

## 黄河口盐碱地区稻蟹种养模式下中华绒螯蟹适宜放养密度的初探

李凤璐<sup>1</sup>, 朱筛成<sup>1</sup>, 李嘉尧<sup>1,2,3</sup>, 成永旭<sup>1,2,3</sup>

(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)

**摘要:** 为了探索盐碱地稻蟹种养中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)适宜的放养密度,在黄河口盐碱地进行为期180 d的稻蟹共作试验(雌蟹:雄蟹=1:1),研究了不同放养密度(1.50、0.75和0.38只/m<sup>2</sup>,分别记为D150、D075和D038组)对中华绒螯蟹生长和养殖性能、可食组织系数、生化组成、生理代谢、饵料贡献和经济效益的影响。结果显示:(1)随着养殖密度的降低,中华绒螯蟹的增重率、特定生长率和成活率显著升高,而产量和饵料系数显著降低。(2)各密度组的中华绒螯蟹可食组织系数和总可食率无显著差异。(3)随着养殖密度降低,雌、雄蟹肌肉中粗蛋白含量显著降低,而雌蟹的肝胰腺总脂肪含量显著增加。(4)就生理指标而言,雌蟹肝胰腺中碱性磷酸酶、酸性磷酸酶活力随养殖密度降低而显著升高,而血清中总抗氧化能力和丙二醛含量呈显著下降趋势;类似地,雄蟹肝胰腺中碱性磷酸酶活力在D038组最高,而肝胰腺中丙二醛含量和血清中总抗氧化能力显著降低,在D038组最低。(5)不同放养密度下中华绒螯蟹的第一食物来源均为饲料(39.39%~52.33%),且随养殖密度的降低,食源中饲料占比呈上升趋势,而食源中本底蟹占比呈下降趋势。(6)各组的部分总收入和部分总利润无显著差异,D038组的投资回报率显著高于其他密度组。综上所述,虽高密度组获得最高的产量和收入,但低放养密度组的中华绒螯蟹取得最佳的生长性能和健康状况,且利润和投资回报率最高。因此,在本试验条件下,黄河口盐碱地的稻蟹模式中中华绒螯蟹适宜的放养密度为0.38只/m<sup>2</sup>。

**关键词:** 盐碱地; 稻蟹种养; 放养密度; 养殖性能; 饵料贡献

**中图分类号:** S 966.16 **文献标志码:** A

盐碱地是困扰全球的一个难题,严重影响盐碱地区农作物的产量,成为制约经济发展的一个重要因素。目前,我国已在盐碱地成功进行了凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)、梭鱼(*Liza haematocheila*)和罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)等水产品种的规模化养殖<sup>[1]</sup>。中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)是我国主要的养殖经济蟹类。据统计,2021年我国中华绒螯蟹的总产量约为80.8万t<sup>[2]</sup>。我国的中华绒螯蟹养殖主要分布在华东、华中及东北3个地区,此外云贵高原地区和青海盐碱湖地区也有养殖,范围几乎遍布全国各地<sup>[3]</sup>。

水稻是我国主要的粮食产物,已培育出多种耐盐碱水稻,因此被认为是适宜盐碱地种植的经济作物<sup>[4]</sup>。稻蟹种养模式能够充分利用稻田生态

系统,做到了“不与人争粮,不与粮争地”,达到“一田两用,一水双收”的效果,有效地促进水稻生长,增加农渔民的收入<sup>[5]</sup>。稻蟹种养能够降低养殖过程对环境的影响程度,中华绒螯蟹在稻田的活动也可以松动土壤,捕食田间害虫,排泄物也可以促进水稻生长,因此可以减少稻田农药和肥料的使用;稻田为中华绒螯蟹提供食物来源和庇护所,可适当减少饵料的投喂量,降低养殖成本和对环境的影响,因此发展稻蟹种养可以大大提高生产的经济效益和生态效益<sup>[6-7]</sup>。

目前,我国稻蟹综合种养在田间工程、水稻种植方式和环境生态等方面取得了一定的进展<sup>[8-10]</sup>,也有部分基于稻蟹模式下适合的中华绒螯蟹养殖密度的研究<sup>[11-12]</sup>,放养密度是影响水产动物生长

收稿日期: 2022-12-29 修回日期: 2023-05-02

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-48); 黄河三角洲领军人才项目(DYRC20190210)

作者简介: 李凤璐(1998—),男,硕士研究生,研究方向为甲壳动物生态养殖。E-mail: 15684176725@163.com

通信作者: 成永旭, E-mail: yxcheng@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

的关键因素<sup>[13-14]</sup>,养殖密度的增加通常会导致水产动物对饵料和空间的争夺<sup>[15]</sup>,从而降低水产动物的生长和免疫力,最终造成中华绒螯蟹增重率和成活率明显降低<sup>[16-17]</sup>。但是目前稻蟹模式下适宜中华绒螯蟹养殖密度的研究主要针对幼蟹阶段<sup>[11]</sup>,且都在东北<sup>[18]</sup>和华中地区开展<sup>[19]</sup>,这些地区的土质和水文条件与盐碱地区相比差异较大,在盐碱条件下的中华绒螯蟹摄食、能量代谢、应对外界的生理压力<sup>[20-21]</sup>以及水稻的生长和田间生态系统均与淡水地区不同<sup>[22-23]</sup>。然而,目前还未有在盐碱地区开展稻蟹模式下中华绒螯蟹适宜放养密度的研究。因此,本实验在华东地区的黄河口盐碱地开展稻蟹种养模式下中华绒螯蟹适宜的放养密度的研究,以为盐碱地稻蟹种养模式的推广提供一定的理论依据和实践参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计、试验用蟹及养殖管理

试验于2021年4—10月在山东东营水语小

镇的12个室外土塘(长×宽=24.3 m×16.3 m)进行,盐度为3~5,总碱度为100~240 mg/L。每个池塘(图1)内挖掘L型环沟,沟宽0.9 m,沟深0.6 m,使得环沟面积低于总面积的10%。池塘四周设有0.4 m高的防逃围板。4月底在环沟内种植一行伊乐藻(*Elodea nuttallii*),株距1 m,5月中旬在中间平台种植水稻,株距20 cm。

试验选用黄河野生蟹,于6月初挑选附肢健全、活力较好的黄河野生蟹,初始体质量:雌蟹(26.92±0.25) g、雄蟹(27.17±0.35) g,按照1.5只/m<sup>2</sup>(D150)、0.75只/m<sup>2</sup>(D075)和0.38只/m<sup>2</sup>(D038)3个放养密度投放,每个密度重复4个池塘,每个池塘中雌、雄蟹的数量比为1:1。养殖期间每天17:00投喂饲料,根据水温 and 蟹体质量调整投喂量,养殖期间定期检测水体的水质和水温,试验期间的水体pH为7.0~9.5、溶氧>4.0 mg/L、氨氮<0.5 mg/L、亚硝酸盐<0.15 mg/L。

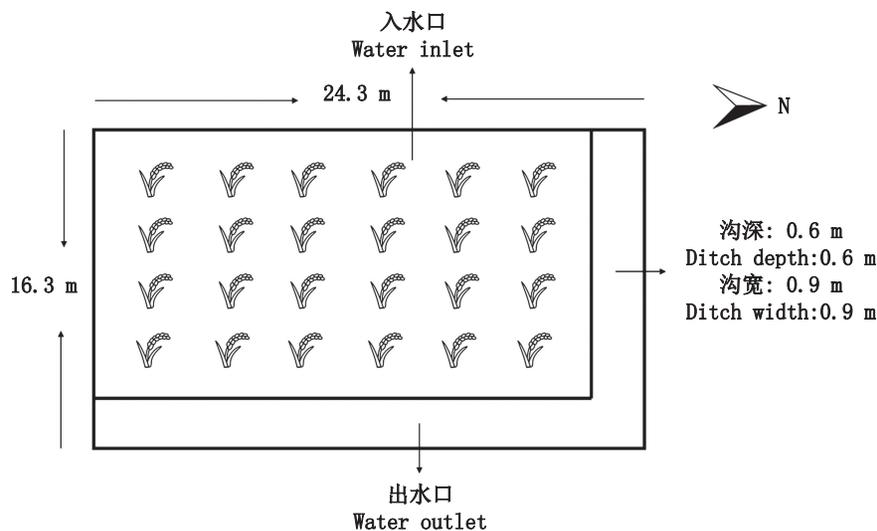


图1 环沟设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the design of the ring ditch field block

### 1.2 样品和数据采集

试验过程中,每隔45天从每个池塘随机抓捕20只蟹(雌、雄各10只),用吸水纸擦干体表水分后用电子天平(精确至0.01 g)称重以检查中华绒螯蟹增重情况。试验结束时(10月中旬)从每个池塘随机抓捕6只蟹(雌、雄各3只),准确称重后置于冰上麻醉,然后用1.0 mL无菌注射器从第3支步足基部抽取2 mL血淋巴样品装于5 mL离心

管中,于-40℃中保存备用。然后沿蟹壳侧面将蟹壳与躯体分离,解剖取出肝胰腺、性腺和躯体肌肉并准确称重,装入自封袋中于-20℃中保存备用。实验结束后统计各池塘的成活个数和投喂饲料总量,并计算饵料系数。各组河蟹的增重率(Weight gain rate, WGR)、特定生长率(Specific growth rate, SGR)、成活率(Survival rate, SR)、肝胰腺指数(Gonadosomatic index, GSI)、性腺指数

(Hepatosomatic index, HSI)、出肉率(Meat yield, MY)、总可食率(Total edible yield, TEY)、饵料系数(Feed conversion rate, FCR)计算公式:

$$W_{GR}=100\% \times (W_2 - W_1) / W_1 \quad (1)$$

$$S_{GR}=100\% \times (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

$$S_R=100\% \times N_2 / N_1 \quad (3)$$

$$H_{SI}=100\% \times W_h / W \quad (4)$$

$$G_{SI}=100\% \times W_g / W \quad (5)$$

$$M_Y=100\% \times 2 \times W_b / W \quad (6)$$

$$T_{EY}=G_{SI} + H_{SI} + M_Y \quad (7)$$

$$F_{CR}=W_f / (W_4 - W_3) \quad (8)$$

式中: $W_{GR}$ 为增重率,%; $W_1$ 和 $W_2$ 分别为日龄 $t_1$ 和 $t_2$ 时各组中华绒螯蟹的平均质量,g; $S_{GR}$ 为特定增长率,%/d; $S_R$ 为成活率,%; $N_2$ 和 $N_1$ 分别为存活个体数和初始放养数; $H_{SI}$ 为肝胰腺指数,%; $W_h$ 为肝胰腺质量,g; $W$ 为采样蟹的体质量,g; $G_{SI}$ 为性腺指数,%; $W_g$ 为性腺质量,g; $M_Y$ 为出肉率,%; $W_b$ 为一半躯体肌肉的质量,g; $T_{EY}$ 为总可食率,%; $F_{CR}$ 为饵料系数; $W_f$ 、 $W_3$ 和 $W_4$ 分别为消耗饲料总质量、最初放养蟹的质量和最终产出蟹总质量,g。

### 1.3 经济效益分析

实验的部分总成本包括购买蟹种、水稻秧苗和饲料的费用,部分总收入来自中华绒螯蟹和水稻的出售收入,为了比较各实验组的经济效益,需计算各实验组的部分总利润和投资回报率,计算公式:

$$M_3=M_2-M_1 \quad (9)$$

$$R_{OI}=100\% \times M_3 / M_1 \quad (10)$$

式中: $M_3$ 为部分总利润, $10^3$ 元/hm<sup>2</sup>; $M_1$ 和 $M_2$ 分别为部分成本和部分收入, $10^3$ 元/hm<sup>2</sup>; $R_{OI}$ 为投资回报率,%。

### 1.4 生理代谢指标测定

参考赵磊等<sup>[24]</sup>的方法制备血淋巴和肝胰腺匀浆液,获得的上清液于-40℃中保存备用。采用南京建成生物工程研究生产的试剂盒测定中华绒螯蟹肝胰腺和血淋巴中总抗氧化能力(Total antioxidant capacity, T-AOC)、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、总超氧化物歧化酶(Total superoxide dismutase, T-SOD)、肝胰腺中碱性磷酸酶(Alkaline phosphatase, ALP)、酸性磷酸酶(Acid phosphatase, ACP)、胰蛋白酶(Trypsin)、脂肪酶(Lipase, LPS)、 $\alpha$ -淀粉酶( $\alpha$ -amylase,  $\alpha$ -AMS)、纤维素酶(Cellulase, CL)。

### 1.5 生化组成测定

中华绒螯蟹肝胰腺和躯体的水分含量采用冷冻干燥法进行测定。按照FOLCH等<sup>[25]</sup>的方法提取中华绒螯蟹肝胰腺和躯体中的总脂并测定其含量。根据AOAC<sup>[26]</sup>标准利用凯氏定氮法测定中华绒螯蟹肝胰腺和肌肉中的粗蛋白含量,在马弗炉中以550℃灼烧法测定肝胰腺和肌肉中粗灰分含量。

### 1.6 稳定性同位素分析

参照李聪等<sup>[27]</sup>的方法在实验结束前采集水稻、伊乐藻、青苔、浮游动物、底栖生物等样品测定其稳定性同位素。实验中所收集样品的稳定性同位素的C元素和N元素含量交由上海交通大学分析测试中心由Vario EL Cube有机元素分析仪测得,检测限:0.01%,方法为动态燃烧法。样品经研磨后送入稳定性同位素质谱仪(ISOPRIME 100, Isoprime Corporation, Cheadle, UK)进行分析。碳、氮稳定同位素值分别以国际通用的标准物质PDB(Pee Dee Belemnite, 美洲拟箭石)和空气N<sub>2</sub>作为参考标准,碳、氮稳定性同位素值结果以 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 形式来表示。 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 计算公式:

$$\delta X=1000\% \times [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}})-1] \quad (11)$$

式中: $\delta X$ 为 $^{13}C$ 或 $^{15}N$ ,‰; $R_{\text{sample}}$ 为样本的同位素比值 $^{13}C/^{12}C$ 或 $^{15}N/^{14}N$ ; $R_{\text{standard}}$ 为标准品的同位素比值。

每测定10个样品插入1个标准样品,使用国际标准品USGS 24(-16.049‰ VPDB)和USGS 26(53.7‰ VN2)分别校准碳、氮稳定同位素,分析精度为0.05‰( $\delta^{13}C$ )、0.06‰( $\delta^{15}N$ ),每个样品平行测定3次,并随机挑选1个样品进行复测<sup>[27]</sup>。中华绒螯蟹 $\delta^{15}N$ 的分馏系数(Discrimination factor)即 $\Delta\delta^{15}N$ 取值3.4‰, $\delta^{13}C$ 的分馏系数 $\Delta\delta^{13}C$ 取值1.3‰<sup>[28]</sup>。

### 1.7 数据处理

采用SPSS 25.0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。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)对实验结果进行方差分析,采用Tukey's法进行多重比较,取 $P<0.05$ 为差异显著。除同位素结果外,其他数据根据中华绒螯蟹养殖密度进行线性回归分析,以确定不同养殖密度与生理代

谢指标的关系。使用 Adobe Illustrator 2020 软件作图,使用 R 语言的 SIAR 程序包对所得  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  数据进行分析 and 饵料贡献率的计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹生长和养殖性能的影响

不同放养密度组中华绒螯蟹生长和养殖性能如表 1 所示。中华绒螯蟹整体的终末体质量、增重率、特定生长率和成活率均随着放养密度降低呈显著上升趋势 ( $P<0.05$ )。而中华绒螯蟹整体的产量和饵料系数随放养密度降低呈显著下降趋势, D150 组显著高于 D038 组 ( $P<0.05$ ), 但与 D075 组无显著差异。雌、雄蟹的终末体质量、增重率、特定生长率和成活率均随密度降低而增加, 产量呈显著下降趋势 ( $P<0.05$ ), 但与

D075 组无显著差异。

### 2.2 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹可食组织系数和生化组成的影响

由表 2 可知:不同放养密度组雌、雄蟹的可食组织系数和总可食率均无显著差异,但数值上雌蟹的肝胰腺指数、性腺指数和总可食率随着放养密度降低呈上升趋势。由表 3 可知:雌、雄蟹肌肉中粗蛋白含量均随着放养密度降低呈先下降后上升的趋势,以 D150 组最高 ( $P<0.05$ ),雌、雄蟹肌肉中其余营养组成无显著差异。由表 4 可知:雌、雄蟹肝胰腺中粗脂肪含量均随着放养密度降低呈上升趋势,其中 D038 组雌蟹粗脂肪含量显著高于 D150 和 D075 组,各组雄蟹肝胰腺中常规生化指标均无显著差异,但数值上,雄蟹粗脂肪的含量随着放养密度降低呈上升趋势。

表 1 稻蟹种养中不同放养密度对成蟹的生长和养殖性能的影响  
Tab. 1 Effects of different stocking densities on growth and culture performance of adult *E. sinensis* in rice-crab co-culture system

| 项目 Items                       | D150                      | D075                       | D038                      | P     | R <sup>2</sup> |
|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-------|----------------|
| 总体 Whole                       |                           |                            |                           |       |                |
| 初始平均体质量 IBW/g                  | 27.42±0.37                | 27.25±0.09                 | 26.99±0.48                | -     | -              |
| 终末平均体质量 FBW/g                  | 89.29±1.41 <sup>b</sup>   | 93.97±0.68 <sup>ab</sup>   | 99.17±3.23 <sup>a</sup>   | 0.011 | 0.622          |
| 增重率 WGR/%                      | 228.15±4.50 <sup>b</sup>  | 243.11±0.95 <sup>ab</sup>  | 264.46±10.29 <sup>a</sup> | 0.015 | 0.592          |
| 特定生长率 SGR/(%/d)                | 0.90±0.01 <sup>b</sup>    | 0.93±0.01 <sup>ab</sup>    | 0.98±0.02 <sup>a</sup>    | 0.012 | 0.621          |
| 成活率 SR/%                       | 28.62±3.83                | 48.57±12.11                | 52.19±4.10                | 0.045 | 0.458          |
| 产量 Yield/(kg/hm <sup>2</sup> ) | 375.78±43.10 <sup>a</sup> | 258.46±56.04 <sup>ab</sup> | 179.57±30.32 <sup>b</sup> | 0.012 | 0.619          |
| 饵料系数 FCR                       | 2.93±0.13 <sup>a</sup>    | 2.78±0.06 <sup>ab</sup>    | 2.37±0.15 <sup>b</sup>    | 0.039 | 0.477          |
| 雌体 Female                      |                           |                            |                           |       |                |
| 初始体质量 IBW/g                    | 27.68±0.59                | 27.18±0.17                 | 27.06±0.43                | -     | -              |
| 终末体质量 FBW/g                    | 75.35±0.91 <sup>b</sup>   | 81.06±0.56 <sup>ab</sup>   | 84.00±3.64 <sup>a</sup>   | 0.018 | 0.573          |
| 增重率 WGR/%                      | 177.41±3.37 <sup>b</sup>  | 191.29±5.44 <sup>ab</sup>  | 209.27±13.42 <sup>a</sup> | 0.033 | 0.499          |
| 特定生长率 SGR/(%/d)                | 0.77±0.01 <sup>b</sup>    | 0.81±0.01 <sup>ab</sup>    | 0.85±0.03 <sup>a</sup>    | 0.033 | 0.500          |
| 成活率 SR/%                       | 29.42±8.53                | 48.36±12.96                | 54.49±6.10                | 0.102 | 0.335          |
| 产量 Yield/(kg/hm <sup>2</sup> ) | 165.49±48.12              | 108.71±23.40               | 83.92±12.33               | 0.091 | 0.353          |
| 雄体 Male                        |                           |                            |                           |       |                |
| 初始体质量 IBW/g                    | 27.17±0.21                | 27.32±0.24                 | 26.93±0.53                | -     | -              |
| 终末体质量 FBW/g                    | 103.23±2.21 <sup>b</sup>  | 106.87±1.13 <sup>ab</sup>  | 114.35±2.95 <sup>a</sup>  | 0.016 | 0.586          |
| 增重率 WGR/%                      | 278.84±8.11 <sup>b</sup>  | 292.19±4.15 <sup>ab</sup>  | 319.61±10.83 <sup>a</sup> | 0.016 | 0.586          |
| 特定生长率 SGR/(%/d)                | 1.01±0.02 <sup>b</sup>    | 1.04±0.01 <sup>ab</sup>    | 1.09±0.20 <sup>a</sup>    | 0.017 | 0.580          |
| 成活率 SR/%                       | 27.82±0.95                | 48.78±9.39                 | 49.89±14.04               | 0.111 | 0.322          |
| 产量 Yield/(kg/hm <sup>2</sup> ) | 210.29±13.81 <sup>a</sup> | 149.76±32.44 <sup>ab</sup> | 95.65±32.07 <sup>b</sup>  | 0.018 | 0.577          |

注:同行数据不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ), 相同小写字母表示差异不显著 ( $P>0.05$ ), - 表示未检测。

Notes: Values with the different lowercase letters within the same row mean significant differences ( $P<0.05$ ), while the same lowercase letters within the same row mean no significant differences ( $P>0.05$ ), - means not tested.

表2 稻蟹种养中不同放养密度对成蟹可食组织系数和总可食率的影响  
 Tab. 2 Effects of different stocking densities on edible tissue indices and total edible yield of adult *E. sinensis* in rice-crab co-culture system

| 项目 Items    | D150       | D075       | D038       | <i>P</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> |
|-------------|------------|------------|------------|----------|-----------------------|
| 雌体 Female   |            |            |            |          |                       |
| 性腺指数 GSI/%  | 5.51±0.23  | 6.16±0.17  | 6.75±0.71  | 0.111    | 0.322                 |
| 肝胰腺指数 HSI/% | 6.28±0.25  | 6.32±0.02  | 6.59±0.16  | 0.334    | 0.133                 |
| 出肉率 MY/%    | 24.28±0.63 | 24.03±0.93 | 23.36±0.33 | 0.377    | 0.113                 |
| 总可食率 TEY/%  | 36.07±0.90 | 36.51±0.76 | 36.70±0.54 | 0.615    | 0.038                 |
| 雄体 Male     |            |            |            |          |                       |
| 性腺指数 GSI/%  | 2.14±0.45  | 2.13±0.04  | 2.27±0.25  | 0.990    | 0.000                 |
| 肝胰腺指数 HSI/% | 5.75±0.26  | 5.80±0.10  | 5.75±0.34  | 0.801    | 0.010                 |
| 出肉率 MY/%    | 26.51±0.83 | 26.38±0.20 | 26.96±0.27 | 0.624    | 0.036                 |
| 总可食率 TEY/%  | 34.97±1.57 | 34.31±0.09 | 34.97±0.37 | 0.694    | 0.023                 |

表3 稻蟹种养中不同放养密度对成蟹肌肉常规生化指标的影响(湿质量)  
 Tab. 3 Effects of different stocking densities on biochemical composition of muscle of adult *E. sinensis* in rice-crab co-culture system (wet mass)

| 项目 Items            | D150                    | D075                    | D038                    | <i>P</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|
| 雌体 Female           |                         |                         |                         |          |                       |
| 水分 Moisture/%       | 78.87±0.43              | 80.91±0.82              | 79.98±1.07              | 0.269    | 0.055                 |
| 粗蛋白 Crude protein/% | 16.70±0.10 <sup>a</sup> | 15.74±0.08 <sup>b</sup> | 15.75±0.13 <sup>b</sup> | 0.228    | 0.200                 |
| 粗脂肪 Crude lipid/%   | 0.85±0.06               | 0.87±0.01               | 0.88±0.01               | 0.654    | 0.030                 |
| 灰分 Ash/%            | 1.52±0.04               | 1.51±0.02               | 1.60±0.05               | 0.481    | 0.131                 |
| 雄体 Male             |                         |                         |                         |          |                       |
| 水分 Moisture/%       | 81.39±1.08              | 81.82±3.20              | 81.66±1.03              | 0.826    | 0.002                 |
| 粗蛋白 Crude protein/% | 15.20±0.10 <sup>a</sup> | 14.59±0.11 <sup>b</sup> | 14.83±0.05 <sup>b</sup> | 0.449    | 0.084                 |
| 粗脂肪 Crude lipid/%   | 0.73±0.05               | 0.77±0.01               | 0.70±0.01               | 0.817    | 0.008                 |
| 灰分 Ash/%            | 1.55±0.02               | 1.72±0.06               | 1.71±0.05               | 0.185    | 0.391                 |

注:同行数据不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),相同小写字母表示差异不显著( $P>0.05$ )。

Notes: Values with the different lowercase letters within the same row mean significant differences ( $P<0.05$ ), while the same lowercase letters within the same row mean no significant differences ( $P>0.05$ ).

表4 稻蟹种养中不同放养密度对成蟹肝胰腺常规生化指标的影响(湿质量)  
 Tab. 4 Effects of different stocking densities on biochemical composition of hepatopancreas of adult *E. sinensis* in rice-crab co-culture system (wet mass)

| 项目 Items            | D150                   | D075                    | D038                    | <i>P</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> |
|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|
| 雌体 Female           |                        |                         |                         |          |                       |
| 水分 Moisture/%       | 62.91±2.79             | 62.11±2.83              | 61.32±1.17              | 0.690    | 0.008                 |
| 粗蛋白 Crude protein/% | 10.00±0.81             | 10.35±0.29              | 11.24±0.41              | 0.398    | 0.185                 |
| 粗脂肪 Crude lipid/%   | 9.73±0.17 <sup>b</sup> | 10.95±0.68 <sup>b</sup> | 17.09±1.09 <sup>a</sup> | 0.010    | 0.700                 |
| 灰分 Ash/%            | 1.39±0.17              | 1.34±0.04               | 1.65±0.04               | 0.387    | 0.190                 |
| 雄体 Male             |                        |                         |                         |          |                       |
| 水分 Moisture/%       | 67.70±3.05             | 66.09±3.31              | 66.99±2.44              | 0.859    | 0.002                 |
| 粗蛋白 Crude protein/% | 10.06±0.51             | 10.24±0.43              | 10.03±1.10              | 0.984    | 0.000                 |
| 粗脂肪 Crude lipid/%   | 10.52±0.93             | 12.72±1.34              | 13.74±0.07              | 0.172    | 0.286                 |
| 灰分 Ash/%            | 1.44±0.12              | 1.86±0.06               | 1.50±0.01               | 0.861    | 0.009                 |

注:同行数据不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),相同小写字母表示差异不显著( $P>0.05$ )。

Notes: Values with the different lowercase letters within the same row mean significant differences ( $P<0.05$ ), while the same lowercase letters within the same row mean no significant differences ( $P>0.05$ ).

### 2.3 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹生理代谢指标的影响

雌蟹肝胰腺中碱性磷酸酶(ALP)和酸性磷酸酶(ACP)活力随放养密度的降低显著升高( $P < 0.05$ ),各组肝胰腺中总抗氧化活力(T-AOC)、总超氧化物歧化酶(T-SOD)活力和丙二醛(MDA)含量无显著差异,而血清中T-AOC和MDA含量

随养殖密度降低呈显著下降趋势( $P < 0.05$ ),D075与D038组间无显著差异。雄蟹肝胰腺中ALP含量与雌蟹肝胰腺中变化趋势一致,均随着养殖密度显著升高( $P < 0.05$ ),而肝胰腺中MDA含量和血清中T-AOC均随着养殖密度降低而显著降低( $P < 0.05$ ),D075与D038组间无显著差异。见表5。

表5 稻蟹种养中不同放养密度对成蟹抗氧化和免疫指标的影响  
Tab. 5 Effects of different stocking densities on antioxidant and immunity parameters of adult *E. sinensis* in rice-crab co-culture system

| 项目 Items             | D150                   | D075                    | D038                    | P     | R <sup>2</sup> |
|----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|----------------|
| 雌体 Female            |                        |                         |                         |       |                |
| 肝胰腺 Hepatopancreas   |                        |                         |                         |       |                |
| 碱性磷酸酶 ALP(U/100g)    | 3.04±0.31 <sup>b</sup> | 4.78±0.55 <sup>a</sup>  | 4.45±0.42 <sup>ab</sup> | 0.002 | 0.690          |
| 酸性磷酸酶 ACP(U/100g)    | 6.02±0.59 <sup>b</sup> | 7.07±0.84 <sup>b</sup>  | 10.89±1.41 <sup>a</sup> | 0.078 | 0.306          |
| 总抗氧化能力 T-AOC(U/mg)   | 0.71±0.18              | 0.79±0.10               | 0.73±0.07               | 0.983 | 0.000          |
| 总超氧化物歧化酶 T-SOD(U/mg) | 5.00±0.48              | 5.71±0.32               | 5.54±0.85               | 0.818 | 0.003          |
| 丙二醛 MDA(nmol/mg)     | 1.66±0.14              | 1.47±0.32               | 1.52±0.34               | 0.767 | 0.008          |
| 血清 Serum             |                        |                         |                         |       |                |
| 总抗氧化能力 T-AOC(U/mL)   | 9.29±0.25 <sup>a</sup> | 6.97±0.40 <sup>b</sup>  | 6.42±0.23 <sup>b</sup>  | 0.000 | 0.648          |
| 总超氧化物歧化酶 T-SOD(U/mL) | 63.13±2.50             | 65.56±2.05              | 65.51±2.07              | 0.556 | 0.016          |
| 丙二醛 MDA(nmol/mL)     | 9.26±0.91 <sup>a</sup> | 5.87±0.54 <sup>b</sup>  | 7.94±0.48 <sup>ab</sup> | 0.397 | 0.060          |
| 雄体 Male              |                        |                         |                         |       |                |
| 肝胰腺 Hepatopancreas   |                        |                         |                         |       |                |
| 碱性磷酸酶 ALP(U/100g)    | 4.48±0.51 <sup>b</sup> | 4.48±0.53 <sup>b</sup>  | 6.60±0.69 <sup>a</sup>  | 0.074 | 0.312          |
| 酸性磷酸酶 ACP(U/100g)    | 9.93±1.19              | 13.39±3.05              | 11.98±2.39              | 0.105 | 0.265          |
| 总抗氧化能力 T-AOC(U/mg)   | 0.77±0.16              | 0.77±0.09               | 0.77±0.07               | 0.956 | 0.000          |
| 总超氧化物歧化酶 T-SOD(U/mg) | 6.37±0.29              | 6.75±0.41               | 6.51±0.67               | 0.418 | 0.035          |
| 丙二醛 MDA(nmol/mg)     | 3.02±0.40 <sup>a</sup> | 2.06±0.24 <sup>ab</sup> | 1.35±0.22 <sup>b</sup>  | 0.008 | 0.455          |
| 血清 Serum             |                        |                         |                         |       |                |
| 总抗氧化能力 T-AOC(U/mL)   | 9.25±0.89 <sup>a</sup> | 5.63±0.46 <sup>b</sup>  | 5.85±0.45 <sup>b</sup>  | 0.021 | 0.325          |
| 总超氧化物歧化酶 T-SOD(U/mL) | 70.48±1.86             | 71.43±2.38              | 71.11±2.48              | 0.821 | 0.002          |
| 丙二醛 MDA(nmol/mL)     | 8.91±0.73              | 7.74±0.54               | 7.72±0.94               | 0.193 | 0.137          |

注:同行数据不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),相同小写字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )。

Notes: Values with the different lowercase letters within the same row mean significant differences ( $P < 0.05$ ), while the same lowercase letters within the same row mean no significant differences ( $P > 0.05$ ).

由表6可知:无论雌蟹还是雄蟹,各组消化酶活力均无显著差异。但数值上,胰蛋白酶活力随密度降低有轻微降低趋势,而脂肪酶和 $\alpha$ -淀粉酶活力呈轻微上升趋势。

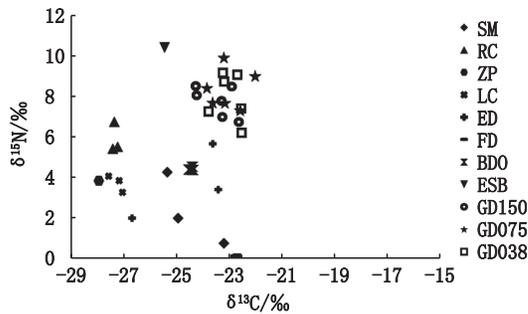
### 2.4 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹饵料贡献度的影响

中华绒螯蟹及其食物来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成如图2所示,除了悬浮物和伊乐藻之外,其他食源的碳氮同位素相对集中。中华绒螯蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-23.16\text{‰} \pm 0.60\text{‰}$ , $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 $8.01\text{‰} \pm 0.94\text{‰}$ 。本底样的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为

$-25.44\text{‰} \pm 0.46\text{‰}$ , $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 $10.39\text{‰} \pm 0.03\text{‰}$ 。中华绒螯蟹的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均高于本底样, $\delta^{15}\text{N}$ 值均低于本底样。不同食源样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-30.33\text{‰} \sim -22.01\text{‰}$ , $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $0.09\text{‰} \sim 10.39\text{‰}$ ,不同食物源呈现明显差异。不同养殖密度条件下各食源的贡献率如图3所示,不同密度组贡献度最高组均为饲料( $39.39\% \sim 52.33\%$ ),且随放养密度降低呈上升趋势。其次贡献度较高的食源均为本底蟹( $11.60\% \sim 28.57\%$ )和浮游动物( $7.05\% \sim 10.64\%$ ),且占比随放养密度降低均呈下降趋势。

表6 稻蟹种养中不同放养密度对成蟹消化酶活力的影响  
 Tab. 6 Effects of different stocking densities on the digestive enzyme activities of adult *E. sinensis* in rice-crab co-culture system

| 项目 Items            | D150          | D075          | D038         | P     | R <sup>2</sup> |
|---------------------|---------------|---------------|--------------|-------|----------------|
| 雌体 Female           |               |               |              |       |                |
| 胰蛋白酶 Trypsin/(U/mg) | 494.81±110.81 | 458.97±117.13 | 411.44±62.71 | 0.825 | 0.003          |
| 脂肪酶 LPS/(U/g)       | 1.05±0.13     | 1.51±0.28     | 1.62±0.36    | 0.170 | 0.221          |
| α-淀粉酶 α-AMS/(U/mg)  | 1.79±0.18     | 1.91±0.16     | 1.87±0.19    | 0.887 | 0.003          |
| 纤维素酶 CL/(U/g)       | 10.03±1.67    | 9.70±1.07     | 10.13±1.06   | 0.131 | 0.261          |
| 雄体 Male             |               |               |              |       |                |
| 胰蛋白酶 Trypsin/(U/mg) | 549.97±155.07 | 491.75±164.55 | 408.20±94.59 | 0.444 | 0.040          |
| 脂肪酶 LPS/(U/g)       | 1.33±0.23     | 1.69±0.44     | 1.54±0.22    | 0.877 | 0.003          |
| α-淀粉酶 α-AMS/(U/mg)  | 2.27±0.13     | 2.30±0.19     | 2.40±0.50    | 0.447 | 0.074          |
| 纤维素酶 CL/(U/g)       | 9.71±0.62     | 12.63±1.69    | 9.38±1.18    | 0.585 | 0.039          |



SM. 悬浮物; RC. 水稻; ZP. 浮游动物; LC. 青苔; ED. 伊乐藻; FD. 饲料; BDO. 底栖生物; ESB. 本底蟹; GD150. D150组; GD075. D075组; GD038. D038组。  
 SM. Suspended matter; RC. Rice; ZP. Zooplankton; LC. Lichen; ED. *Elodea nuttallii*; FD. Feed; BDO. Bottom dwelling organism; ESB. *E. sinensis* background; GD150. Group D150; GD075. Group D075; GD038. Group D038.

图2 中华绒螯蟹及其食物来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 组成  
 Fig. 2 Stable isotopes values of Chinese mitten crab and food sources

## 2.5 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对最终经济效益的影响

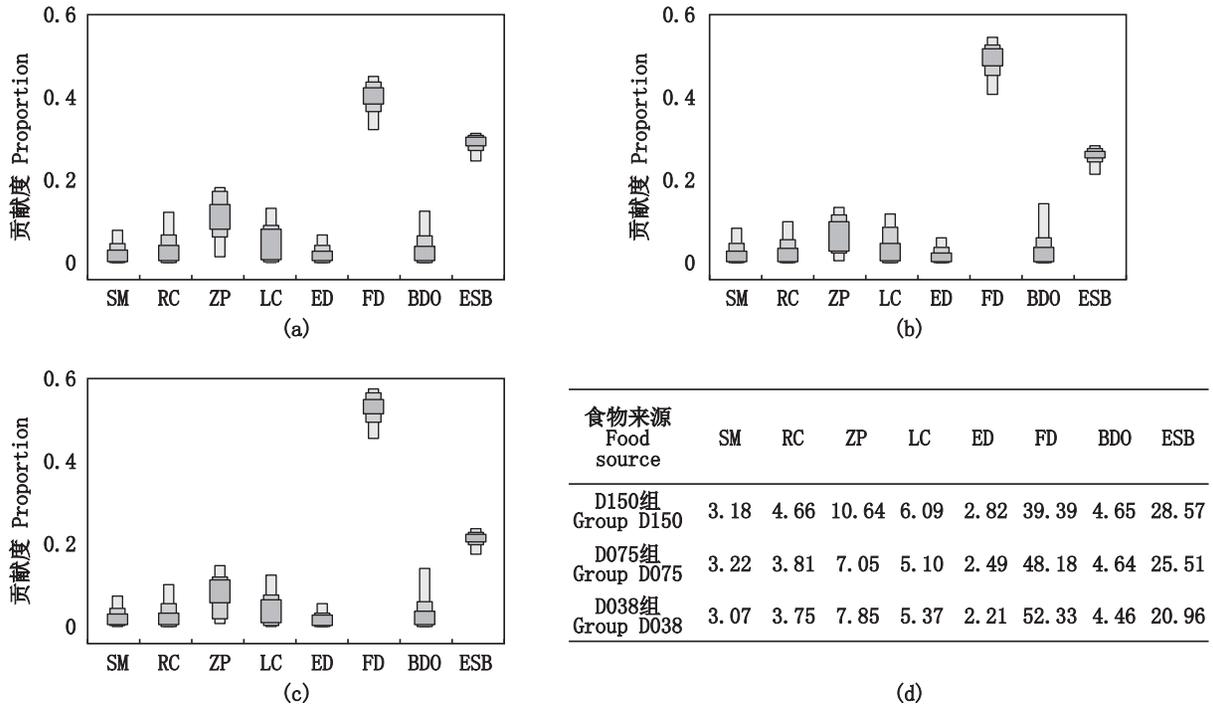
养殖期间的经济评估结果如表7所示。主要成本是蟹种和饲料,占总成本的75%以上,蟹种、饲料与部分成本随放养密度降低呈显著下降趋势( $P < 0.05$ )。中华绒螯蟹和水稻的收入构成部分总收入,中华绒螯蟹收入、部分总收入和部分总利润随放养密度降低呈下降趋势,D150组中华绒螯蟹收入显著高于D075和D038组,其余各组间无显著差异,而投资回报率随放养密度降低呈显著上升趋势( $P < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹生长和养殖性能的影响

中华绒螯蟹的增重率和特定生长率是衡量中华绒螯蟹生长性能的重要指标,而养殖密度

对中华绒螯蟹生长的影响主要体现在增重率和特定生长率上。LI等<sup>[11]</sup>通过稻蟹养殖研究发现,稻田蟹的增重率和特定生长率随养殖密度增加显著下降,这与本研究的结果相似,这可能是由于高密度养殖增加中华绒螯蟹间的食物竞争,影响中华绒螯蟹的摄食,最终影响中华绒螯蟹的生长。此外,本研究发现高密度养殖会引起中华绒螯蟹成活率下降,这是由于蟹类具有好斗性和同类相食性<sup>[29]</sup>,高密度养殖增加了中华绒螯蟹因同类相斗而引起死亡的可能性。饵料系数可以反映饵料的利用效率,本研究中低密度组(D038组)的中华绒螯蟹饵料系数明显低于高密度组(D150组),这表明中华绒螯蟹在低密度条件下对饵料的利用率高于高密度养殖条件,也可能是因为稻蟹池塘中富含浮游植物和底栖生物<sup>[18]</sup>,这为中华绒螯蟹提供了大量的食物来源,使低密度组相比于高密度组可以取食更多的天然饵料用于自身生长。但是,与庄振俊等<sup>[30]</sup>得到的结果相比,本研究中饵料系数较高,这可能与养殖环境(盐度、温度等)和蟹种来源不同有关。庄振俊等<sup>[30]</sup>是在淡水养殖条件下选用池塘养殖的蟹种进行试验,而本研究则是在黄河口盐碱地区选用黄河野生蟹进行试验。有研究<sup>[20]</sup>表明,相比于淡水条件下,在盐碱条件下中华绒螯蟹摄食的能量更多地用于渗透压调节而非生长。此外,黄河流域的水温一般低于长江流域,导致中华绒螯蟹生长周期较短,最终规格也较小,饵料系数较高<sup>[31]</sup>。蟹种方面,姜晓东等<sup>[32]</sup>发现长江野生蟹种和池塘养殖的蟹种的早期养殖性能存在明显差异,野生蟹种的特定生长率显著低于池塘养殖的蟹种。



(a)、(b)与(c)分别为D150,D075与D038组中华绒螯蟹食谱中各食物来源贡献率;(d)为不同组别中各组贡献率;SM. 悬浮物; RC. 水稻; ZP. 浮游动物; LC. 青苔; ED. 伊乐藻; FD. 饲料; BDO. 底栖生物; ESB. 本底蟹。

(a), (b) and (c) show the contributions of various food sources in D150, D075 and D038 groups; (d) show the contributions of each component in different groups respectively; SM. Suspended matter; RC. Rice; ZP. Zooplankton; LC. Lichen; ED. *Elodea nuttallii*; FD. Feed; BDO. Bottom dwelling organism; ESB. *E. sinensis* background; GD150. Group D150; GD075. Group D075; GD038. Group D038.

图3 稻蟹种养中不同养殖密度对中华绒螯蟹食谱中各食物来源贡献率的影响

Fig. 3 Effects of different stoking densities on the contributions of food sources in Chinese mitten crab diet in rice-crab co-culture system

表7 稻蟹种养中不同养殖密度对最终经济效益的影响

Tab. 7 Effects of different stocking densities on the economic parameters in rice-crab co-culture system

| 项目 Items   | D150                      | D075                      | D038                      | P     | R <sup>2</sup> |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|----------------|
| 蟹种 Crab seed   | 13.17±0.16 <sup>a</sup>   | 7.37±0.71 <sup>b</sup>    | 3.16±0.03 <sup>c</sup>    | 0.000 | 0.964          |
| 部分成本<br>Partial cost/(×10 <sup>3</sup><br>元/hm <sup>2</sup> )    |                           |                           |                           |       |                |
| 水稻秧苗 Rice seed   | 2.11±0.03                 | 2.06±0.03                 | 2.07±0.01                 | 0.382 | 0.111          |
| 饲料 Feed  | 11.68±0.05 <sup>a</sup>   | 6.67±0.61 <sup>b</sup>    | 3.13±0.03 <sup>c</sup>    | 0.000 | 0.964          |
| 部分总成本 Partial cost   | 26.96±0.20 <sup>a</sup>   | 16.10±1.29 <sup>b</sup>   | 8.37±0.06 <sup>c</sup>    | 0.000 | 0.965          |
| 部分收入<br>Partial return/(×10 <sup>3</sup><br>元/hm <sup>2</sup> )  |                           |                           |                           |       |                |
| 中华绒螯蟹 Adult crabs  | 37.58±3.73                | 24.33±5.76                | 17.96±2.63                | 0.021 | 0.559          |
| 水稻 Rice  | 18.33±3.52                | 16.32±2.33                | 17.81±1.47                | 0.900 | 0.002          |
| 部分总收入 Partial return   | 55.91±6.52                | 40.65±6.47                | 35.77±3.94                | 0.061 | 0.416          |
| 部分总利润 Partial gross profit/(×10 <sup>3</sup> 元/hm <sup>2</sup> ) | 28.95±6.56                | 24.55±5.18                | 27.40±3.89                | 0.855 | 0.005          |
| 投资回报率 Return on investment/%                                     | 107.47±24.43 <sup>b</sup> | 148.54±18.53 <sup>b</sup> | 326.71±44.37 <sup>a</sup> | 0.006 | 0.688          |

注:同行数据不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ),相同小写字母表示差异不显著( $P>0.05$ )。

Notes: Values with the different lowercase letters within the same row mean significant differences ( $P<0.05$ ), while the same lowercase letters within the same row mean no significant differences ( $P>0.05$ ).

### 3.2 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹可食组织系数和生化组成的影响

肝胰腺是甲壳动物营养物质代谢和存储的重要器官,肝胰腺指数的大小在一定程度上反映

了肝胰腺中营养物质的累积情况<sup>[33]</sup>,肝胰腺是中华绒螯蟹体内重要的脂肪积累组织。本研究表  
明,随着养殖密度降低,中华绒螯蟹的肝胰腺中脂肪含量和肝胰腺指数呈上升趋势,相似地,

WANG等<sup>[18]</sup>对稻田蟹的研究发现,养殖密度高于0.4只/m<sup>2</sup>时,中华绒螯蟹的3种可食组织系数和总可食率显著降低,这表明高密度养殖对中华绒螯蟹营养物质的积累有负面影响,可能是因为高密度养殖增加了中华绒螯蟹获得食物的难度,消耗更多能量,从而影响其营养物质的积累。有研究<sup>[34]</sup>表明,随着养殖密度从0.4只/m<sup>2</sup>提高到0.6只/m<sup>2</sup>,雄性中华绒螯蟹肝胰腺中粗脂肪含量由26.23%±0.32%显著下降到25.19%±0.10%,本研究肝胰腺中脂肪含量同样在高密度组显著最低,这可能是由于低密度养殖条件下,中华绒螯蟹摄食的饲料多(D038组中华绒螯蟹食谱中饲料占比最高),而饲料中脂肪含量较高,从而促进低密度组(D038组)中华绒螯蟹体内粗脂肪沉积。除脂肪外,蛋白质也是中华绒螯蟹体内重要的营养物质<sup>[35]</sup>。WANG等<sup>[34]</sup>研究发现中华绒螯蟹肌肉中粗蛋白含量随养殖密度升高而有所降低,但在本研究中,高密度组(D150组)中华绒螯蟹肌肉中粗蛋白含量显著高于其他组,这可能与高密度组中华绒螯蟹同类相残现象较严重有关,本研究中高密度组中华绒螯蟹食谱中本底蟹的贡献度以及胰蛋白酶活性较高也侧面验证了这一假设。

### 3.3 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹生理代谢指标的影响

碱性磷酸酶(ALP)和酸性磷酸酶(ACP)是甲壳动物体内重要的先天免疫酶<sup>[20]</sup>,是肝功能受损的重要指示物<sup>[36]</sup>。研究<sup>[37-38]</sup>表明,放养密度过高会降低水生生物的免疫能力,这与本研究的结果相似,这可能是由于高密度养殖造成中华绒螯蟹营养不良,甚至引起肝脏脂质代谢异常<sup>[39]</sup>,从而导致机体免疫功能降低。水生生物在不利条件下会产生氧化应激<sup>[40]</sup>,此时需要抗氧化防御系统去除活性氧,以保护组织免受氧化应激引起的损伤<sup>[41]</sup>。总抗氧化能力(T-AOC)是反映机体抗氧化酶和非酶系统总体能力的指标<sup>[20]</sup>。本研究发现,高密度组中华绒螯蟹血淋巴中T-AOC显著高于低密度组,这表明机体处于氧化应激状态,需要提高自身抗氧化能力以清除体内过多的自由基,降低其对中华绒螯蟹的危害。MDA是衡量脂质过氧化程度的指标,其含量高低反映了脂质过氧化程度<sup>[42]</sup>。王新<sup>[43]</sup>研究发现随着中华绒螯蟹放养密度升高,雌性中华绒螯蟹肝胰腺中MDA含量显著升高,抗氧化能力明显减弱。在本研究

中,D150组中华绒螯蟹肝胰腺和血清中观察到较高的MDA含量,这可能是由于高密度养殖条件下机体遭受拥挤胁迫,体内产生的氧化自由基增多,激活的抗氧化酶活力不足以清除过多的氧自由基,导致中华绒螯蟹体内MDA含量升高。总的来说,D038组中华绒螯蟹的免疫和抗氧化能力较强,这表明该密度下中华绒螯蟹生长受到的压力较小,对于中华绒螯蟹的生理代谢和生长发育更有利。

### 3.4 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对中华绒螯蟹饵料贡献度的影响

中华绒螯蟹属于杂食性动物,通过传统的胃含物观察法难以准确判定中华绒螯蟹的食性<sup>[44]</sup>。近些年来稳定性同位素由于其精确度而被广泛应用于水生生物的食性测定当中<sup>[45-47]</sup>,运用这种技术可以分析一段时间内该生物的食性以及不同阶段的食性变化情况。本研究发现实验蟹中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值较本底蟹而言有显著变化,说明投喂的食物和稻田中的天然饵料对中华绒螯蟹生长具有重要贡献,从而改变了中华绒螯蟹体内 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值。从各组分的贡献率来看,各组分占比依次为饲料>本底蟹>浮游动物>青苔>底栖生物>水稻>悬浮物>伊乐藻(平均值),说明在养殖过程中饲料为中华绒螯蟹生长作主要贡献,这与李聪等<sup>[27]</sup>的研究结果相同,这可能是由于饲料的易得性和适口性较高。除饲料和本底蟹外,浮游动物占比最多,说明中华绒螯蟹在自主取食的前提下,更倾向于取食天然动物饵料<sup>[48]</sup>。杨志刚等<sup>[49]</sup>研究发现过高的养殖密度会增加中华绒螯蟹在蜕壳期间同类相残的现象,本研究D150组中华绒螯蟹食谱中本底蟹的占比和胰蛋白酶活力较高,说明高密度养殖条件下会增加中华绒螯蟹的食物竞争和同类相残现象,这也解释了高密度组增重率和成活率较低的现象。此外,在本研究中发现中华绒螯蟹食谱中配合饲料占比随放养密度降低而明显增加,可能是由于高密度养殖条件下中华绒螯蟹对饲料的竞争性较大,而在低密度养殖条件下可以增加饲料的易得性,为中华绒螯蟹提供充足的饵料,满足中华绒螯蟹生长发育的需求。

### 3.5 盐碱地稻蟹种养不同放养密度对经济效益的影响

在中华绒螯蟹养殖过程中,饲料和蟹种是总

成本中主要组成。本研究中随密度降低,蟹种和饲料成本显著降低,使得成本风险显著降低。而中华绒螯蟹产量和规格是影响收入的重要因素<sup>[50]</sup>,本研究中,高密度组中华绒螯蟹产量显著高于低密度组,但终末体质量以及大规格中华绒螯蟹数量低于中密度组和低密度组,而中华绒螯蟹的商品价格与体质量密切相关,规格越大中华绒螯蟹价格越高<sup>[51]</sup>,高密度组中华绒螯蟹虽然产量较高,但整体增重率较低,因此不同密度组中华绒螯蟹的最终收入差异较小。此外,本研究发现不同中华绒螯蟹密度组的水稻产量和收入无显著差异,这与刘金雨等<sup>[52]</sup>在黑龙江地区开展的稻蟹研究结果不同,可能是本研究中高密度组的中华绒螯蟹成活率较低和盐碱环境有关。但与盐碱地上水稻单作的总收入(30 569.8元/hm<sup>2</sup>)<sup>[53]</sup>相比,本试验稻蟹共作总收入要远远大于水稻单作,这表明稻蟹种养模式能显著增加经济效益。在本试验条件下,D038组具有最高的投资回报率,表明D038组的经济效益最高。

综上所述,虽然高密度(D150组)养殖可以获得更高的产量和收入,但低密度(D038)养殖条件下,中华绒螯蟹的存活率、增重率、饵料利用率以及脂肪等营养物质的积累明显提高。同时,D038组中华绒螯蟹的MDA含量低、抗氧化能力增强,其最终利润和投资回报率最高。因此,在本试验条件下,黄河口盐碱地区稻蟹共作模式中中华绒螯蟹适宜的放养密度为0.38只/m<sup>2</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 张颖. 水产养殖治理盐碱地现状调查及对策研究——以甘肃省景泰县为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.  
ZHANG Y. Status investigation and countermeasure of aquaculture in saline-alkali land restoration——taking Jingtai county of Gansu province as an example [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [2] 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[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 24.  
Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Aquatic Technology Promotion Station, China Fisheries Society. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021: 24.
- [3] WANG Y Z, LI J H, WANG S H, et al. Composition and nutritional qualities of edible tissues of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) from Ya Lake over different months [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105: 104199.
- [4] QADIR A A, MURTAZA G, ZIA-UR-REHMAN M, et al. Application of gypsum or sulfuric acid Improves physiological traits and nutritional status of rice in calcareous saline-sodic soils [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(2): 1846-1858.
- [5] 陈永庆. 陕南稻渔综合种养调查、水产品质量安全检测及稻田蟹品质分析与评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.  
CHEN Y Q. Investigation of integrated rice and fishery farming, aquatic product safety testing, and analysis and evaluation of crab farmed in rice fields quality in southern Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [6] BASHIR M A, WANG H Y, PAN J T, et al. Variations in soil nutrient dynamics and their composition in rice under integrated rice-crab co-culture system [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281: 125222.
- [7] KHOSHNEVISAN B, BASHIR M A, SUN Q Y, et al. Optimal rice-crab co-culture system as a new paradigm to air-water-food nexus sustainability [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 291: 125936.
- [8] YAN Y, LIU M D, YANG D, et al. Effect of different rice-crab coculture modes on soil carbohydrates [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 13(3): 641-647.
- [9] BAO J, JIANG H B, LI X D. Thirty years of rice-crab coculture in China—Research progress and prospects [J]. Reviews in Aquaculture, 2022, 14(3): 1597-1612.
- [10] 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 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 838-843.  
LI Y, WANG W, MA X Z, et al. Effect of rice-crab culture system on zoobenthos diversity in paddy field [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 838-843.
- [11] LI X D, DONG S L, LEI Y Z, et al. The effect of stocking density of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* on rice and crab seed yields in rice-crab culture systems [J]. Aquaculture, 2007, 273(4): 487-493.
- [12] 孙文通, 张庆阳, 马旭洲, 等. 不同中华绒螯蟹放养密度对养蟹稻田水环境及水稻产量影响的研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(3): 366-373.  
SUN W T, ZHANG Q Y, MA X Z, et al. A study on effects of different crab stocking density on water environment and rice yield [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(3): 366-373.
- [13] ARNOLD S J, SELLARS M J, CROCOS P J, et al. Response of juvenile brown tiger shrimp (*Penaeus esculentus*) to intensive culture conditions in a flow through tank system with three-dimensional artificial substrate [J]. Aquaculture, 2005, 246(1/4): 231-238.

- [14] JENSEN M A, CARTER C G, ADAMS L R, et al. Growth and biochemistry of the spiny lobster *Sagmariasus verreauxi* cultured at low and high density from hatch to puerulus[J]. *Aquaculture*, 2013, 376-379: 162-170.
- [15] LI J T, XU S J, CAI Y S, et al. The effects of net-chasing training on survival and growth are related to stocking density in the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Aquaculture*, 2022, 561: 738621.
- [16] NARANJO-PÁRAMO J, HERNANDEZ-LLAMAS A, VILLARREAL H. Effect of stocking density on growth, survival and yield of juvenile redclaw crayfish *Cherax quadricarinatus* (Decapoda: Parastacidae) in gravel-lined commercial nursery ponds[J]. *Aquaculture*, 2004, 242(1/4): 197-206.
- [17] DAI F, SONG L L, GAO J C, et al. Effect of stocking density on mortality rate, physiological status and nutrient contents of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* during overwintering cultivation[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 16: 100241.
- [18] WANG X, ZHENG R X, ZHANG D M, et al. Effects of different stocking densities on growth performance, nutritional quality and economic benefit of juvenile female Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) in rice-crab culture systems[J]. *Aquaculture*, 2022, 553: 738111.
- [19] 吕东锋, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共生系统中中华绒螯蟹放养密度对水稻和中华绒螯蟹的影响[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(7): 1677-1680.
- LYU 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 [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(7): 1677-1680.
- [20] LONG X W, WU X G, ZHAO L, et al. Effects of salinity on gonadal development, osmoregulation and metabolism of adult male Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. *PLoS One*, 2017, 12(6): e0179036.
- [21] 徐静静, 耿智, 冯广朋, 等. 盐度对中华绒螯蟹仔蟹渗透压和非特异性免疫酶的影响[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(6): 1252-1259.
- XU J J, GENG Z, FENG G P, et al. Effects of salinity on osmotic pressure and nonspecific immune enzymes in juvenile *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(6): 1252-1259.
- [22] CHI C M, ZHAO C W, SUN X J, et al. Reclamation of saline-sodic soil properties and improvement of rice (*Oryza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China [J]. *Geoderma*, 2012, 187-188: 24-30.
- [23] NAKHODA B, LEUNG H, MENDIORO M S, et al. Isolation, characterization, and field evaluation of rice (*Oryza sativa* L., Var. IR64) mutants with altered responses to salt stress [J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 191-202.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] AOAC. Official methods of analysis of of AOAC international [M]. 16th ed. Arlington: Association of Official Analytical Chemists, 1995: 1298.
- [27] 李聪, 成永旭, 管勤壮, 等. 用稳定性同位素技术分析稻—虾系统中不同“碳/氮”投喂方式对克氏原螯虾食性的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(11): 1778-1786.
- LI C, CHENG Y X, GUAN Q Z, et al. Using stable isotopes to estimate the effects of different carbon/nitrogen feeds on feeding habit of *Procambarus clarkii* in the rice-crayfish co-culture system [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(11): 1778-1786.
- [28] 苗静, 刘峰, 闫法军, 等. 基于稳定同位素的黄河三角洲盐碱地稻蟹种养系统中华绒螯蟹食物源分析[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1489-1496.
- MIAO J, LIU F, YAN F J, et al. Analysis of food sources of *Eriocheir sinensis* in rice-crab integrated ecosystem based on stable isotopes in saline-alkali land of the Yellow River Delta [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1489-1496.
- [29] ROMANO N, ZENG C S. Cannibalism of decapod crustaceans and implications for their aquaculture: A review of its prevalence, influencing factors, and mitigating methods [J]. *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture*, 2017, 25(1): 42-69.
- [30] 庄振俊, 张冬冬, 姜晓东, 等. 中华绒螯蟹“长荡湖1号”子一代成蟹阶段养殖性能初步评估[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(3): 27-35.
- ZHUANG Z J, ZHANG D D, JIANG X D, et al. A preliminary evaluation on culture performance of first selective generation of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) “Changdang Lake 1” during adult culture stage [J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(3): 27-35.
- [31] 周永昌, 姜晓东, 成永旭, 等. 长江、黄河和辽河水系野生中华绒螯蟹三代成蟹养殖性能和性腺发育的比较研究[J]. *水产科技情报*, 2021, 48(2): 61-68.
- ZHOU Y C, JIANG X D, CHENG Y X, et al.

- Comparative study on culture performance and gonad development of the third generation (G3) of wild-caught Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* from the Yangtze River, Huang River and the Liao River [J]. *Fisheries Science and Technology Information*, 2021, 48(2): 61-68.
- [32] 姜晓东, 吴旭干, 刘青, 等. 长江野生和池塘养殖中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 蟹种早期养殖性能、抗病力和非特异性免疫性能的比较[J]. *渔业科学进展*, 2016, 37(6): 131-137.
- JIANG X D, WU X G, LIU Q, et al. Comparison of the early culture performance, the disease resistance, and the non-specific immunity between wild-caught and pond-reared juvenile Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(6): 131-137.
- [33] WU X, CHANG G, CHENG Y, 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]. *Aquaculture Nutrition*, 2010, 16(1): 25-36.
- [34] WANG X, MAITE T P, YAO Q, et al. Comparison of the growth performance and nutritional qualities of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) with different stocking densities in rice-crab culture systems [J]. *Aquaculture Reports*, 2021, 20: 100761.
- [35] 何先林, 姜晓东, 王海宁, 等. 池塘养殖不同规格中华绒螯蟹扣蟹生化组成的比较研究[J]. *水产科技情报*, 2019, 46(6): 316-319, 323.
- HE X L, JIANG X D, WANG H N, et al. Comparative studies of the biochemical composition of pond-reared juvenile Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) with different weight [J]. *Fisheries Science and Technology Information*, 2019, 46(6): 316-319, 323.
- [36] 倪金金, 王裕玉, 徐钢春, 等. 养殖密度对池塘工程化循环水养殖大口黑鲈抗氧化力、组织结构及应激基因表达的影响[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(6): 660-670.
- NI J J, WANG Y Y, XU G C, et al. Effects of stocking density on the antioxidant status, tissue structure and HSP-70 and Cu/Zn SOD expression in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) in an in-pond raceway culture system [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(6): 660-670.
- [37] LIU B L, FEI F, LI X T, et al. Effects of stocking density on stress response, innate immune parameters, and welfare of turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Aquaculture International*, 2019, 27(6): 1599-1612.
- [38] AGUILAR V, RACOTTA I S, GOYTORTÚA E, et al. The influence of dietary arachidonic acid on the immune response and performance of Pacific whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at high stocking density [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(3): 258-271.
- [39] JIA R, WANG L, HOU Y R, et al. Effects of stocking density on the growth performance, physiological parameters, redox status and lipid metabolism of *Micropterus salmoides* in integrated rice-fish farming systems [J]. *Antioxidants*, 2022, 11(7): 1215.
- [40] DING Z L, ZHANG Y X, YE J Y, et al. An evaluation of replacing fish meal with fermented soybean meal in the diet of *Macrobrachium nipponense*: Growth, nonspecific immunity, and resistance to *Aeromonas hydrophila* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2015, 44(1): 295-301.
- [41] QIN F J, SHI M M, YUAN H X, et al. Dietary nano-selenium relieves hypoxia stress and, improves immunity and disease resistance in the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, 54: 481-488.
- [42] AHMAD I, RANI A M B, VERMA A K, et al. Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition [J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(3): 1215-1226.
- [43] 王新. 稻蟹养殖模式下不同放养密度对中华绒螯蟹生长、营养品质及抗氧化能力的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- WANG X. Effects of different stocking densities on the growth, nutritional quality and antioxidant capacity of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* in rice-crab culture mode [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.
- [44] 薛彬, 蒋日进, 王凯, 等. 应用稳定同位素技术分析枸杞岛近岸海域褐菖鲉的食性[J]. *水产学报*, 2017, 41(9): 1415-1423.
- XUE B, JIANG R J, WANG K, et al. Feeding habits of *Sebastes marmoratus* in the Gouqi Island based on stable isotope analysis [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(9): 1415-1423.
- [45] CARVALHO D R, CASTRO D, CALLISTO M, et al. Isotopic variation in five species of stream fishes under the influence of different land uses [J]. *Journal of Fish Biology*, 2015, 87(3): 559-578.
- [46] 李学梅, 朱永久, 王旭歌, 等. 稳定同位素技术分析不同养殖方式下鳙饵料的贡献率[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(2): 278-283.
- LI X M, ZHU Y J, WANG X G, et al. Using a stable isotope ratio to evaluate the contribution of food to bighead carp (*Aristichthys nobilis*) subjected to different breeding methods [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(2): 278-283.
- [47] 李斌, 王志坚, 金丽, 等. 蒙古鲈食性转变的稳定性同位素研究[J]. *水产学报*, 2011, 35(9): 1419-1425.
- LI B, WANG Z J, JIN L, et al. Study on diet shift of *Erythrulter mongolicus mongolicus* with stable isotope

- technology [J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35 (9): 1419-1425.
- [48] 崔莹, 吴旭干, 赵峰, 等. 基于碳、氮稳定同位素分析中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 幼蟹溯河洄游期食物来源变化 [J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(4): 822-829.
- CUI Y, WU X G, ZHAO F, et al. Diet sources of juvenile chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) during upstream migration indicated by the carbon and nitrogen stable isotopes [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50 (4): 822-829.
- [49] 杨志刚, 刘启彬, 姚琴琴, 等. 养殖密度和饵料组成对中华绒螯蟹仔蟹生长和存活的影响 [J]. 生物学杂志, 2015, 32(6): 34-39.
- YANG Z G, LIU Q B, YAO Q Q, et al. Effects of different stocking densities and diets on growth and survival of *Eriocheir sinensis* in larval stages [J]. Journal of Biology, 2015, 32(6): 34-39.
- [50] 陈蓝荪, 王武, 陈再忠. 从中华绒螯蟹市场分析看中华绒螯蟹养殖的发展方向 [J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(1): 81-85.
- CHEN L S, WANG W, CHEN Z Z. Culture tendency of *Eriocheir sinensis* by market analysis [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2001, 10(1): 81-85.
- [51] HE J, WU X G, LI J Y, 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 [J]. Aquaculture, 2014, 434: 48-56.
- [52] 刘金雨, 赵志刚, 罗亮, 等. 不同中华绒螯蟹放养密度对寒区稻蟹综合种养生产性能及环境因子的影响 [J]. 淡水渔业, 2022, 52(2): 89-97.
- LIU J Y, ZHAO Z G, LUO L, et al. Effects of different crab stocking density on production performance and environmental factors under integrated cultivation of rice crab in the cold areas [J]. Freshwater Fisheries, 2022, 52 (2): 89-97.
- [53] 马亮, 董立强, 田春晖, 等. 稻蟹生态种养产出量及经济效益试验研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41 (11): 38-48.
- MA L, DONG L Q, TIAN C H, et al. Experimental study on the yield and economic benefit of rice-crab ecological cultivation [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(11): 38-48.

## Preliminary study on the suitable stocking density of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) under rice-crab co-culture system in the saline-alkaline area of the Yellow River Estuary

LI Fenglu<sup>1</sup>, ZHU Shaicheng<sup>1</sup>, LI Jiayao<sup>1,2,3</sup>, CHENG Yongxu<sup>1,2,3</sup>

(1. Center for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition of 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. Shanghai Ocean University, National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** A 180-day rice-crab co-culture experimental trial (female crab : male crab=1:1) was conducted in the saline-alkaline area of the Yellow River Estuary to find the suitable stocking density of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). The effects of different stocking densities (1.50 ind./m<sup>2</sup>, 0.75 ind./m<sup>2</sup> and 0.38 ind./m<sup>2</sup>, indicated as D150, D075 and D038 groups, respectively) on the growth and culture performance, edible tissue indices, proximate composition, physiological metabolism, contribution of food and economic performance of rice-crab were studied. The results showed that: (1) The weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and survival rate (SR) of crab increased significantly with the decrease of stocking density, while the yield and feed conversion rate (FCR) decreased significantly. (2) There was no significant difference in edible tissue index and total edible rate among different stocking density groups, but the gonadosomatic index (GSI), hepatosomatic index (HSI) and total edible yield (TEY) of female crab increased slightly with the decrease of stocking density. (3) With the decrease of stocking density, the contents of crude protein in muscle of females and males decreased significantly, while the contents of crude lipid in hepatopancreas of females increased significantly. (4) In terms of physiological metabolism indices, the activities of alkaline phosphatase (ALP) and acid phosphatase (ACP) in hepatopancreas of females increased significantly with the decrease of stocking density, while total antioxidant capacity (T-AOC) and the contents of malondialdehyde (MDA) in serum decreased significantly. Similarly, ALP activity in hepatopancreas of males was the highest in D038 group, while the contents of MDA in hepatopancreas and T-AOC in serum were decreased significantly and minimum value was found in D038 group. (5) The first food source of crabs under different stocking densities was formulated feed (39.39%–52.33%). With the decrease of stocking density, the contribution of feed in food sources was increased, while the contribution of background crabs was decreased. (6) There was no significant difference in partial return and partial gross and the highest profit of each group, whilst the return-on-investment (ROI) of D038 group was significantly higher than that of other density groups. In summary, although the crabs in high-density group had the highest total yield and partial return, the crabs in low stocking density group achieved the best growth performance, health status, profit and ROI. Therefore, under the condition of this experiment, the suitable stocking density of crabs is 0.38 ind./m<sup>2</sup> under rice-crab co-culture system in the saline-alkaline area of the Yellow River Estuary.

**Key words:** saline-alkaline area; rice-crab co-culture; stocking density; culture performance; food contribution