

doi: 10.7541/2025.2024.0129

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0129

稻田中混养不同密度鲫对中华绒螯蟹生长和营养成分的影响

蒋湘辉 王兴兵 寇凌霄 魏洪祥 肖祖国 吴丽娜 封岩 闫有利

(辽宁省淡水水产科学研究院, 辽宁省水生动物病害防治重点实验室, 辽阳 111000)

摘要: 为达到养殖环境生态平衡, 研究了稻田环境中混养鲫(*Carassius auratus*)[(48.53±2.11) g/尾]对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)[(23.48±0.82) g/尾]生长和营养成分的影响。实验设置4个鲫密度: 0 (T0, 对照组)、100 (T1)、200 (T2)和300 尾/667 m² (T3), 分别与中华绒螯蟹(300 只/667 m²)混养, 实验周期90d。结果显示: T1组中华绒螯蟹的终末体质量、增重率、特定生长率、摄食率、出肉率、肝胰腺指数、性腺指数和总可食率显著高于其他组, 饵料系数显著低于其他3组, T1组鲫的终末体质量、增重率和特定生长率显著高于其他组($P<0.05$); T2组中华绒螯蟹肌肉的总氨基酸、必需氨基酸含量和必需氨基酸评分最高, 其中苏氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸含量显著高于其他各组($P<0.05$)。研究表明, 在中华绒螯蟹养殖过程中, 混养不同密度鲫对其生长、可食性状和肌肉营养品质存在显著影响, 其中混养100—200 尾/667 m²鲫更有利于提高中华绒螯蟹品质。

关键词: 稻田养殖; 养殖密度; 生长指标; 营养成分; 中华绒螯蟹; 鲫

中图分类号: S962.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)04-042501-08



中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*), 又称河蟹、大闸蟹, 属甲壳纲(Crustacea)十足目(Decapoda)方蟹科(Grapsidae)绒螯蟹属(*Eriocheir*), 是我国重要的淡水养殖甲壳类动物之一^[1]。国内外对中华绒螯蟹的研究主要集中在遗传育种、病害防治、营养调控及风味品质等^[2-14]方面。为了充分利用土地、水力和饵料资源, 提高养殖产量, 稻渔共养模式和稻蟹共养模式逐渐被大众认可^[15, 16]。一方面, 稻田条件能够为养殖品种提供充足的水源、良好的光照和丰富的天然饵料。另一方面, 养殖品种排泄物还可以为水稻提供氮、磷等养分, 从而促进水稻生长。此外, 稻田中的天然植物和生物作为中华绒螯蟹天然饵料, 能有效减少环境污染, 同时还能带来额外的经济创收^[17]。研究发现适宜的放养密度对养殖品种健康生长、绿色生态及经济增收均具有重要意义^[18-23], 有学者发现在不同的养殖模式下中华绒螯蟹可食部位的营养组成存在差异^[24]。鲫

(*Carassius auratus*)为温水性鱼类, 喜在水的底层活动, 对低氧的适应能力很强, 是杂食性鱼类, 主要食有机碎屑、水草、植物种子及摇蚊幼虫、枝角类和桡足类。由于其对养殖环境条件要求较低, 抗病能力强, 可适应多种养殖模式, 并且混养适宜数量的鲫有利于提高主养品种的品质^[25, 26]。本研究在传统的“坑沟式稻-蟹综合种养”模式的基础上, 混养了3种不同密度的鲫, 不需要额外投喂鲫饵料, 摄食中华绒螯蟹的残饵、代谢物及天然饵料等, 达到养殖环境生态平衡。通过探讨对中华绒螯蟹、鲫生长和营养成分的影响, 寻找一种节能且绿色可持续发展的健康养殖新模式。

1 材料与方法

1.1 实验材料与管理

在辽宁省淡水水产科学研究院稻鱼蟹健康生态研发基地(盘锦)选取12块平均面积为0.65667 m²

收稿日期: 2024-03-28; 修订日期: 2024-05-27

基金项目: 辽宁省科技厅科技攻关项目(2021JH1/10400040); 辽宁省农业科学院科技创新研究专项资金(2022DD279148)资助 [Supported by the Science and Technology Key Project from Department of Science and Technology of Liaoning province (2021JH1/10400040); Special Fund for Scientific and Technological Innovation Research of Liaoning Academy of Agricultural Sciences (2022DD279148)]

作者简介: 蒋湘辉(1981—), 女, 副研究员; 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail: 12216745@qq.com

通信作者: 闫有利, 男, 研究员; E-mail: yyllyln@126.com

的相邻稻田,在田块一侧开挖养殖边沟,边沟面积为田块面积的10%,边沟宽为3 m,深1 m,设置进、排水管并包上防逃网,用中华绒螯蟹养殖专用的聚乙烯塑料薄膜把稻田四角围成半圆弧形,以防止逃逸和敌害。5月底至6月初进行水稻插秧,选择的水稻品种为盐粳927号,株行距为26 cm×20 cm,水深15—20 cm。在插秧结束1个月后,投放相同密度中华绒螯蟹[(23.48±0.82) g/尾, 300只/667 m²,雌雄各半],3块对照实验田只投放中华绒螯蟹(T0组),另外9块实验田按照100、200和300尾/667 m²三个密度投放鲫(T1、T2和T3组)。选用的是异育银鲫中科3号,投放的规格(48.53±2.11) g/尾,实验期90d。每天下午3点按中华绒螯蟹体重的3%—5%在固定点投喂蟹料,固定点设置在靠近岸边的位置,饲料粗蛋白含量在38%左右(表1)。

表1 日粮组成及营养水平(风干基础)

Tab. 1 Diet composition and nutritional levels (air-dried basis)

原料Ingredient	含量Content (%)
鱼粉Fish meal	25.10
虾粉Shrimp powder	8.22
豆粕Soybean meal	30.50
菜粕Rapeseed meal	11.35
面粉Flour	15.53
麦麸Wheat bran	3.18
大豆油Soybean oil	2.12
磷酸二氢钙Ca(H ₂ PO ₄) ₂	2.50
预混料Premix ¹	1.00
食盐Salt	0.50
营养水平Nutrient levels	
能量Energy (MJ/kg)	18.25
粗蛋白质Crude protein	37.97
粗脂肪Crude fat	5.52
水分Moisture	9.24
粗灰分Ash	4.40

注:¹预混料可为每千克日粮提供:铜20 mg;铁25 mg;镁12 mg;锰26 mg;锌80 mg;硒0.16 mg;碘0.45 mg;钴0.6 mg;维生素A 10000 IU;维生素E 100 mg;维生素C 100 mg;维生素D 32500 IU;维生素K 32.2 mg;维生素B₁ 3.2 mg;维生素B₂ 15 mg;维生素B₃ 20 mg;维生素B₄ 10 mg;维生素B₅ 25 mg;维生素B₁₂ 0.016 mg;叶酸5 mg;胆碱600 mg;生物素0.15 mg;肌醇200 mg

Note: ¹premix provide the follow per kg of basal diet: Cu 20 mg; Fe 25 mg; Mg 12 mg; Mn 26 mg; Zn 80 mg; Se 0.16 mg; I 0.45 mg; Co 0.6 mg; vitamin A 10000 IU; vitamin E 100 mg; vitamin C 100 mg; vitamin D 32500 IU; vitamin K 32.2 mg; vitamin B₁ 3.2 mg; vitamin B₂ 15 mg; vitamin B₃ 20 mg; vitamin B₄ 10 mg; vitamin B₅ 25 mg; vitamin B₁₂ 0.016 mg; folic acid 5 mg; choline 600 mg; biotin 0.15 mg; inositol 200 mg

1.2 实验样品采集

在实验结束后对中华绒螯蟹和鲫进行捕捞,称重查数,测量壳长、壳宽、体长和全长,随后将中

华绒螯蟹体表水分擦净并活体解剖,每组采集30只雌蟹和30只雄蟹的肝胰腺、性腺、体肌肉和腿(附肢)肌肉进行称重记录,分装至自封袋,−18℃保存,待测。

1.3 实验方法

实验水体指标的测定 使用哈西SL1000便携式多参数水质分析仪测定水体中水温(T)、溶解氧(DO)和pH。氨氮(Ammonia-nitrogen, NH₄-N)含量采用纳氏试剂分光光度法测定;亚硝酸盐氮(Nitrite-nitrogen, NO₂-N)含量采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定;总氮(Total nitrogen, TN)的含量采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;总磷(Total phosphorus, TP)的含量采用钼锑抗分光光度法测定;化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)采用高锰酸钾法测定。

生长和可食性状指标:

存活率(SR, %)= $N_t/N_0 \times 100$

增重率(WGR, %)= $(W_t - W_0)/W_0 \times 100$

特定生长率(SGR, %/d)= $(\ln W_t - \ln W_0)/t \times 100$

摄食率(FR, %/d)= $FI/[t \times (W_t + W_0)/2] \times 100$

饲料系数(FCR)= $FI/(W_t - W_0)$

出肉率(MY, %)=肌肉重(g)/体重(g)×100

肝胰腺指数(HSI)=肝胰腺重(g)/体重(g)×100

性腺指数(GSI)=性腺重(g)/体重(g)×100

总可食率(TEY, %)=HSI+GSI+MY

式中, W_t 为鱼、蟹终末体质量(g); W_0 为鱼、蟹初始体质量(g); t 为饲喂天数(d); FI为实验期间总摄食量(g); N_t 为终末个体数; N_0 为初个体数。

常规营养成分、氨基酸测定 水分采用恒温干燥法(GB 5009.3-2016)测定;粗蛋白采用微量凯氏定氮法(GB 5009.5-2016)测定;粗脂肪采用索氏抽提法(GB 5009.6-2016)测定;灰分采用高温炉灼烧法(GB 5009.4-2016)测定;氨基酸参照GB/T 5009.124-2016,用液相色谱仪(Agilent 1260)测定。

营养评价方法 参考联合国粮食及农业组织/世界卫生组织的氨基酸评分模式和全鸡蛋蛋白质氨基酸模式^[27],按以下公式计算氨基酸评分(AAS)、化学评分(CS)、必需氨基酸指数(EAAI):

$$AAS = \frac{\text{待测蛋白质氨基酸含量}}{\text{FAO/WHO评分模式氨基酸含量}}$$

$$CS = \frac{\text{待测蛋白质氨基酸含量}}{\text{全鸡蛋蛋白质同种氨基酸含量}}$$

$$EAAI = \sqrt[n]{\frac{100A}{AE} \times \frac{100B}{BE} \times \frac{100C}{CE} \times \cdots \times \frac{100J}{JE}}$$

$$F\text{值} = \frac{\text{缬氨酸} + \text{亮氨酸} + \text{异亮氨酸}}{\text{苯丙氨酸} + \text{酪氨酸}}$$

式中, n 为比较的必需氨基酸(EAA)数目; A, B, C, ..., J为肌肉蛋白质的EAA含量(DM, %); AE, BE, CE, ..., JE为全鸡蛋蛋白质的EAA含量(DM, %).

1.4 数据处理

结果采用Excel 2010进行统计, SPSS 20.0软件进行方差齐性检验和单因素方差分析(One-way ANOVA), 采用Duncan氏多重比较法分析组间差异显著性。 $P < 0.05$ 表示差异显著, 数据以平均值 $\pm$ 标准差(mean $\pm$ SD)表示。

2 结果

2.1 不同养殖密度以及混养比例对水质环境的影响

在实验期间各实验组亚硝酸盐氮、总磷、水温 and pH 各组差异不显著($P > 0.05$)。T2和T3组池塘溶解氧含量低于其他2组, 氨氮含量高于其他2组; T3组的化学需氧量和总氮含量显著高于其他3组($P < 0.05$; 图 1)。根据GB 3838-2002地表水环境质量标准, 均符合III类以上渔业用水标准。从水质理化指标看出, 随着混养鲫密度的提高, 水质指标受到了一定的影响, 但是具有可控性。

2.2 中华绒螯蟹和鲫生长指标及中华绒螯蟹可食性状分析

由图 2可知, T1组中华绒螯蟹增重率、特定生长率和摄食率均显著高于其他各组, 饵料系数则显著低于其他各组($P < 0.05$), 随着混养密度的增加, 鲫特定生长率和增重率逐渐下降。T1组鲫终末体质

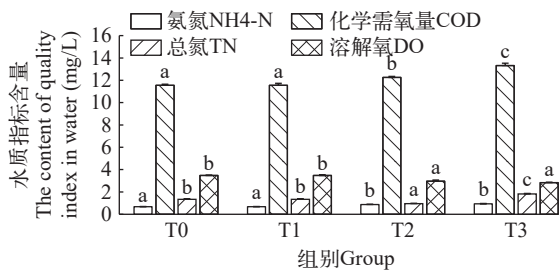


图 1 不同处理组水质指标变化

Fig. 1 Water quality index of different treatment groups

量、特定生长率和增重率均显著高于T2、T3组($P < 0.05$); 而各实验组中华绒螯蟹和鲫的存活率差异不显著($P > 0.05$)。

中华绒螯蟹的MY、HSI、GSI和TEY见表 2。以MY指标为参照, T1的中华绒螯蟹出肉率最高, 显著高于其他组($P < 0.05$); 比较HSI指标发现, T1的雌性中华绒螯蟹肝胰腺指数最高, T2的雄性中华绒螯蟹肝胰腺指数最高, 显著高于T3和T0 ($P < 0.05$); 比较GSI指标和TEY指标发现, 同样是T1最高, 显著高于其他组($P < 0.05$)。综合各组中华绒螯蟹和鲫的生长、可食性状等指标, 混养鲫密度为100 尾/667 m²的T1组最优, 其次为T2组。

2.3 混养不同密度的鲫对中华绒螯蟹肌肉常规营养成分的影响

中华绒螯蟹肌肉的水分、粗蛋白、粗脂肪和灰分见表 3。粗蛋白含量随着混养鲫密度的增大呈先升高后降低的趋势, T2 组显著高于其他组, 3个实验组的粗脂肪含量显著高于T0组, T3组的灰分含量最高($P < 0.05$); 水分各组之间无显著差异($P > 0.05$)。

2.4 混养不同密度的鲫对中华绒螯蟹肌肉氨基酸含量的影响

如表 4所示, 中华绒螯蟹肌肉中共检出17种氨基酸。总氨基酸(Σ TAA)和必需氨基酸(Σ EAA)含量都呈先升后降的趋势, 在T2组达到最大值, 其次

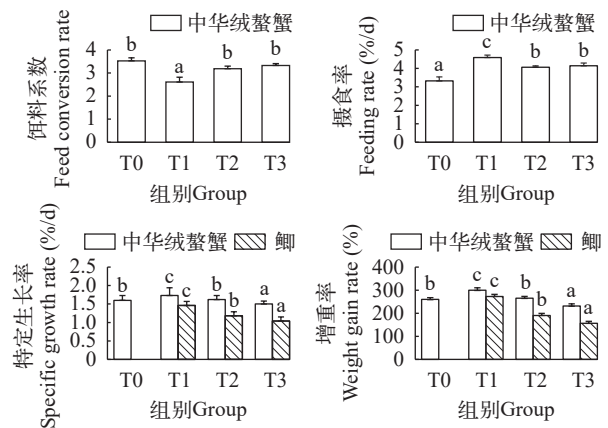


图 2 中华绒螯蟹和鲫生长指标比较

Fig. 2 Comparison of growth indices of *E. sinensis* and *C. auratus*

表 2 各组中华绒螯蟹的可食性状比较

Tab. 2 Comparison of edible tissues of *E. sinensis* from different groups ($n=15$; %)

组别Group	出肉率MY	肝胰腺指数HSI		性腺指数GSI		总可食率TEY
		♀	♂	♀	♂	
T0	10.09 $\pm$ 0.75 ^a	8.23 $\pm$ 0.36 ^a	6.14 $\pm$ 0.17 ^a	6.26 $\pm$ 0.21 ^b	1.71 $\pm$ 0.03 ^a	22.55 $\pm$ 0.76 ^a
T1	18.23 $\pm$ 1.03 ^d	10.04 $\pm$ 0.34 ^c	8.13 $\pm$ 0.22 ^c	7.48 $\pm$ 0.10 ^c	2.43 $\pm$ 0.14 ^c	32.42 $\pm$ 1.32 ^c
T2	13.20 $\pm$ 1.12 ^c	9.97 $\pm$ 0.26 ^c	9.08 $\pm$ 0.15 ^d	5.89 $\pm$ 0.29 ^{ab}	1.95 $\pm$ 0.05 ^b	26.20 $\pm$ 0.99 ^b
T3	12.03 $\pm$ 0.87 ^b	9.19 $\pm$ 0.37 ^b	7.07 $\pm$ 0.07 ^b	5.24 $\pm$ 0.23 ^a	2.04 $\pm$ 0.08 ^b	22.91 $\pm$ 1.21 ^a

表3 各实验组中华绒螯蟹肌肉常规营养成分(鲜质量基础 %)

Tab. 3 Nutrients composition in muscle of *E. sinensis* from different groups (fresh weight basis %)

组别 Group	水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude fat	灰分 Ash
T0	77.35±1.22	17.61±0.44 ^b	0.81±0.05 ^a	2.56±0.03 ^b
T1	77.43±1.35	17.41±0.38 ^b	0.95±0.09 ^b	2.13±0.05 ^a
T2	76.94±0.87	18.23±0.51 ^c	0.91±0.11 ^b	2.12±0.10 ^a
T3	77.74±0.95	16.55±0.31 ^a	0.89±0.06 ^b	2.91±0.04 ^c

表4 中华绒螯蟹肌肉中氨基酸含量(湿重, n=3)

Tab. 4 The amino acids content in muscle of *E. sinensis* (%wet weight, n=3)

指标 Parameter	组别Group			
	T0	T1	T2	T3
苏氨酸Thr [*]	0.57±0.02 ^a	0.63±0.03 ^a	0.70±0.02 ^b	0.59±0.05 ^a
缬氨酸Val [*]	0.60±0.01	0.67±0.03	0.64±0.02	0.63±0.04
蛋氨酸Met [*]	0.17±0.02	0.18±0.02	0.23±0.03	0.22±0.00
异亮氨酸Ile [*]	0.39±0.05 ^a	0.65±0.06 ^{bc}	0.76±0.03 ^c	0.58±0.09 ^b
亮氨酸Leu [*]	0.98±0.07 ^a	1.04±0.06 ^a	1.21±0.13 ^b	0.94±0.11 ^a
苯丙氨酸Phe	0.54±0.06 ^a	0.59±0.05 ^a	0.68±0.01 ^b	0.54±0.04 ^a
赖氨酸Lys [*]	1.01±0.11 ^a	1.09±0.08 ^a	1.27±0.05 ^b	1.06±0.10 ^a
组氨酸His ⁺	0.48±0.02	0.49±0.05	0.46±0.03	0.43±0.06
精氨酸Arg ⁺	1.22±0.36 ^a	1.28±0.39 ^a	1.46±0.31 ^b	1.15±0.12 ^a
天冬氨酸Asp ^{#&}	1.21±0.15 ^a	1.33±0.22 ^b	1.47±0.17 ^c	1.16±0.08 ^a
谷氨酸Glu ^{#&}	2.00±0.45 ^{ab}	2.12±0.31 ^b	2.48±0.48 ^c	1.91±0.26 ^a
甘氨酸Gly ^{#&}	0.84±0.11 ^b	0.83±0.07 ^b	0.77±0.14 ^a	0.83±0.21 ^b
丙氨酸Ala ^{#&}	1.19±0.22 ^a	1.27±0.25 ^a	1.46±0.23 ^b	1.20±0.15 ^a
脯氨酸Pro ^{&}	0.65±0.08	0.73±0.10	0.72±0.09	0.64±0.05
丝氨酸Ser ^{&}	0.52±0.06 ^a	0.55±0.03 ^a	0.6±0.07 ^b	0.49±0.05 ^a
半胱氨酸Cys ^{&}	0.09±0.00	0.08±0.01	0.09±0.05	0.08±0.03
酪氨酸Tyr ^{&}	0.43±0.04	0.455±0.07	0.52±0.05	0.42±0.08
总氨基酸TAA	12.88±1.85 ^a	13.95±1.83 ^b	15.68±1.91 ^c	12.81±1.52 ^a
必需氨基酸EAA	4.26±0.35 ^a	4.84±0.35 ^b	5.59±0.35 ^c	4.56±0.44 ^a
鲜味氨基酸FAA	5.24±0.95 ^a	5.54±0.85 ^a	6.19±1.02 ^b	5.09±0.71 ^a
非必需氨基酸NEAA	6.93±1.09 ^a	7.35±1.04 ^a	8.12±1.22 ^b	6.72±0.90 ^a
EAA/TAA	0.33	0.35	0.36	0.36
EAA/NEAA	0.62	0.66	0.68	0.68

注: *必需氨基酸; +半必需氨基酸; #鲜味氨基酸; &非必需氨基酸

Note: *essential amino acids (EAA); +half-essential amino acids (HEAA); #flavor amino acids (FAA); &non-essential amino acids (NEAA)

是T1 ($P<0.05$); Σ EAA中苏氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸含量在T2组显著高于其他各组($P<0.05$); 异亮氨酸含量在T1和T2组显著高于T0和T3组($P<0.05$)。呈味氨基酸(Σ FAA)和非必需氨基酸(Σ NEAA)

含量也呈先上升后下降的趋势,且T2组相比其他组差异显著($P<0.05$); Σ FAA中天冬氨酸、谷氨酸和丙氨酸,以及 Σ NEAA中丝氨酸含量在T2组达到最大值($P<0.05$)。

2.5 混养不同密度鲫的中华绒螯蟹肌肉营养品质评价

根据FAO/WHO理想模式,中华绒螯蟹肌肉中EAA/TAA在34%—36%,基本符合FAO/WHO理想模式中品质较好蛋白质的指标(表5)。同时,中华绒螯蟹肌肉中必需氨基酸组成较为均衡,营养价值较高。其中赖氨酸最高(CS: 1.69—2.13; ASS: 1.37—1.65),蛋氨酸+半胱氨酸评分最低(CS: 0.38—0.47; ASS: 0.67—0.83),为限制性氨基酸,其他氨基酸评分均在1.00左右或高于1.00。T0、T1、T2和T3组EAAI分别为85.62、96.86、109.99和92.86, T2组优于其他3组。

表5 不同组别中华绒螯蟹肌肉中必需氨基酸评分

Tab. 5 Essential amino acid score (EAAS) in muscle of *E. sinensis* from different groups

必需氨基酸 Essential amino acid	ASS				CS			
	T0	T1	T2	T3	T0	T1	T2	T3
异亮氨酸Ile	0.89	1.48	1.74	1.33	0.67	1.10	1.30	0.99
亮氨酸Leu	1.26	1.33	1.56	1.21	1.04	1.10	1.29	1.00
赖氨酸Lys	1.69	1.82	2.13	1.69	1.37	1.41	1.65	1.37
苏氨酸Thr	1.30	1.43	1.59	1.34	1.12	1.23	1.37	1.16
缬氨酸Val	1.11	1.23	1.37	1.16	0.84	0.93	0.89	0.87
蛋氨酸+半胱氨酸Met+Cys	0.67	0.67	0.83	0.78	0.38	0.38	0.47	0.44
苯丙氨酸+酪氨酸Phe+Tyr	1.46	1.57	1.80	1.44	0.99	1.06	1.22	0.98
必需氨基酸指数EAAI	85.62	96.86	109.99	92.86				

3 讨论

3.1 混养不同密度鲫对水环境、生长、可食部分近似组成及常规营养成分的影响

养殖环境、养殖密度和配合饲料等都会影响养殖动物生长和营养成分^[28]。有研究发现稻—鱼—蟹混合养殖在一定程度上能够减少水体中有效钾、全氮和COD含量,有利于维护水质、保护生态、促进生长^[29,30]。本实验发现低密度混养鲫的实验组其水质指标和对照组差异不显著,这是因为鲫属于底层杂食性鱼类,在水体中游动时会搅动底部水体流动,促使底部残饵粪便进入到溶解氧丰富的水体中并加快其氧化分解,提高水体营养盐含量。营养盐含量丰富则有利于水体溶解氧和浮游生物含量的提高,从而增加养殖对象的饵料来源^[25]。另外,由于稻田水深较浅,底层水体受到的阳光照射强度

更高, 能促使更多的微生物繁育, 可以提高养殖动物肠道微生物多样性和丰富度, 提高其对营养物质的吸收和代谢能力, 促进生长^[31]。有学者在点篮子鱼(*Siganus guttatus*)和文蛤(*Meretrix meretrix*)混养实验中发现, 混养一定密度的鱼类能让文蛤肌肉营养品质更佳, 但随着混养密度的增高其生长和营养成分受到一定影响^[32]。这和本研究结果相似, T1组中华绒螯蟹和鲫生长指标最好, 随着混养鲫密度的增加中华绒螯蟹和鲫生长指标均呈下降趋势, 分析原因是T1组放养的鲫密度较低, 能够充分利用残余的中华绒螯蟹饵料、排泄物及水质中天然饵料, 物种之间不存在竞争关系, 二者生长速度迅速。但随着放养鲫密度增大, 加剧了空间和摄食竞争, 鲫和中华绒螯蟹活动增加, 消耗能量变多, 生长指标随之降低。

肝胰腺、性腺和肌肉是中华绒螯蟹的重要可食用部位。本研究中随着混养鲫密度的增加, HSI指标和GSI指标均呈先升高后降低趋势, 以T1组最高, 可见肝胰腺发育和性腺发育呈正相关。肝胰腺是中华绒螯蟹重要的营养储存部位, 研究发现肝胰腺的营养物质积累对其性腺发育至关重要^[33, 34]。此外, 我们发现在稻田养殖模式下实验组中华绒螯蟹的MY和TEY值都明显高于对照组, 但随着混养鲫密度的增加呈下降的趋势, 说明混养密度增加可能造成中华绒螯蟹营养不良并发育迟缓, 从而影响生长指标。

肌肉中的蛋白质和脂肪是中华绒螯蟹主要的营养物质^[35], 为其新陈代谢输送更多能量, 保障其健康^[36—38]。梁洁等^[39]研究发现, 养殖环境能影响小龙虾(*Procambarus clarkii*)鲜肉中粗蛋白质含量, 适宜的养殖环境让肉质更加鲜嫩, 营养价值更高。本研究中发现T2组中华绒螯蟹粗蛋白含量最高, 同时3个实验组的粗脂肪含量都显著高于对照组, 由此可见混养一定密度的鲫, 能够提高中华绒螯蟹的营养价值。蛋白质含量较高, 说明其对饲料的蛋白利用率就相对较高, 从而可以节省成蟹养殖阶段的饲料成本, 减少水体污染^[40]。

3.2 混养不同密度鲫对中华绒螯蟹肌肉中氨基酸组成的影响

氨基酸是甲壳类动物最重要的能量来源, 氨基酸组成是反映中华绒螯蟹营养价值的重要指标之一^[41]。本研究发现, 中华绒螯蟹肌肉组织中鲜味氨基酸含量均较高, 尤其是谷氨酸、天冬氨酸和丙氨酸。而EAA/TAA比值0.34—0.36, 均在其最佳比例0.4左右, 这进一步证实稻田蟹具有味道鲜美、营养丰富等特点^[31]。足量的必需氨基酸是维持机体生

长和健康的基础, 是营养价值的体现^[42], 也是中华绒螯蟹肝胰腺和性腺发育的关键营养物质^[43]。

相比中华绒螯蟹肌肉中其他氨基酸含量, 本研究发现赖氨酸、精氨酸、谷氨酸含量(1.27%、1.46%、2.48%)最高, 这和徐志善等^[44]研究结果一致, 高于早熟蟹(1.02%、1.34%、2.05%)、辽河入海水域的野生蟹(雌蟹: 1.05%、1.18%、1.84%; 雄蟹: 1.04%、1.05%、1.82%)及未混养鱼类的稻田蟹(1.19%、1.53%、2.39%)^[24, 45, 46]。这3种氨基酸不仅能促进生长发育、增强机体免疫力、抗病毒、促进脂肪氧化等, 还可提高蛋白质代谢, 参与体内氧化过程, 改善中枢神经系统功能。其中的谷氨酸是重要的鲜味氨基酸, 对香味具有增强作用^[47]。

另外, 中华绒螯蟹可食部位营养成分的差异与养殖环境密切相关^[48, 49]。在本研究中, 随着混养鲫密度的增加, Σ TAA和 Σ EAA含量均呈现先上升后下降趋势, 尤其是苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸含量。苏氨酸在机体内的代谢途径和其他氨基酸不同, 可以通过苏氨酸脱水酶(TDH)和苏氨酸脱酶(TDG)及醛缩酶催化而转变为甘氨酸等。异亮氨酸、亮氨酸属脂肪族中性氨基酸的一种, 为防止肌肉损失, 很容易转化为葡萄糖。苯丙氨酸属芳香族氨基酸, 在体内大部分经苯丙氨酸羟化酶催化作用氧化成酪氨酸, 并与酪氨酸一起合成重要的神经递质和激素, 参与机体糖代谢和脂肪代谢。赖氨酸更多蓄积在肌肉组织的细胞内, 和天冬氨酸密不可分, 因为天冬氨酸经过反应合成二氨基庚二酸(DAP), 进而合成赖氨酸, 还可以合成苏氨酸、蛋氨酸和异亮氨酸^[50]。总之, 他们在动物体内含量不稳定, 随着外界环境变化和机体代谢而进行转化与合成。在本实验中, 随着鲫密度增加产生了竞争关系, 影响中华绒螯蟹和鲫生长和代谢, 从而导致体内这几种氨基酸含量出现了明显变化。

4 结论

在本实验条件下, 混养适量密度的鲫不仅可提高或改善中华绒螯蟹的生长性能、可食性状、肌肉粗蛋白和粗脂肪含量、必需氨基酸含量及评分, 而且对水环境指标影响较小, 且混养100—200尾/667 m²鲫对中华绒螯蟹的上述促进效果最佳。利用稻田的浅水环境辅以人为措施, 将养殖与种植有机结合, 充分利用稻田中的一切生物和非生物资源的同时又增加了稻田养殖的经济、生态和社会效益, 是一项值得推广的无公害养殖模式。(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Wang W, Wang C H, Ma X Z. Ecological Culture of Crab [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 59-84. [王武, 王成辉, 马旭洲. 河蟹生态养殖 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 59-84.]
- [2] Liu Q, Liu H, Wu X G, *et al.* Genetic variation of wild and cultured populations of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* from the Yangtze, Huanghe, and Liaohe River Basins using microsatellite marker [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, **46**(4): 958-968. [刘青, 刘皓, 吴旭干, 等. 长江、黄河和辽河水系中华绒螯蟹野生和养殖群体遗传变异的微卫星分析 [J]. 海洋与湖沼, 2015, **46**(4): 958-968.]
- [3] Qiu G F, Xiong L W, Han Z K, *et al.* A second generation SNP and SSR integrated linkage map and QTL mapping for the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. *Scientific Reports*, 2017(7): 39826.
- [4] Herborg L M, Weetman D, Van Oosterhout C, *et al.* Genetic population structure and contemporary dispersal patterns of a recent European invader, the Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* [J]. *Molecular Ecology*, 2007, **16**(2): 231-242.
- [5] Cui Z, Hui M, Liu Y, *et al.* High-density linkage mapping aided by transcriptomics documents ZW sex determination system in the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* [J]. *Heredity*, 2015, **115**(3): 206-215.
- [6] Jin X K, Li W W, Xu M J, *et al.* Transcriptome-wide analysis of immune responses in *Eriocheir sinensis* hemocytes after challenge with different microbial derivatives [J]. *Developmental and Comparative Immunology*, 2019(101): 103457.
- [7] Zhang Z X, Yokota M, Strüssmann C A. Potential competitive impacts of the invasive Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* on native Japanese mitten crab *Eriocheir japonica* [J]. *Hydrobiologia*, 2019, **826**(1): 411-420.
- [8] Qian S Y, Cao M, Wang X Q, *et al.* Introduction to the common diseases of *Eriocheir sinensis* [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2023, **29**(7): 107-111, 145. [钱诗悦, 曹梅, 王兴强, 等. 河蟹常见病害研究进展 [J]. 安徽农学通报, 2023, **29**(7): 107-111, 145.]
- [9] Song L L, Gao J C, Shao N L, *et al.* Effects of overwintering cultivation on nutritional quality and flavor of female *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, **30**(5): 800-811. [宋黎黎, 高建操, 邵乃麟, 等. 越冬暂养对雌性中华绒螯蟹的营养品质及风味的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2021, **30**(5): 800-811.]
- [10] Xu C, Wang X D, Han F L, *et al.* α -lipoic acid regulate growth, antioxidant status and lipid metabolism of Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*: optimum supplement level and metabonomics response [J]. *Aquaculture*, 2019(506): 94-103.
- [11] Wang S, He Y, Wang Y Y, *et al.* Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis* [J]. *Food Chemistry*, 2016(200): 24-31.
- [12] Wei M L, Zhang D D, Zhuang Z J, *et al.* Comparison of edible yield and nutritional composition of wild *Eriocheir hepuensis* and *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, **32**(2): 329-338. [魏茂磊, 张冬冬, 庄振俊, 等. 野生合浦绒螯蟹和中华绒螯蟹的可食率和营养组成比较 [J]. 上海海洋大学学报, 2023, **32**(2): 329-338.]
- [13] Yang Y, Tian L L, Xu J J, *et al.* Comparison of edible tissues and meat quality in cephalothorax and appendages of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) in three farming modes [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2022, **43**(1): 62-73. [杨阳, 田立立, 徐俊杰, 等. 3种养殖模式下中华绒螯蟹可食性状及体肉腿肉品质的比较 [J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2022, **43**(1): 62-73.]
- [14] Chen K K, Jiang G Z, Hua H K, *et al.* Three different diets on the growth, digestive enzyme activity, nutrition and quality of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, **48**(6): 958-967. [陈可可, 蒋广震, 华皓坤, 等. 三种饲料对中华绒螯蟹生长、消化酶活性及营养与品质的影响 [J]. 水生生物学报, 2024, **48**(6): 958-967.]
- [15] Yan Z L, Lin R M, Niu J Y, *et al.* Current status and perspectives of rice-crab production technique research in China [J]. *North Rice*, 2008, **38**(2): 5-8, 27. [闫志利, 林瑞敏, 牛俊义, 等. 我国稻蟹共作技术研究的现状与前景展望 [J]. 北方水稻, 2008, **38**(2): 5-8, 27.]
- [16] Liu Y H, Tang D Y, Zhang J, *et al.* Research progress on effect of paddy field integrated planting and breeding on rice, breeding animals and environment [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(2): 131-136. [刘瑛涵, 汤丹瑶, 张骏, 等. 稻田综合种养对水稻、养殖动物和环境的影响研究进展 [J]. 现代农业科技, 2023(2): 131-136.]
- [17] Bao J, Jiang H, Li X. Thirty years of rice-crab coculture in China-research progress and prospects [J]. *Reviews in Aquaculture*, 2022, **14**(3): 1597-1612.
- [18] Wyban J A, Lee C S, Sato V T, *et al.* Effect of stocking density on shrimp growth rates in manure-fertilized ponds [J]. *Aquaculture*, 1987, **61**(1): 23-32.
- [19] Thakur D P, Lin C K. Water quality and nutrient budget in closed shrimp (*Penaeus monodon*) culture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2003, **27**(3): 159-176.
- [20] Santos G A, Schrama J W, Mamuang R E P, *et al.* Chronic stress impairs performance, energy metabolism and welfare indicators in European seabass (*Dicentrarchus labrax*): the combined effects of fish crowding and water quality deterioration [J]. *Aquaculture*, 2010, **299**(1/2/3/4): 73-80.
- [21] Wang X, Yao Q, Lei X Y, *et al.* Effects of different stocking densities on the growth performance and antioxidant capacity of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) in rice crab culture system [J]. *Aquaculture International*, 2022, **30**(2): 883-898.
- [22] 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 [J]. *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 [J]. 湖北农业科学, 2010, **49**(7): 1677-1680.]
- [23] Fan W H, Fang L, Zhou J, *et al.* Effects of stocking density on growth, digestive enzyme and immune enzyme activities of red swamp crayfish *Procambarus clarkii* [J]. *Fisheries Science*, 2021, **40**(2): 261-266. [范文浩, 方刘, 周锦, 等. 养殖密度对克氏原螯虾生长及消化酶、免疫酶活性的影响 [J]. 水产科学, 2021, **40**(2): 261-266.]
- [24] Zhang B Y. Studies on the growth, nutritional quality and digestive physiology of *Eriocheir sinensis* under rice-crab culture systems [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022: 27-51. [张宝媛. 稻蟹共生模式下中华绒螯蟹生长、营养品质及消化生理的研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2022: 27-51.]
- [25] Cheng H H, Guo J L, Gu Z M, *et al.* Effects of polyculture of crucian carp on growth of Malaysian prawn *Macrobrachium rosenbergii* in a pond [J]. *Fisheries Science*, 2019, **38**(3): 416-419. [程海华, 郭建林, 顾志敏, 等. 混养鲫鱼对罗氏沼虾种虾培育效果的影响 [J]. 水产科学, 2019, **38**(3): 416-419.]
- [26] Liu G B, Zhou J W, Huang H. Analysis about the development, progress and functions of rice-fish production in China [J]. *Crop Research*, 2017, **31**(6): 591-596. [刘贵斌, 周江伟, 黄璜. 中国稻田养鱼生产的发展、进步与功能分析 [J]. 作物研究, 2017, **31**(6): 591-596.]
- [27] Fu Y Y, Zheng W Y, Zhang H, *et al.* Purging time on muscle quality and nutritional value of yellow catfish (*Peltobagrus fulvidraco*) under open flowing water mode [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(8): 1342-1352. [付运银, 郑维友, 张恒, 等. 开放流水养殖模式下暂养时间对黄颡鱼肌肉品质和营养价值的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(8): 1342-1352.]
- [28] Li S F. Population Ecology of Freshwater Fishes [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1990: 19-41. [李思发. 淡水鱼类种群生态学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1990: 19-41.]
- [29] Sun Y, Wu J R, Wang G J, *et al.* Effects of raising carp in paddy field on physical and chemical factors of soil and water [J]. *South China Agriculture*, 2020, **14**(5): 123-126. [孙悦, 吴敬荣, 王广军, 等. 稻田放养鲤鱼对土壤和水体理化因子的影响 [J]. 南方农业, 2020, **14**(5): 123-126.]
- [30] Liu F, Dong J, Li X, *et al.* A preliminary study on the ecological polyculture models of *Ctenopharyngodon idellus* and *Eriocheir sinensis* in Dongping Lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(2): 131-136. [刘峰, 董俊, 李娴, 等. 东平湖草鱼-中华绒螯蟹复合生态养殖模式的初步研究 [J]. 海洋湖沼通报, 2020(2): 131-136.]
- [31] Zhao L L, Long Y N, Zhang L J, *et al.* Effects of paddy field and pond culture on intestinal microbiota, immune capacity and muscle free amino acids of *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, **31**(6): 1404-1412. [赵柳兰, 龙亚男, 张乐纪, 等. 稻田和池塘养殖模式对中华绒螯蟹肠道菌群、免疫酶活及肌肉游离氨基酸的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, **31**(6): 1404-1412.]
- [32] Li Q, Sun Y Q, Liu J Y, *et al.* Effects of polyculture of *Siganus guttatus* with different densities and *Meretrix meretrix* on their growth and muscle nutrition [J]. *Marine Fisheries*, 2023, **45**(3): 326-339. [李琪, 孙艳秋, 刘鉴毅, 等. 不同密度点篮子鱼与文蛤混养对鱼、贝生长和肌肉营养的影响 [J]. 海洋渔业, 2023, **45**(3): 326-339.]
- [33] Zhao H L, Wu X G, Jiang X D, *et al.* Comparative study on gonadal development and nutritional composition among Yangtze, Huang, and Liao River populations of adult female *Eriocheir sinensis* cultured in earth ponds [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, **41**(1): 109-122. [赵恒亮, 吴旭干, 姜晓东, 等. 池塘养殖条件下长江、黄河和辽河种群中华绒螯蟹雌体卵巢发育和营养组成的比较研究 [J]. 水产学报, 2017, **41**(1): 109-122.]
- [34] 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.
- [35] Zhang P, Zhao Z L. Research progress on nutritional requirements and nutritional physiology of *Eriocheir sinensis* [J]. *Journal of Aquaculture*, 1996, **17**(2): 22-24. [张萍, 赵振伦. 河蟹的营养需求与营养生理的研究进展 [J]. 水产养殖, 1996, **17**(2): 22-24.]
- [36] Wu X G, Cheng Y X, Sui L Y, *et al.* Effect of dietary supplementation of phospholipid and highly unsaturated fatty acids on reproductive performance and offspring quality of the Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* (H. Milne-Edwards), female broodstock [J]. *Aquaculture*, 2007, **273**(4): 602-613.
- [37] Lin S M, Luo L, Ye Y T. Research development of nutrition for *Eriocheir sinensis* [J]. *Feed Industry*, 2001, **22**(8): 15-17. [林仕梅, 罗莉, 叶元土. 中华绒螯蟹的营养研究进展 [J]. 饲料工业, 2001, **22**(8): 15-17.]
- [38] Ma M J, Wang C, Wu X G, *et al.* Dynamic changes of lipids in hepatopancreas and muscle during the molting cycle of young Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, **38**(11): 1889-1898. [马明君, 王春, 吴旭干, 等. 中华绒螯蟹幼蟹蜕皮周期中肝胰腺和肌肉脂类的动态变化 [J]. 水产学报, 2014, **38**(11): 1889-1898.]
- [39] Liang J, Pang M, Li L J, *et al.* Comparison of physico-chemical properties of *Procambarus clarkii* bred in paddy field and clean water aquaculture model [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(5): 79-81. [梁洁, 庞敏, 李林静, 等. 稻田与清水养殖模式下小龙虾肉的理化特性比较 [J]. 湖南农业科学, 2018(5): 79-81.]
- [40] Chen Y F, Lin H Z, Niu J, *et al.* Dietary protein requirements for three sizes of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, **38**(13): 118-121. [陈义方, 林黑着, 牛津, 等. 不同规格南美白对虾蛋白质需要量的研究 [J]. 广东农业科

- 学, 2011, **38**(13): 118-121.]
- [41] Shao L, Wang C, He J, *et al.* Meat quality of Chinese mitten crabs fattened with natural and formulated diets [J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2014, **23**(1): 59-72.
- [42] Shewbart K L, Mies W L, Ludwig P D. Identification and quantitative analysis of the amino acids present in protein of the brown shrimp *Penaeus aztecus* [J]. *Marine Biology*, 1972, **16**(1): 64-67.
- [43] 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.
- [44] Xu Z S, Sun Q J, Wang X N, *et al.* Nutritional and taste quality of precocious *Eriocheir sinensis* [J]. *Food Research and Development*, 2019, **40**(16): 105-112. [徐志善, 孙钦军, 王锡念, 等. 早熟中华绒螯蟹营养和滋味成分的分析 [J]. 食品研究与开发, 2019, **40**(16): 105-112.]
- [45] Wang X, Han G, Zhang X J, *et al.* Comparative analysis of female *Eriocheir sinensis* nutritional composition from different waters [J]. *Freshwater Fisheries*, 2019, **49**(5): 98-106. [王潇, 韩刚, 张小军, 等. 不同水域中华绒螯蟹雌体中营养品质比较分析 [J]. 淡水渔业, 2019, **49**(5): 98-106.]
- [46] Wang X, Han G, Zhang X J, *et al.* Nutritional composition and flavor components of male Chinese mitten handed crab *Eriocheir sinensis* from different waters [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, **34**(5): 688-696. [王潇, 韩刚, 张小军, 等. 不同水域中华绒螯蟹雄体营养成分及风味成分差异性研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2019, **34**(5): 688-696.]
- [47] Alam M S, Teshima S I, Ishikawa M, *et al.* Dietary arginine requirement of juvenile kuruma shrimp *Marsupenaeus japonicus* (bate) [J]. *Aquaculture Research*, 2004, **35**(9): 842-849.
- [48] Grahl-Nielsen O, Jacobsen A, Christophersen G, *et al.* Fatty acid composition in adductor muscle of juvenile scallops (*Pecten maximus*) from five Norwegian populations reared in the same environment [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2010, **38**(4): 478-488.
- [49] 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) [J]. *Aquaculture Research*, 2011, **42**(3): 457-468.
- [50] Zhu X, Xu X J. Glucose, fat and amino acid metabolism under extreme environments: research advances [J]. *Military Medical Sciences*, 2019, **43**(4): 309-313. [朱祥, 徐小洁. 极端环境下糖、脂肪、氨基酸代谢的研究进展 [J]. 军事医学, 2019, **43**(4): 309-313.]

DIFFERENT POLYCULTURE DENSITIES OF *CARASSIUS AURATUS* ON THE GROWTH AND NUTRIENT COMPONENT OF *ERIOCHEIR SINENSIS* UNDER RICE-CRAB CULTURE SYSTEM

JIANG Xiang-Hui, WANG Xing-Bing, KOU Ling-Xiao, WEI Hong-Xiang, XIAO Zu-Guo,
WU Li-Na, FENG Yan and YAN You-Li

(Liaoning Key Laboratory of Aquatic Animal Disease Control, Liaoning Institute of Freshwater Fisheries, Liaoyang 111000, China)

Abstract: In order to achieve the ecological balance, the influence mechanism of mixed culture of *Carassius auratus* [average weight of (48.53±2.11) g] on the growth and nutritional composition of *Eriocheir sinensis* [average weight of (23.48±0.82) g] were selected as the research objects in this paper. The density of *C. auratus* was set at 0 fish/667 m² (T0, control), 100 fish/667 m² (T1), 200 fish/667 m² (T2), and 300 fish/667 m² (T3) in mixed culture with *E. sinensis*. The experimental period lasted for 90d. The results showed that the final body weight, weight gain rate, specific growth rate, meat yield, hepatopancreas index, gonadal index, and total edible rate were higher in the T1 in 4 experimental groups, while the feed conversion ratio was significantly lower than that in the other groups ($P<0.05$). The total amino acid content, essential amino acid content, and essential amino acid score in T2 muscle were the highest, with Thr, Leu, Phe, and Lys levels in T2 muscle exceeding significantly in other groups ($P<0.05$). Research demonstrated that a stocking density of 100—200 fish/667 m² of *C. auratus* not only enhanced the growth of *E. sinensis* but also optimized the edible tissues and nutrient quality of *E. sinensis* muscle.

Key words: Paddy culture; Breeding density; Growth index; Nutrient component; *Eriocheir sinensis*; *Carassius auratus*