 0.5 m,中间为平台区(长×宽=51.0 m×33.5 m),面积为 1 700 m²,每口稻田池塘外围均设置 35 cm 高的塑料防逃围板,防止实验蟹逃跑或者混杂。实验分

为配合饲料组和传统饵料组,每个组别分别设置 3 个平行实验池塘,配合饲料组的饵料模式根据幼蟹体质量,依次投喂不同粒径的配合饲料,其中,扣蟹 1#、2#和 3#饲料粒径分别为 1.2、1.6 和 1.8 mm (浙江澳华饲料有限公司),后期配合饲料与发酵饲料(浙江博仕佳生物科技有限公司)交替投喂。传统饵料组前期投喂豆粕和麸皮,中期投喂豆粕、玉米片和小麦,后期投喂豆粕和玉米片,根据食台饵料剩余量适当调整投喂量。具体的饵料投喂策略见表 1,不同饵料的常规生化组成见表 2。

每口稻田池塘中间平台于 2020 年 5 月 15 日均匀种植水稻,种植株距为 10 cm,行距为 25 cm。稻田四周环沟均匀栽植一定量的水花生(*Alternanthera philoxeroides*),为幼蟹提供隐蔽场所,水花生面积占稻田环沟的 50%左右。

2020 年 6 月中旬,从上海海洋大学宣城基地的扣蟹暂养池塘中用地笼捕捞出豆蟹(约 0.6 g/只)放入 6 个稻田实验池塘,每口稻田池塘按照 30 只豆蟹/m² 的密度(投放面积为稻田总面积)进行投放。

1.2 养殖管理

实验于 2020 年 6 月 15 日开始正式投喂,每日 16:00 左右投喂一次,20:00 左右检查残饵。根据水温和摄食情况灵活调整饵料投喂量,并记录各个稻田的每日实际投喂量;夏季及时梳理稻田中水花生,防止水花生密度过高影响中华绒螯蟹正常活动和摄食;每周进行 1 次池塘水体 pH、氨氮和亚硝酸盐含量的测定,根据水质情况,每半个月左右换水 1 次,换水量根据实际情况确定,并定期使用消毒剂或微生物制剂调节水质;每日 06:30 和 21:00 巡塘查看中华绒螯蟹活动情况。

1.3 样品和数据采集

1.3.1 生长情况 自 7 月开始,每月中下旬随机从每口稻田中用抄网各采集 200 只幼蟹,雌雄各占一半,用干毛巾轻轻擦拭蟹体表水分后,采用电子天平精确称重(精确到 0.01 g),准确记录每只蟹的体质量和性别。据此计算增重率(WGR)和特定生长率(SGR),计算公式如下:

$$WGR (\%) = 100 \times (W_t - W_{t-1}) / W_{t-1}$$

$$SGR (\%/d) = 100 \times (\ln W_t - \ln W_{t-1}) / D$$

式中, W_t 指第 t 月蟹的平均体质量, W_{t-1} 指第 $t-1$ 月蟹的平均体质量, D 为采样的间隔天数。

1.3.2 最终平均体质量、规格分布和养殖性能 养殖实验于 11 月中旬停止,从每个池塘中随机捞出

表1 中华绒螯蟹幼蟹稻田养殖过程中的饵料投喂策略
Tab.1 The feeding strategy of juvenile *E. sinensis* reared in rice fields

时间 Time	配合饲料组 Formulated feed group		传统饵料组 Traditional mixed feed group	
	饵料 Diet	投喂率 Feeding rate/%	饵料 Diet	投喂率 Feeding rate/%
2020-06-15—2020-07-12	破碎料 Broken diets	5~8	豆粕:麸皮=2:1 Soybean: Bran=2:1	7~10
2020-07-13—2020-07-15	扣蟹1#饲料 Juvenile diets 1#	5~8	豆粕:麸皮=2:1 Soybean: Bran=2:1	7~10
2020-07-16—2020-07-20	扣蟹1#饲料 Juvenile diets 1#	3~5	豆粕:玉米片:小麦=1:1:1 Soybean: Corn flake: Wheat=1:1:1	5~7
2020-07-21—2020-09-04	扣蟹2#饲料和发酵饲料交替投喂 Feed alternately with juvenile diets 2# and fermented diets	2~4	豆粕:玉米片:小麦=1:1:1 Soybean: Corn flake: Wheat=1:1:1	3~5
2020-09-05—2020-09-22	扣蟹2#饲料和发酵饲料交替投喂 Feed alternately with juvenile diets 2# and fermented diets	1~3	豆粕:玉米片=1:2 Soybean: Corn flake=1:2	1~3
2020-09-23—2020-11-20	扣蟹3#饲料和发酵饲料交替投喂 feed alternately with juvenile diets 3# and fermented diets	0.5~2	豆粕:玉米片=1:2 Soybean: Corn flake=1:2	0.5~2

表2 不同饵料的常规生化组成(%，干重)
Tab.2 The proximate composition of different diets (%，dry mass)

饵料名称 Diets	水分 Moisture	蛋白 Crude protein	脂肪 Total lipid	灰分 Ash
破碎料 Broken diets	10.42±0.23	44.12±0.18	8.53±0.28	10.21±0.17
扣蟹1#饲料 Juvenile diets 1#	11.02±0.16	41.53±0.33	8.98±0.38	10.25±0.22
扣蟹2#饲料 Juvenile diets 2#	9.58±0.15	36.02±0.19	6.77±0.29	9.08±0.26
扣蟹3#饲料 Juvenile diets 3#	10.11±0.34	41.85±0.36	9.12±0.24	10.88±0.33
发酵饲料 Fermented diets	44.02±0.39	36.36±0.28	7.32±0.21	8.87±0.11
豆粕 Soybean meal	11.43±0.18	42.56±0.52	1.88±0.12	5.78±0.31
麸皮 Bran	13.77±0.22	14.02±0.19	4.38±0.23	3.65±0.11
小麦 Wheat	12.85±0.12	12.03±0.09	3.33±0.08	1.82±0.05
玉米 Corn	12.48±0.13	9.56±0.16	4.62±0.15	2.78±0.12

300只扣蟹，分别对每口稻田中雌雄扣蟹的体质量进行统计，并根据张列士等(2001)的方法判断扣蟹是否性成熟，由此计算每个池塘扣蟹的平均体质量和一龄性早熟率。对所有捕获的非早熟扣蟹按体质量进行规格划分： $<6\text{ g}$ 、 $6\sim<10\text{ g}$ 、 $10\sim<14\text{ g}$ 、 $14\sim<18\text{ g}$ 、 $\geq 18\text{ g}$ ，分别统计各规格区间比例。根据最终这6口稻田池塘的扣蟹销售量、平均规格和早熟蟹情况，分别计算每口稻田非早熟扣蟹产量、早熟蟹产量和总产量(早熟蟹+正常扣蟹)，并据此计算幼蟹成活率和早熟率。根据整个实验期间投喂的饵料总量和幼蟹总产量，计算饲料系数(FCR)：

$$\text{FCR} = \text{消耗饵料总重} /$$

(最终产出蟹总重-实验初放养蟹总重)

1.3.3 蛋白质代谢指标、消化酶指标和抗氧化免疫指标的测定 9月中旬，分别从每口稻田中各取9只雌、雄幼蟹，将幼蟹放在冰上麻醉后，采用1 mL无菌注射器从第3步足基部抽取血淋巴，每口稻田中的3只幼蟹的血淋巴合并成一个样品装于2 mL的离心管中；然后解剖取出幼蟹肝胰腺，每口稻田中的3只幼蟹的肝胰腺合并装于一个冻存管中，所有肝胰腺和血淋巴样品于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中保存，用于幼蟹蛋白质代谢、消化酶和抗氧化及免疫指标测定。

样品测定时,称取 2 g 左右的肝胰腺,加入 10 mL (重量与体积比约为 1:5)预冷的生理盐水后,用 T10B 型微型匀浆器(IKA, 德国)匀浆 30 s,在 4 °C 12 000 r/min 条件下离心 20 min,取中间清液(上层为油脂,下层为组织沉淀)再次离心,取中间清液用于后续分析。血淋巴解冻后分别用微型匀浆器匀浆 30 s,然后在 4 °C 12 000 r/min 条件下离心 20 min,取出上清液(血清)待测。采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定总蛋白(total protein, TP, A045-2-2)、总氨基酸(total amino acid, TAA, A026-1-1)、尿素氮(urea nitrogen, BUN, C013-2-1)、谷草转氨酶(glutamic oxaloacetic transaminase, GOT, C010-2-1)、谷丙转氨酶(glutamate pyruvic transaminase, GPT, C009-2-1)、胰蛋白酶(trypsin, C010-2-1)、脂肪酶(lipase, A054-1-1)、 α -淀粉酶(Amylase, C016-1-1)、纤维素酶(cellulase, A138-1-1)、总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC, A015-1-2)和超氧化物歧化酶(superoxyde dismutase, SOD, A001-4-1)、丙二醛(malondialdehyde, MDA, A003-1-2)、碱性磷酸酶(alkalinephosphatase, AKP, A059-1-1)、酸性磷酸酶(acidphosphatase, ACP, A060-1-1)。

1.4 统计分析

所有数据采用平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示。采用 SPSS 22.0 软件对实验数据进行统计分析,用 Levene 方法进行方差齐性检测,当不满足使用齐性时,对数据进行反正弦或平方根处理,用 *t*-检验检查两实验组各指标间的差异性,当数据转换后仍不满足齐性方差时,采用 Mann-Whitney test 进行非参数检验。取 $P < 0.05$ 为差异显著。利用 Excel 和 GraphPad

Prism 软件上绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 生长指标

图 1 为 2 种饵料模式下在稻田扣蟹养殖阶段的体质量变化情况。无论雌雄,7—11 月配合饲料组的平均体质量均高于传统饵料组,其中,7 月份配合饲料组的雌蟹体质量显著高于传统饵料组($P < 0.05$)。扣蟹养殖期间的增重率变化如图 2 所示,整个养殖过程中,2 组扣蟹的增重率均呈下降趋势;就雌体而言,配合饲料组在 7—8 月和 9—10 月的增重率大于传统饵料组,而 8—9 月和 10—11 月期间传统饵料组的增重率大于配合饲料组;就雄体而言,配合饲料组的增重率仅在 10—11 月略大于传统饵料组,其他月 2 组的增重率基本一致。2 组扣蟹的体质量特定生长率变化趋势及差异情况与增重率基本一致(图 3)。

2.2 最终养殖性能和规格分布

表 3 为 2 种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹稻田养殖性能的影响。2 种饵料模式下正常幼蟹平均体质量、1 龄早熟蟹平均体质量、正常扣蟹产量、1 龄早熟蟹产量、总产量、1 龄早熟蟹比例和成活率均无显著差异($P > 0.05$)。整体上,传统饵料组的正常扣蟹和 1 龄早熟蟹单位面积产量和平均体质量均略低于配合饲料组。2 种饵料模式下,从豆蟹到养成扣蟹的成活率均在 20%左右,但传统饵料组的饲料系数显著高于配合饲料组($P < 0.05$)。

2 种饵料模式养成扣蟹的规格分布如图 4 所示。2 组扣蟹的优势规格都主要集中在 6~10 g,配合饲料组和传统饵料组分别为 38.33%和 40.17%。配合饲

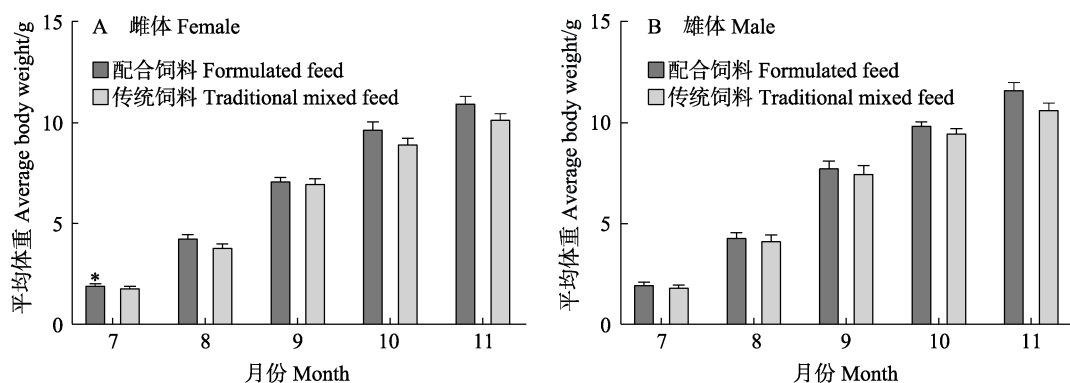


图 1 中华绒螯蟹 2 种饵料模式下在稻田扣蟹养殖阶段的体质量变化

Fig.1 Changes of body weight of rice field-reared juvenile Chinese mitten crab under the two feeding modes

方柱标注“*”表示两组间差异显著($P < 0.05$)。下同。

The columns with “*” indicate significant differences among different groups ($P < 0.05$). The same as below.

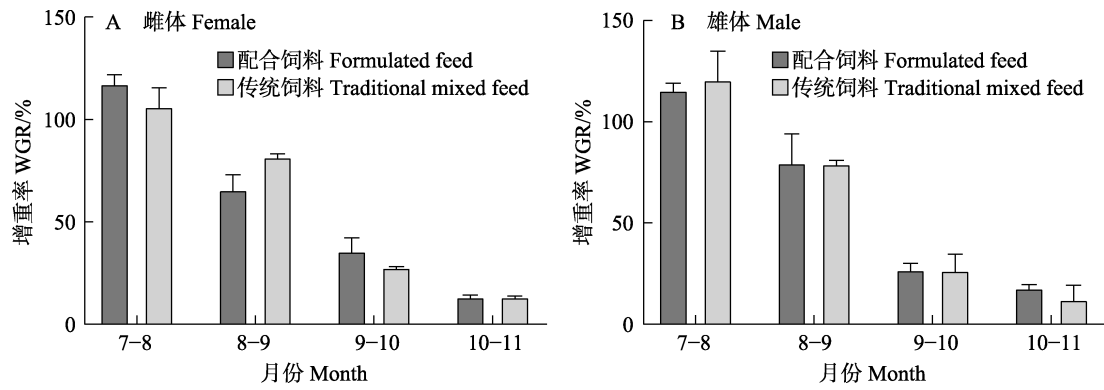


图2 中华绒螯蟹2种饵料模式下在稻田扣蟹养殖阶段的增重率变化
Fig.2 Changes of weight gain rate of rice field-reared juvenile Chinese mitten crab under the two feeding modes

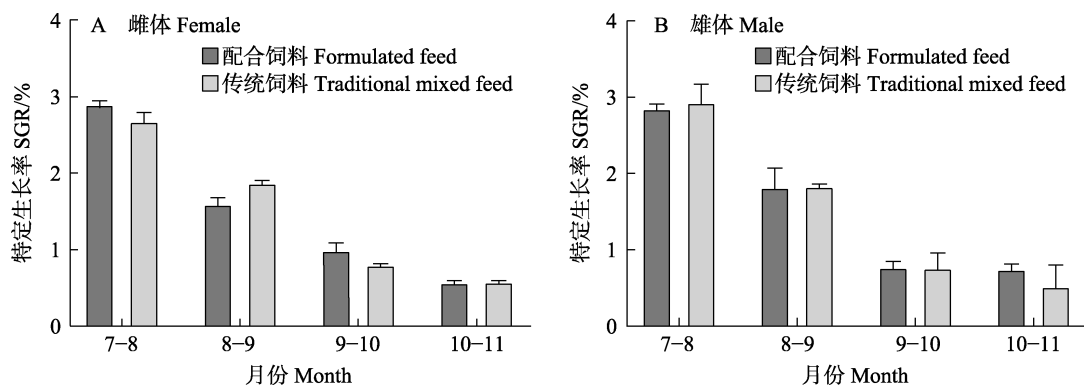


图3 中华绒螯蟹2种饵料模式下在稻田扣蟹养殖阶段的特定生长率变化
Fig.3 Changes of specific growth rate of rice field-reared juvenile Chinese mitten crab under the two feeding modes

表3 2种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹稻田养殖性能的影响
Tab.3 Effects of two feeding modes on the culture performance of juvenile Chinese mitten crab reared in rice fields

项目 Items	配合饲料组 Formulated feed group	传统饵料组 Traditional mixed feed group
正常扣蟹平均体质量 Average body weight of normal juvenile crab/g	11.39±0.28	10.48±0.35
1龄早熟蟹平均体质量 Average body weight of precocious crab/g	24.97±0.09	24.54±0.16
正常扣蟹产量 Yield of normal juvenile crab/(kg/667 m ²)	43.41±8.76	38.94±9.73
1龄早熟蟹产量 Yield of precocious crab/(kg/667 m ²)	23.43±0.61	19.60±2.61
总产量 Total yield/(kg/667 m ²)	66.84±9.38	58.53±12.34
1龄早熟蟹重量比 Yield percent of precocious crab/%	35.63±4.09	34.05±2.73
成活率 Survival rate/%	20.30±3.76	19.09±3.86
饵料系数 FCR	2.74±0.44	4.40±1.12*

注：数据上带有“*”表示同一性别下2种饵料组间差异显著(P<0.05)，下同。

Notes: Values with “*” represent the significant difference between different feeding modes at ment groups at the same time point within the same row are significantly different (P<0.05). The same as below.

料组在<6 g和6~<10 g区间内的扣蟹比例略低于传统饵料组，但在其他3种规格的扣蟹比例均高于传统饵料组，整体上，2种饵料模式对养成扣蟹规格分布无显著差异(P>0.05)。

2.3 蛋白质代谢和消化酶指标

2种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹蛋白质代谢指标的影响见表4。就雌蟹而言，配合饲料组幼蟹血淋

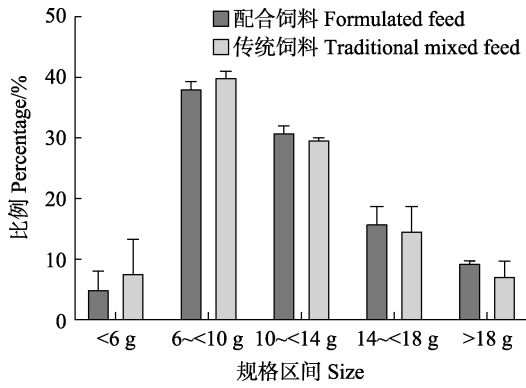


图 4 中华绒螯蟹 2 种饵料模式在稻田扣蟹养殖阶段的最终规格分布

Fig.4 The size distribution of different body weight ranges for juvenile Chinese mitten crab reared in rice fields

巴中的总蛋白(TP)含量显著高于传统饵料组($P<0.05$), 而总氨基酸(T-AA)和尿素氮(BUN)含量以及肝胰腺中谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)活力均无显著差异($P>0.05$); 就雄蟹而言, 传统饵料组血淋巴中的尿素氮(BUN)含量和肝胰腺中的 GOT 活力显著高

于配合饲料组($P<0.05$), 而血淋巴中 TP 和 T-AA 含量及肝胰腺中的 GPT 活力均无显著差异($P>0.05$)。此外, 雄蟹血淋巴中尿素氮含量显著低于雌蟹, 而其肝胰腺中谷丙转氨酶活力较雌蟹高。

2 种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹消化酶代谢指标的影响见表 5。无论雌蟹还是雄蟹, 配合饲料组与传统饵料组的胰蛋白酶和纤维素酶均无显著差异($P>0.05$), 而配合饲料组雌蟹和雄蟹肝胰腺中的脂肪酶均显著高于传统饵料组($P<0.05$); 传统饵料组雄蟹的 α -淀粉酶活力显著高于配合饲料组, 而雌蟹 α -淀粉酶活力在配合饲料组和传统饵料组无显著差异($P>0.05$)。

2.4 抗氧化免疫指标

2 种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹抗氧化免疫指标的影响见表 6。就雌蟹而言, 配合饲料组血淋巴中的 T-AOC、AKP 和 ACP 活力以及肝胰腺中 ACP 显著高于传统饵料组($P<0.05$)。就雄蟹而言, 配合饲料组血淋巴中的 T-SOD 活力显著低于传统饵料组($P<0.05$), 而血淋巴中的 MDA 含量显著高于传统饵料组

表 4 2 种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹蛋白质代谢指标的比较

Tab.4 The comparison of protein metabolism indices of juvenile Chinese mitten crab under the two feeding modes

项目 Items	雌蟹 Female		雄蟹 Male	
	配合饲料组 Formulated feed group	传统饵料组 Traditional mixed feed group	配合饲料组 Formulated feed group	传统饵料组 Traditional mixed feed group
血淋巴 Haemolymph				
总蛋白 TP/(mg/mL)	54.95±8.10*	39.97±9.30	50.94±9.40	45.43±10.38
总氨基酸 T-AA/(μ mol/L)	4.84±1.05	5.37±2.18	5.66±1.88	5.08±1.79
尿素氮 BUN/(mmol/L)	25.99±5.16	34.37±8.84	4.85±0.95	8.01±1.78*
肝胰腺 Hepatopancreas				
谷草转氨酶 GOT/(U/mL)	1.41±0.76	1.32±0.73	0.61±0.25	1.37±0.70*
谷丙转氨酶 GPT/(U/mL)	0.91±0.15	0.70±0.26	1.06±0.59	1.24±0.67

表 5 2 种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹肝胰腺中消化酶活力的影响

Tab.5 The comparison of digestive enzyme activities of hepantopancreas in juvenile Chinese mitten crab under the two feeding modes

项目 Items	雌蟹 Female		雄蟹 Male	
	配合饲料组 Formulated feed group	传统饵料组 Traditional mixed feed group	配合饲料组 Formulated feed group	传统饵料组 Traditional mixed feed group
胰蛋白酶 Trypsin/(U/mg prot)	622.00±171.29	576.34±95.20	641.59±122.20	576.79±156.81
脂肪酶 Lipase/(μ mol/min/mg prot)	2.03±0.17*	0.76±0.12	1.82±0.27*	1.00±0.20
α -淀粉酶 Amylase/(U/g prot)	138.00±23.32	126.81±24.15	115.86±16.72	148.93±23.83*
纤维素酶 Cellulase/(U/mg prot)	74.74±23.02	85.24±16.57	71.36±31.20	77.40±29.32

表6 2种不同饵料模式下中华绒螯蟹幼蟹抗氧化和免疫指标的比较
Tab.6 The comparison of antioxidant and immune indices of juvenile Chinese mitten crab under the two feeding modes

项目 Items	雌蟹 Female		雄蟹 Male	
	配合饲料组 Formulated feed group	传统饵料组 Traditional mixed feed group	配合饲料组 Formulated feed group	传统饵料组 Traditional mixed feed group
血淋巴 Haemolymph				
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	7.05±1.27*	4.79±1.00	5.77±2.05	3.95±1.04
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mL)	112.03±19.30	137.91±19.20*	76.88±34.09	148.47±26.58*
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	12.44±2.98	13.64±2.50	22.82±3.99*	11.50±2.52
碱性磷酸酶 AKP/(U/mL)	5.80±1.07*	3.34±1.16	2.23±0.42	2.84±1.06
酸性磷酸酶 ACP/(U/mL)	7.85±0.91*	2.08±0.62	1.89±1.39	1.56±0.46
肝胰腺 Hepatopancreas				
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mg prot)	0.67±0.19	0.50±0.18	0.49±0.11	0.52±0.20
总超氧化物歧化酶 T-SOD/(U/mg prot)	1.88±0.57	1.83±0.81	2.08±0.69	2.59±0.56
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/(U/mg prot)	3.72±0.82	3.55±0.79	3.80±0.28	3.66±0.61
丙二醛 MDA/(nmol/mg prot)	2.61±0.91	3.34±0.97	2.84±0.92	3.53±1.25
碱性磷酸酶 AKP/(U/mg prot)	40.27±13.36	49.95±14.18	35.39±12.39	33.18±12.54
酸性磷酸酶 ACP/(U/mg prot)	5.34±1.36*	3.42±0.91	2.96±1.02	2.54±0.72

($P < 0.05$)。此外,无论是配合饲料组还是传统饵料组,雌蟹的血淋巴和肝胰腺中 AKP 和 ACP 均高于雄蟹。

3 讨论

3.1 2种饵料模式对稻田养殖扣蟹养殖性能的影响

体质量的增长情况是衡量扣蟹生长性能最重要的经济性状,影响蟹种在成蟹阶段的养殖性能以及最终经济效益(Racotta *et al.*, 2003)。本研究发现,无论雌蟹还是雄蟹,每个月配合饲料组的蟹平均体质量都大于传统饵料组,且7月配合饲料组雌蟹的平均体质量显著大于传统饵料组,结果表明,稻田养殖下投喂配合饲料的中华绒螯蟹幼蟹可以获得较好的养殖性能,这也与之前一些中华绒螯蟹池塘养殖的相关研究结果相一致(王少兵等, 2018; 韩文峰等, 2021)。此外,郭永坚等(2015)在对鲮(*Mugil cephalus*)的研究中也发现类似的结论,投喂配合饲料的鲮有更好的生长性能,这可能是由于配合饲料的营养价值较传统饵料高。就蛋白质含量而言,传统饵料豆粕的粗蛋白含量一般为44%~48%,玉米和麸皮的蛋白含量较低,分别为8%~9.4%和14%~15%(熊本海等, 2018; 王少兵等, 2018)。而有研究表明,幼蟹阶段适宜的蛋白需求为34%~42%(陈立侨等, 1994; Mu *et al.*, 1998; 刘兴国, 2001),因此,豆粕、麸皮和玉米这些传统饵料混合投喂无法满足幼蟹的营养需求。本研究中配合饲料是根据幼蟹不同生长阶段的营养需求设计的,营养较传

统饵料全面。其次,本研究中传统饵料主要有豆粕、麸皮、玉米和小麦4种饵料组成,这些饵料是重要的植物蛋白源,但与含有鱼粉和肉粉等动物蛋白源的配合饲料相比,豆粕、麸皮和玉米的氨基酸平衡性、蛋白质和氨基酸消化率要低于动物蛋白源(张璐等, 2007; 江星等, 2013)。此外,豆粕中含有一定量的单宁、蛋白酶抑制因子和大豆皂苷等抗营养因子(张璐, 2007),而本研究中传统饵料组的豆粕比例高达33%~66%,显著高于配合饲料中比例。因此,传统饵料的抗营养因子含量可能高于配合饲料,从而降低了幼蟹对蛋白和氨基酸的利用,而配合饲料添加了如鱼粉等部分优质动物蛋白源,并根据原料氨基酸组成进行配比,使得饲料氨基酸更加平衡,从而导致配合饲料组幼蟹的体质量、增重率和特定生长率高于传统饵料组。配合饲料具有较好的适口性和诱食性,且含有一定量的蜕壳素和促生长剂,可以大大缩短扣蟹的蜕壳周期,提高蜕壳率(张丙群, 1992; 李洪宇等, 2013)。整体上,配合饲料组无论是扣蟹产量、早熟蟹产量和成活率都高于传统饵料组且饵料系数配合饲料组低于传统饵料组,说明投喂配合饲料可以提高饵料转化率和养殖效果。

中华绒螯蟹1龄性早熟是中华绒螯蟹幼蟹养殖过程中常见的问题,是由内因和外因共同作用的结果,主要与自身遗传特性以及环境温度、水质、放养密度和营养等外在因素有关(徐如卫等, 2001)。本研究中,在稻田养殖条件下2种饵料组1龄早熟蟹比例

(35%)比在池塘条件下养殖的幼蟹 1 龄早熟率(5%~15%)高很多(何杰等, 2015; 王少兵等, 2018; 王海宁等, 2020), 这可能与稻田低水位导致水温较高以及豆蟹放养密度低有关, 积温增高和中华绒螯蟹密度较低条件下可以增加中华绒螯蟹 1 龄性早熟比例(张列士等, 2001; 徐如卫等, 2001)。此外, 也可能与稻田里存在大量天然饵料有关(李岩等, 2013), 特别是水温较高情况下造成生物饵料大量繁殖(赵瀛, 2012), 导致中华绒螯蟹摄食量增加和营养过剩。徐如卫等(2001)研究表明, 营养过剩是中华绒螯蟹 1 龄性早熟的重要诱因。今后可以通过适当增加稻田水位和豆蟹放养密度以及适当降低投喂量来控制稻蟹模式下幼蟹的性早熟比例, 也为今后稻蟹模式的养殖和投喂技术优化提供研究方向。

3.2 2 种饵料模式对稻田养殖扣蟹生理代谢的影响

3.2.1 蛋白质代谢和消化酶活力的比较 肝胰腺是中华绒螯蟹氨基酸分解代谢中心, 而谷草转氨酶(GOT)和谷丙转氨酶(GPT)是肝脏中 2 种最重要的氨基转移酶, 转氨酶活性的升高, 说明了动物体内蛋白质的吸收和氨基酸的代谢更为旺盛(Fynn-Aikins *et al.*, 1995; Duan *et al.*, 2018)。血淋巴中的总蛋白(TP)的含量能够反映动物体内蛋白质代谢和营养吸收的水平(许晨远等, 2019)。血清尿素氮(BUN)可以较准确反映动物体内蛋白质的代谢情况和饲料氨基酸平衡情况, 当饲料氨基酸不平衡时, 氨基酸脱氨降解, 导致血清中尿素氮含量升高(李彬等, 2014)。本研究中, 传统饵料组的雄蟹肝胰腺 GOT 活力和血清 BUN 含量显著高于配合饲料组, 而血清 TP 含量显著低于配合饲料组, 这表明传统饵料组的雄蟹体内氨基酸的分解代谢比配合饲料组的旺盛, 而蛋白沉积较配合饲料组少, 雌蟹也显示相同的趋势。这可能是造成传统饵料组雌蟹和雄蟹体质量均低于配合饲料组的原因, 也侧面反映了传统饵料的氨基酸组成平衡性比配合饲料差。

消化酶是底物适应性酶, 与饵料营养组成(蛋白水平、脂肪水平、碳水化合物水平、粗纤维含量)密切相关。研究表明, 动物体内胰蛋白酶和脂肪酶活性与饵料中的蛋白质水平(江洪波等, 2005; 陈壮等, 2014)和脂肪水平(迟淑艳等, 2005)呈正相关。本研究表明, 投喂配合饲料的雌、雄蟹肝胰腺中胰蛋白酶和脂肪酶活性均高于投喂传统饵料, 其中脂肪酶更为显著, 这与 Long 等(2022)研究池塘养殖条件下不同饵料投喂模式对成蟹消化酶活力影响的结果一致, 投喂配合饲料组的成蟹胰蛋白酶和脂肪酶活力均高于投喂配合饲料组, 这可能是由于配合饲料的粗蛋白和总

脂肪含量较传统饵料高。此外, 江洪波等(2005)研究发现, 饲料中蛋白质对中华绒螯蟹仔蟹肝胰腺淀粉酶活性具有明显的抑制作用, 这与本研究的结果配合饲料组雄蟹肝胰腺中淀粉酶活性显著低于传统饵料组相一致。由此可见, 投喂配合饲料可以促进幼蟹对蛋白质和脂类物质的消化分解和吸收。此外, 本研究发现, 传统饵料组雌、雄蟹纤维素酶均高于配合饲料组, 这可能与传统饵料中玉米、麸皮等富含纤维素有关, 投喂富含纤维素的植物性饵料有利于幼蟹纤维素酶活性的提高(杨霞等, 2014; 韩文峰等, 2021)。

3.2.2 抗氧化和免疫指标的比较 T-AOC 是用于衡量机体抗氧化系统功能状况的综合性指标, 其大小反映了机体抗氧化酶系统和非酶系统对外来刺激的代偿能力及机体自由基代谢状况(郭婷, 2013)。SOD 是生物体内重要的抗氧化酶之一, 可清除机体过多的自由基, 从而起到保护细胞免受损伤的作用, 其活力的高低反映了体内氧自由基水平的高低(朱筛成等, 2019)。本研究中, 传统饵料组的雌蟹和雄蟹的 T-SOD 活力显著高于配合饲料组, 这表明投喂传统饵料组幼蟹体内的氧化胁迫程度较配合饲料组高, 机体需要提高 SOD 酶活力来清除体内自由基。而雌、雄幼蟹的 T-AOC 均在配合饲料组较高, 推测可能与配合饲料中添加的鱼粉和维生素 C 等有关, 鱼粉中含有一定量的硒和类胡萝卜素(李宁等, 2017), 而这些物质具有提高机体抗氧化能力的作用。因此, 投喂配合饲料相较于投喂传统饵料能够提高幼蟹的抗氧化能力, 降低体内氧化应激。MDA 是细胞脂质氧化的代谢产物, 其含量的高低显示了机体脂质过氧化的程度(Long *et al.*, 2017)。而本研究中配合饲料组的雄蟹 MDA 含量显著高于传统饵料组, 且配合饲料组幼蟹的脂肪酶活力较传统饵料组高, 这与 Long 等(2022)结果类似, 池塘养殖条件下投喂配合饲料的雄性成蟹肝胰腺中 MDA 含量也高与投喂传统饵料组, 推测可能与配合饲料组幼蟹体内脂质积累较高有关, 使得更容易发生脂质过氧化反应(何志刚等, 2016)。

AKP 和 ACP 是生物体内 2 种重要的非特异性磷酸水解酶, 能催化磷酸单酯的水解及磷酸基团的转移反应, 不仅参与甲壳动物的磷、钙、蛋白质和脂质代谢, 且对机体免疫性能具有重要作用(刘树青等, 1999; Xue *et al.*, 2000)。本研究表明, 配合饲料组雌、雄蟹的血清和肝胰腺中 AKP 和 ACP 活力均显著高于传统饵料组, 这表明投喂配合饲料能够提高幼蟹的免疫性能, 此外, 配合饲料组幼蟹 AKP 活力增加可能与饲料中添加矿物质有关, 促进了钙、磷等物质在体内的吸收和转运(Zhou *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2011)。这

与 Long 等(2022)的研究结果一致,投喂配合饲料组相比于投喂传统饵料能够提高中华绒螯蟹的非特异性免疫能力。

综上所述,在稻田养殖模式下,中华绒螯蟹幼蟹相较于投喂传统饵料,投喂配合饲料对幼蟹的生长、最终养殖性能和营养物质消化吸收以及抗氧化免疫性能具有明显的优势。此外,稻蟹模式下的中华绒螯蟹 1 龄性早熟率较池塘养殖条件下要高,今后可以进一步通过饲料配方优化,开发适合稻蟹模式下幼蟹的优质高效的实用配合饲料,通过营养调控手段进一步降低性早熟率以优化稻蟹养殖技术。

参 考 文 献

- BAO J, JIANG H B, LI X D. Thirty years of rice-crab coculture modes in China research progress and prospects. *Reviews in Aquaculture*, 2022, 14(3): 1597–1612
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. *China fishery statistical yearbook 2021*. Beijing: China Agriculture Press, 2021 [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. 2021 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2021]
- CHEN L Q, DU N S, LAI W. Evaluation of soybean cake as a substitute for partial fish meal in formulated diets for Chinese mitten-handed crab juvenile. *Journal of Fisheries of China*, 1994, 18(1): 24–31 [陈立桥, 堵南山, 赖伟. 中华绒螯蟹蟹种配饵中豆粕替代部分鱼粉的适宜含量. *水产学报*, 1994, 18(1): 24–31]
- CHEN Z, LIANG M Q, ZHENG K K, *et al.* Impact of dietary protein level on growth performance, body composition and protease activity of juvenile *Lateolabrax japonicus*. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(2): 51–59 [陈壮, 梁萌青, 郑珂珂, 等. 饲料蛋白水平对鲈鱼生长、体组成及胃蛋白酶活力的影响. *渔业科学进展*, 2014, 35(2): 51–59]
- CHI S Y, YANG Q H, ZHOU Q C, *et al.* Activities of amylase and lipase in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) zoea, mysis and postlarvae. *Fisheries Science*, 2005, 24(4): 4–6 [迟淑艳, 杨奇慧, 周歧存, 等. 南美白对虾幼体和仔虾淀粉酶和脂肪酶活力的研究. *水产科学*, 2005, 24(4): 4–6]
- DUAN Y H, TAN B, LI J J, *et al.* Optimal branched-chain amino acid ratio improves cell proliferation and protein metabolism of porcine enterocytes *in vivo* and *in vitro*. *Nutrition*, 2018, 54: 173–181
- FYNN-AIKINS K, HUGHES S G, VANDENBERG G W. Protein retention and liver aminotransferase activities in Atlantic salmon fed diets containing different energy sources. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A: Physiology*, 1995, 111(1): 163–170
- GUO T. Effect of Chromium on oxidative damage and antioxidant capacity of *Ctenopharyngodon idellus*. Master's Thesis of Southwest University, 2013, 23–27 [郭婷. 铬暴露对草鱼的氧化损伤及抗氧化能力的影响. 西南大学硕士研究生学位论文, 2013, 23–27]
- GUO Y J, LUO Z L, YIN X L, *et al.* Effects of four types of diet on the growth and body composition of *Mugil cephalus*. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(1): 48–53 [郭永坚, 罗昭林, 阴晓丽, 等. 4 种饲料投喂对鲢(*Mugil cephalus*) 生长及鱼体组成的影响. *渔业科学进展*, 2015, 36(1): 48–53]
- HAN W F, SUN Y F, LIU J, *et al.* Effects of diet on growth, digestive enzymes, antioxidant enzymes, and immune enzymes of juvenile Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*). *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(3): 314–325 [韩文峰, 孙云飞, 刘健, 等. 不同饵料投喂模式对中华绒螯蟹幼蟹生长和生理生化的影响. *中国水产科学*, 2021, 28(3): 314–325]
- HE J, WU X G, CHENG Y X, *et al.* Comparison of the culture performance and profitability of wild-caught and captive pond-reared Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) juveniles reared in grow-out ponds: Implications for seed selection and genetic selection programs. *Aquaculture*, 2014, 434: 48–56
- HE J, WU X G, LONG X W, *et al.* Culture performance and gonadal development of the first generation of selectively bred Chinese mitten crabs from wild and cultured populations. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(4): 808–818 [何杰, 吴旭干, 龙晓文, 等. 长江水系中华绒螯蟹野生和养殖群体选育子一代养殖性能和性腺发育的比较. *海洋与湖沼*, 2015, 46(4): 808–818]
- 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. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(3): 606–618 [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. *中国水产科学*, 2016, 23(3): 606–618]
- HE Z G, WANG J L, WU Y A, *et al.* Effect of dietary lipid levels on serum biochemical indices, immune responses and antioxidant capability of juvenile Furong crucian carp. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(4): 655–662 [何志刚, 王金龙, 伍远安, 等. 饲料脂肪水平对芙蓉鲤幼鱼血清生化指标, 免疫反应及抗氧化能力的影响. *水生生物学报*, 2016, 40(4): 655–662]
- JIANG H B, CHEN L Q, WANG Q, *et al.* Effects of dietary protein on activities of digestive enzyme and trypsin mRNA abundance in *Eriocheir sinensis* juveniles. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(2): 216–221 [江洪波, 陈立桥, 王群, 等. 饵料蛋白质对中华绒螯蟹仔蟹消化酶活性及胰蛋白酶 mRNA 丰度的影响. *水产学报*, 2005, 29(2): 216–221]

- JIANG X D, WU X G, ZHANG J B, *et al.* Effects of three feeding modes on early culture performance, non-specific immunity and disease resistance of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). Chinese Journal of Zoology, 2017, 52(1): 85–96 [姜晓东, 吴旭干, 张金彪, 等. 三种饵料模式对中华绒螯蟹幼蟹早期养殖性能、非特异免疫性能及抗病力的影响. 动物学杂志, 2017, 52(1): 85–96]
- JIANG X, CHEN L Q, SUN S M, *et al.* Apparent digestibility of 10 feed ingredients for Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*. Marine Fisheries, 2013, 35(2): 209–216 [江星, 陈立侨, 孙盛明, 等. 中华绒螯蟹对 10 种常见饲料蛋白源的表观消化率. 海洋渔业, 2013, 35(2): 209–216]
- LI B, LIANG X F, LIU L W, *et al.* Effects of dietary protein levels on growth, feed utilization and the enzymes activity on nitrogen metabolism of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(2): 233–240 [李彬, 梁旭方, 刘立维, 等. 饲料蛋白水平对大规格草鱼生长、饲料利用和氮代谢相关酶活性的影响. 水生生物学报, 2014, 38(2): 233–240]
- LI H Y, WU L X, CHEN W, *et al.* Effects of feeding frequency and food type on growth and energy budget of juvenile Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(5): 475–480 [李洪宇, 吴立新, 陈炜, 等. 投饲频率和饵料种类对中华绒螯蟹幼蟹生长及能量收支的影响. 大连海洋大学学报, 2013, 28(5): 475–480]
- LI N, ZHENG Y H, WU X F, *et al.* Tolerance of selenium-yeast in diets of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(6): 1949–1960 [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. 动物营养学报, 2017, 29(6): 1949–1960]
- LI X W, LI Z J, LIU J S, *et al.* Growth, precocity, enzyme activity and chemical composition of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*, fed different dietary protein-to-energy ratio diets. Aquaculture, 2011, 43(11): 1719–1728
- LI Y, WANG W, MA X Z, *et al.* Effect of rice-crab culture system on zoobenthos diversity in paddy field. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 838–843 [李岩, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共作对稻田水体底栖动物多样性的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 838–843]
- LIU S Q, JIANG X L, MOU H J, *et al.* Effects of immunopoiysaccharide on LSZ, ALP, ACP and POD activities of *Penaeus chinensis* serum. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1999, 30(3): 278–283 [刘树青, 江晓路, 牟海津, 等. 免疫多糖对中国对虾血清溶菌酶、磷酸酶和过氧化物酶的作用. 海洋与湖沼, 1999, 30(3): 278–283]
- LIU X G. Nutritional requirement and feed processing technique for *Eriocheir sinensis* in different growth periods. Fishery Modernization, 2001(6): 3–5 [刘兴国. 河蟹不同生长阶段的营养需求与饲料配制技术. 渔业现代化, 2001(6): 3–5]
- LONG X W, PAN J, WADE N M, *et al.* Effects of three feeding modes on the metabolism, antioxidant capacity, and metabolome of the adult male Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*. Aquaculture International, 2022, 30(3): 1101–1119
- 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*. Aquaculture, 2017, 473: 545–553
- LÜ D F, WANG W, MA X Z, *et al.* The effect of stocking density of Chinese mitten crab on yields of rice and crab in rice-crab culture system. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(7): 1677–1680 [吕东锋, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共生系统河蟹放养密度对水稻和河蟹的影响. 湖北农业科学, 2010, 49(7): 1677–1680]
- MU Y Y, SHIM K F, GUO J Y. Effects of protein level in isocaloric diets on growth performance of the juvenile Chinese hairy crab, *Eriocheir sinensis*. Aquaculture, 1998, 165(1/2): 139–148
- RACOTTA I S, PALACIOS E, IBARRA A M. Shrimp larval quality in relation to broodstock cond. Aquaculture, 2003, 227(1/2/3/4): 107–130
- SUN F Y, YU F Q, SUN W T, *et al.* Integration and demonstration technology of rice crab ecological cultivation. Liaoning Agricultural Sciences, 2010(5): 61–62 [孙富余, 于凤泉, 孙文涛, 等. 稻蟹生态种养生产技术集成与示范技术要点. 辽宁农业科学, 2010(5): 61–62]
- WANG H N, JIANG X D, WU X G, *et al.* Evaluation of culture and immunity performance of the second-year-old early-maturing and late-maturing strains of the fourth selective generation during the juvenile culture of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). Journal of Fisheries of China, 2020, 44(5): 816–826 [王海宁, 姜晓东, 吴旭干, 等. 中华绒螯蟹二龄早熟和晚熟品系选育第四代在扣蟹阶段养殖性能和免疫性能的评价. 水产学报, 2020, 44(5): 816–826]
- WANG S B, JIANG X D, ZHANG J B, *et al.* Comparison of pond culture effects of juvenile *Eriocheir sinensis* under two feeding modes. Fisheries Science and Technology Information, 2018, 45(3): 162–166 [王少兵, 姜晓东, 张金彪, 等. 两种投饲模式下中华绒螯蟹扣蟹池塘养殖效果比较. 水产科技情报, 2018, 45(3): 162–166]
- WU X G, WANG Z K, CHENG Y X, *et al.* Effects of dietary phospholipids and highly unsaturated fatty acids on the precocity, survival, growth and hepatic lipid composition of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards). Aquaculture Research, 2011, 42(3): 457–468
- XIONG B H, LUO Q R, ZHOU Z K, *et al.* Introduction of tables of feed composition and nutritive values in China (2018 twenty-ninth edition). China Feed, 2018(21): 63–73 [熊本海, 罗清尧, 周正奎, 等. 中国饲料成分及营养价值表(2018年第29版)制订说明. 中国饲料, 2018(21): 63–73]
- XU C Y, CHI C, ZHENG X C, *et al.* Effects of fermented feed on the growth performance, oxidation resistance, immune

- function and protein metabolism of juvenile Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*). *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(10): 2209–2217 [许晨远, 迟骋, 郑肖川, 等. 发酵饲料对中华绒螯蟹幼蟹生长、抗氧化、免疫和蛋白代谢的影响. *水产学报*, 2019, 43(10): 2209–2217]
- XU R W, JIANG J P, LU K H, *et al.* A preliminary study on causes of sexual premature of *Eriocheir sinensis*. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2001, 20(3): 195–198 [徐如卫, 江锦坡, 陆开宏, 等. 河蟹性早熟原因的初步研究. *浙江海洋学院学报: 自然科学版*, 2001, 20(3): 195–198]
- XUE Q G, RENAULT T. Enzymatic activities in European flat oyster, *Ostrea edulis*, and Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, hemolymph. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2000, 76(3): 155–163
- YANG L L, YANG X Z, ZHAO L L, *et al.* Effects of two different diets on the growth, digestive enzyme activity and haemocytes in juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2011, 50(5): 619–624 [杨丽丽, 杨筱珍, 赵柳兰, 等. 冰鲜野杂鱼和配合饲料对中华绒螯蟹幼蟹生长、消化酶活力及血细胞的影响研究. *复旦学报: 自然科学版*, 2011, 50(5): 619–624]
- YANG X, YE J Y, ZHANG Y X, *et al.* Effects of fish meal replacement by common cottonseed meal and fermented cottonseed meal on growth performance, body composition and hepatopancreas digestive enzyme activities of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(3): 683–693 [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. *动物营养学报*, 2014, 26(3): 683–693]
- ZHANG B Q. Shelling additive and its application in *Penaeus orientalis* Kishinouye and *Eriocheir sinensis* feed. *Feed Industry Magazine*, 1992, 13(6): 44–45 [张丙群. 脱壳素类添加剂及其在虾蟹饲料中的应用. *饲料工业*, 1992, 13(6): 44–45]
- ZHANG L S, XU Q Y. Studies on sex maturity and early maturity of mitten crab (*Eriocheir sinensis*) in natural and farming water. *Fisheries Science and Technology Information*, 2001, 28(3): 106–111 [张列士, 徐琴英. 自然及养殖水体河蟹性成熟和性早熟的研究. *水产科技情报*, 2001, 28(3): 106–111]
- ZHANG L, CHEN L Q, HONG M L, *et al.* Apparent digestibility of crude protein and amino acids of 11 feed ingredients for *Eriocheir sinensis*. *Journal of Fisheries of China*, 2007, 31(s1): 116–121 [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. *水产学报*, 2007, 31(s1): 116–121]
- ZHANG L. The study of effect of dietary protein sources and anti-nutritional factors on physiology and chemistry in the Chinese mitten-handed crab, *Eriocheir sinensis*. Master's Thesis of East China Normal University, 2007, 40–41 [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. 华东师范大学硕士研究生学位论文, 2007, 40–41]
- ZHAO Y. Study on the impact of thermal discharge from power plant on phytoplankton based on hydrodynamic conditions Xiangshan Bay. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2012, 39–47 [赵瀛. 基于水动力条件下象山港电厂温排水热污染对浮游植物影响研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2012, 39–47]
- ZHOU X W, CHEN Q X, CHEN Z, *et al.* Effects of oxidoperoxovanadate (V) complexes on the activity of green crab (*Scylla serrate*) alkaline phosphatase. *Biochemistry (Moscow)*, 2000, 65(12): 1424–1428
- ZHU S C, LONG X W, XIANG C L, *et al.* Effects of dietary fishmeal replacement with protein mixtures on growth performance, physiological metabolism and biochemical composition of juvenile Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). *South China Fisheries Science*, 2019, 15(2): 83–92 [朱筛成, 龙晓文, 向朝林, 等. 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. *南方水产科学*, 2019, 15(2): 83–92]

(编辑 陈 辉)

Effects of Two Feeding Modes on the Culture Performance and Physiological Metabolism of Juvenile Chinese Mitten Crabs (*Eriocheir sinensis*) Reared in Rice Fields

YANG Shuaishuai¹, ZHU Shaicheng¹, ZHANG Dongdong¹, PAN Zhenxiang¹,
LI Jiayao¹, WU Xugan^{1,2,3①}, ZHENG Shanyu⁴

(1. Shanghai Aquaculture Engineering Technology Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fish Nutrition and Environmental Ecology Research Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center of Aquatic Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Agricultural and Rural Bureau of Huaiyin District, Huaian 223300, China)

Abstract The Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) is an important economic crab in China. Across most of China, juvenile Chinese mitten crabs are cultured in earthen ponds. Juvenile crab cultured in rice fields is mainly restricted to the northeastern region. Rice-crab coculture is a new mode of sustainable development, which has developed over the past 30 years in China with progress in field engineering, culture density of the Chinese mitten crab, and ecological benefits. However, there are no reports on appropriate feeds in rice-crab coculture. Presently, crabs reared in an earthen pond consume a traditional diet (including soybean meal, corn, bran, and wheat) or formulated feed. Due to the numerous advantages of formulated feed (including comprehensive nutrition, stable quality, and ease of feeding) the development of practical and cheap formulated feed for Chinese mitten crab is the latest focus for promoting the sustainable development of the Chinese mitten crab industry. Although researchers have developed a series of formulated feed for Chinese mitten crab, traditional feed is more commonly used in the culture of Chinese mitten crab due to farmers feeding habits and the low price of traditional products. However, numerous studies have shown that feeding Chinese mitten crabs formulated diets has many advantages, for example: it improves the survival rate, reduces the early maturity rate, improves non-specific immunity and disease resistance of juvenile crabs, improves the quality and culture performance of crab species, and economic benefits, etc. However, research were usually conducted under indoor or pond culture conditions. The culture environment of rice fields and ponds are quite different to each other. The feed sources and environmental stress on juvenile crabs may also be quite different between the culture environments. Therefore, it is important to explore the feeding mode of juvenile crabs cultured in rice fields. However, the optimum feed and the effect of different diets on the growth and physiological metabolism of Chinese mitten crab reared in rice fields remains unclear. It is important to optimize the rice-crab breeding mode to achieve a high-quality Chinese mitten crab industry. Formulated diets and traditional diets (soybean meal, bran, corn, and wheat) were fed to juvenile *E. sinensis* cultured in a rice field for 152 days. Each feeding group included three replicates. This study was conducted to compare formulated diets with traditional diets using culture performance, protein metabolism, digestive enzymes, and the antioxidant and immune indexes of juvenile crabs. The results showed that: (1) the body weights of female and male crabs from the formulated diet group were higher than those in the traditional diet group, but the differences were not significant ($P>0.05$) (Fig. 1–3); (2) in terms of culture performance, the average body weight and yield of juvenile crabs, 1-year-old precocious crabs, and the overall total yield and survival rate of juvenile crabs in the formulated diet group were slightly higher than those of the

① Corresponding author: WU Xugan, E-mail: xgwu@shou.edu.cn

traditional diet group. The feed conversion ratio of the formulated diet group was much lower than that of the traditional diet group ($P<0.05$); (3) in terms of protein metabolism, the total protein content in the hemolymph of both female and male crabs fed the formulated diet was significantly higher than that in the traditional diet group ($P<0.05$). Conversely, the contents of urea nitrogen in the hemolymph of male crabs and the activity of glutamic oxaloacetic transaminase in the hepatopancreas of the traditional diet group were significantly higher than those of the formulated diet group ($P<0.05$); (4) lipase in the hepatopancreas of female and male crabs in the formulated feed group was significantly higher than that in the traditional diet group ($P<0.05$). Conversely, the α -amylase activity of the male crabs in the formulated diet group was significantly lower than that of the traditional diet group; (5) the total antioxidant capacity, alkaline phosphatase, and acid phosphatase activities in the hemolymph of female crabs and the acid phosphatase activity in the hepatopancreas of the formulated diet group were significantly higher than those of the traditional feed group ($P<0.05$). In conclusion, feeding a formulated diet can improve the culture performance, promote protein deposition and lipid absorption, and enhance the antioxidant and immune capacity of juvenile *E. sinensis* reared in a rice field. These factors result in improved crab quality. This study provides a basis for optimizing the culture technology of Chinese mitten crab and the development of a formulated diet for improved rice-crab coculture.

Key words *Eriocheir sinensis*; Rice-crab co-culture; Feeding mode; Culture performance; Physiological metabolism