

张千,杨伟杰,莫爱杰,等.投喂频率和投喂水平对克氏原螯虾机体生长、营养成分和生化指标的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(3):120-127.DOI:10.13300/j.cnki.hnlnxb.2025.03.014

投喂频率和投喂水平对克氏原螯虾机体生长、营养成分和生化指标的影响

张千¹,杨伟杰¹,莫爱杰²,杨慧君¹,顾泽茂^{1,2},袁勇超^{1,2}

1. 华中农业大学水产学院,武汉 430070; 2. 华中农业大学双水双绿研究院/长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心/湖北洪山实验室,武汉 430070

摘要 为优化投喂策略,提高饲料利用率、减少环境废物排放,试验选取体质量(4.97 ± 0.11)g的克氏原螯虾810尾采用 3×3 双因子设计,日投喂频率1次(F1)、2次(F2)和3次(F3),投喂水平为试验虾质量的3%(L3)、4.5%(L4.5)和6%(L6),饲养56 d,探究投喂频率与投喂水平对克氏原螯虾机体的影响。结果显示:生长方面,L4.5和L6试验虾增重率、特定生长率显著高于L3,L6试验虾的增重率、特定生长率和饲料系数显著高于L3,L4;全虾和肌肉常规营养成分方面,L4.5和L6试验虾粗蛋白含量显著高于L3,L6试验虾全虾的粗脂肪含量显著高于L4.5和L3试验组;血清生化指标方面,L6和L4.5试验虾血清的碱性磷酸酶(AKP)、酸性磷酸酶(ACP)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MDA)含量显著高于L3组,F1试验虾的MDA含量显著低于F2、F3,2个试验因素有显著的交互作用;结合增重率、存活率、饲料成本计算养殖效益,L4.5试验组的养殖效益显著高于其他试验组,为23.45元/kg左右,L6其次,L3效益最低(13.65元/kg左右),L4.5F2组饲料成本最低,养殖效益最高。综合考虑试验虾生长、健康程度及养殖效益,建议克氏原螯虾稻田养殖过程中以4.5%的投喂水平、投喂频率2次/d为宜。

关键词 克氏原螯虾;投喂水平;投喂频率;生长;营养成分;免疫

中图分类号 S966.12 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0120-08

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)又称红螯虾、淡水小龙虾,原产地为北美,后经日本传入我国,属外来物种^[1-2]。因其口感好、营养价值高、富含蛋白质和多种多不饱和脂肪酸颇受消费者的喜爱^[3]。我国水产动物养殖一般依赖传统人工投喂的方式^[4],近年来规模持续扩大的克氏原螯虾养殖业面临着遗传育种工作薄弱、疾病频发、饲料开发滞后、养殖模式粗放和投喂策略不科学等问题^[5-8]。

投喂频率和投喂水平是影响水产动物生长和健康的重要因素。科学的投喂策略有利于提升水产动物养殖的经济效益和生态效益^[9],提高养殖对象的存活率^[10]、生长性能^[11],减少饲料的损耗和代谢废物的排放^[12],促进水产动物健康生长并降低养殖成本^[13]。而投喂水平过高或过低均不利于水产动物养殖,过高会减缓养殖动物生长速度^[14-15]、造成动物体

内脂肪沉积^[16]、肝损伤^[17]并且加速养殖环境恶化;过低则会影响动物的正常生长过程甚至出现同类相残的现象。目前关于克氏原螯虾投喂策略的研究仍处于起步阶段。因此,本研究采用 3×3 双因子设计,通过养殖实践探究投喂频率和投喂水平对克氏原螯虾生长、营养成分以及免疫功能的影响,以期为克氏原螯虾科学的饲喂策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验饲料

试验饲料为商品料,购自武汉澳华农牧科技有限公司,蛋白质含量为34.42%,脂肪含量8.78%,灰分4.66%。

1.2 试验动物与饲养管理

试验所用克氏原螯虾通过网箱暂养于华中农业

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 中央高校自主创新基金项目(2662024SCPY008; 2662022SCYJ003); 湖北洪山实验室重大项目(2021hszd002); 2023—2025省级小龙虾产业链奖补资金项目

张千, E-mail: 508652087@qq.com

通信作者: 袁勇超, E-mail: yyc@mail.hzau.edu.cn

大学“双水双绿”科研基地(监利市新沟镇)。网箱(2 m×1.5 m×1 m)架设在基地稻虾田2.5 m深的围沟内,网箱上沿装有防逃设施,网箱中配备网片制作的简易遮蔽物作为克氏原螯虾的栖息场所,降低试验虾的应激反应和相互残食可能。试验前试验虾在已消毒的网箱中暂养2周。暂养结束,选取体格健壮、附肢齐全、规格整齐的克氏原螯虾810尾,采用3×3双因子试验设计,在日投喂1次(F1)、2次(F2)和3次(F3)的频率下投喂水平分别为虾体质量的3%(L3)、4.5%(L4.5)和6%(L6),共9个试验组,每个试验组设3个重复,每个处理组30尾虾,共27个养殖桶,试验养殖56 d。每2周测定1次养殖桶内试验虾的总质量,并且根据其生长速度调整投喂量。F1组为19:00投喂;F2组为07:00和19:00投喂;F3组为07:00、13:00和19:00投喂。每天记录投喂前的死亡数并及时清理死虾。

1.3 样品采集与分析方法

采样前试验虾饥饿24 h,记录克氏原螯虾的体质质量、存活数量等。每个处理组随机选取10尾试验虾置于-20 ℃冰箱中,用于分析全虾营养成分。每个处理组随机选取7尾虾用注射器取血淋巴,使用超速离心机(LE-80K,贝克曼,美国)离心(7 130 r/min, 10 min, 4 ℃),取上清,-80 ℃冷冻,测定碱性磷酸酶(AKP)、酸性磷酸酶(ACP)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)的活性及丙二醛(MDA)含量(采用南京建成生物工程研究所试剂盒按说明书检测);随后分离肌肉样品,肌肉称质量计算含肉率后保存于-20 ℃冰箱,用于分析试验虾肌肉营养成分。

测定初始均质量、终末均质量、肌肉质量用于计算增重率、特定生长率、饲料系数、含肉率和存活率。各指标的计算参照文献[18]。试验所用商品料5 000元/t,饲料成本(feed cost, C_F)和养殖效益(production efficiency, E_p)计算公式如下:

$$C_F = 5000 / 1000 \times R_{FC} \quad (1)$$

$$E_p = W_1 - F - W_2 \quad (2)$$

式(1)、(2)中, R_{FC} 为饲料系数, W_1 为平均市场价, W_2 为水、电、塘租等其他成本, 平均市场价根据湖北省监利市克氏原螯虾市场行情, 规格25 g及以下按24元/kg计算, 规格25 g以上按照34元/kg计算。

采用常压烘干法在105 ℃恒温烘箱中烘干肌肉和全虾计算水分含量,采用凯氏定氮法测定粗蛋白

质含量(GB/T 5009.5—2016),采用索氏抽提法检测粗脂肪含量(GB/T 5009.6—2016),采用马弗炉550 ℃灼烧法分析灰分含量(GB/T 5009.4—2016)。

1.4 数据分析及处理

使用SPSS 19.0 Kolmogorov Smirnov-test和Levene-test检验数据的正态性和方差齐性。在满足正态分布和方差齐性条件下,用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验各组间的指标差异,用一般线性模型单变量方法分析投喂频率和养殖密度的主效应以及交互效应,Bonferroni法进行多重比较,若2个因素之间的交互作用显著,则使用单因素方差分析(One-way ANOVA)评估同一因素是否存在差异,邓肯法比较多重差异显著性, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 克氏原螯虾生长和饲料利用

如表1所示,当投喂水平为6%时,试验虾的终末质量(final body weight, FBW)、增重率(weight gain rate, WGR)和特定生长率(special growth ratio, SGR)均达到最高值,显著优于L3组($P < 0.05$)。并且L6F3组克氏原螯虾FBW最高,与L4.5F2、L6F1和L6F2组差异不显著($P > 0.05$),但显著高于其余各组($P < 0.05$)。L3和L4.5组的饲料系数(special growth ratio, FCR)较低(1.30~1.48),而L6组的FCR显著升高(1.81~1.89),提示过量投喂导致转化率下降,其中L4.5F2组饲料系数最低,显著低于L4.5F1、L6F1、L6F2和L6F3组($P < 0.05$)。含肉率(dressing percentage, DP)在各组间差异较小,其中L4.5F1组含肉率最高,显著高于其他试验组($P < 0.05$)。统计结果显示,投喂水平对FBW、WGR、SGR、FCR和DP均有极显著影响($P < 0.001$),投喂频率对FBW、SGR和FCR影响显著($P < 0.05$),并且投喂水平和投喂频率的交互作用对FBW、FCR和DP有显著影响($P < 0.05$)。

2.2 克氏原螯虾存活率、饲料成本和效益

如表2所示,L3组试验虾的存活率最低(66.67%~68.89%),显著低于其他组($P < 0.05$),L6F3组存活率最高,与L4.5F1、L4.5F2和L6F2组无显著差异($P > 0.05$),但显著高于其余各组($P < 0.05$)。L6组试验虾饲料成本最高,L4.5F2组饲料成本最低(6.25 ± 0.09 元/kg)。L4.5组饲料成本最低(6.25~7.10元/kg),显著优于其他组($P < 0.05$),其

中L4.5F2组效益最高,与L4.5F3组无显著差异($P>0.05$),但显著高于其余各组($P<0.05$)。统计结果显示,投喂水平对克氏原螯虾存活率、饲料成本和养殖效益均有极显著影响($P<0.001$),投喂频率对克氏原螯虾存活率的影响不显著($P>0.05$),但显著影响饲料成本和养殖效益($P<0.05$),投喂水平和投喂频率的交互作用对克氏原螯虾的存活率、饲料成本和养殖效益均有显著影响($P<0.05$)。

表1 不同投喂水平和频率下克氏原螯虾的生长性能和饲料利用情况($n=3$)Table 1 Growth performance and feed utilization of *Procambarus clarkii* under different feeding levels and frequencies($n=3$)

投喂水平 Feeding level (L)	投喂频率 Feeding frequency(F)	初始质量/g IBW	终末质量/g FBW	增重率/% WGR	特定生长率/ (%/d) SGR	饲料系数 FCR	含肉率/% DP
L3	F1	4.91±0.03	23.67±0.75c	381.73±14.35c	2.81±0.05c	1.35±0.02c	13.26±0.32abc
	F2	5.01±0.18	23.04±1.53cd	359.71±29.47c	2.72±0.12cd	1.31±0.04c	11.87±0.20d
	F3	4.94±0.08	22.24±1.02d	350.06±25.92c	2.68±0.10d	1.31±0.01c	11.47±0.45d
L4.5	F1	4.95±0.12	33.11±0.57b	568.35±16.06b	3.39±0.04b	1.48±0.04b	14.37±0.32d
	F2	5.07±0.11	35.42±0.31a	599.13±20.69ab	3.47±0.05ab	1.30±0.02c	13.18±0.15bc
	F3	4.92±0.10	33.02±0.39b	570.77±12.48b	3.40±0.03b	1.31±0.09c	12.89±0.30c
L6	F1	5.05±0.10	35.71±0.40a	607.81±19.74a	3.49±0.05ab	1.81±0.06a	13.66±0.21ab
	F2	4.90±0.07	36.00±0.21a	634.37±12.54a	3.56±0.03a	1.85±0.02a	13.55±0.10ab
	F3	4.97±0.15	36.32±0.37a	631.80±23.84a	3.55±0.06a	1.89±0.06a	13.71±0.27a
P值 P-value	L		<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	F		0.036	0.329	0.471	0.029	<0.001
	L×F		0.008	0.108	0.126	0.003	<0.001

注:同列数据无字母或标相同字母表示没有显著差异($P>0.05$);不同的字母表示存在显著差异($P<0.05$)。L表示投喂水平;F表示投喂频率;L×F表示投喂水平和投喂频率的相互作用,下表同。Note: Within a column, values labeled without letter and with the same superscript letter are not significantly different ($P>0.05$); different letters indicate significant differences ($P<0.05$). L denotes feeding level; F denotes feeding frequency; L×F indicates the interaction between feeding level and feeding frequency. The same as below.

表2 不同投喂水平和频率下克氏原螯虾的存活率、饲料成本和养殖效益($n=3$)Table 2 Survival rate, feed cost, and farming profit of *Procambarus clarkii* under different feeding levels and frequencies ($n=3$)

投喂水平 Feeding level(L)	投喂频率 Feeding frequency(F)	存活率/% Survival rate	饲料成本/(元/kg) Feed cost	养殖效益/(元/kg) Production efficiency
L3	F1	68.89±5.09d	6.49±0.08c	13.51±0.08c
	F2	66.67±3.34d	6.29±0.19c	13.72±0.19c
	F3	67.78±5.09d	6.27±0.07c	13.73±0.07c
L4.5	F1	83.33±3.34ab	7.10±0.20b	22.90±0.20a
	F2	81.11±1.92abc	6.25±0.09c	23.75±0.09a
	F3	76.67±3.34c	6.31±0.41c	23.69±0.41a
L6	F1	77.78±1.92cb	8.71±0.27a	21.29±0.27b
	F2	84.44±1.92a	8.89±0.10a	21.11±0.09b
	F3	86.67±3.34a	9.05±0.30a	20.95±0.31b
P值 P-value	L	<0.001	<0.001	<0.001
	F	0.902	0.029	0.029
	L×F	0.014	0.002	0.003

2.3 营养成分

如表3所示,在不同投喂水平和频率下,试验虾全身的营养成分呈现显著差异,L3组全虾的水分含量(68.98%~69.39%)和灰分含量(14.32%~14.47%)最高,粗蛋白含量最低(13.05%~13.61%),显著低于L4.5和L6组($P<0.05$),提示过低的投喂水平不利于试验虾蛋白沉积。L6F2和L6F3组全虾灰分含量显著低于其他各组($P<0.05$)。L6组全虾的粗脂肪显著高于L4.5和L3组($P<0.05$),其

中L6F3组全虾的粗脂肪含量最高,与L6F2组无显著差异($P>0.05$)。统计结果显示,投喂水平显著影响全虾的水分、粗蛋白、粗脂肪和粗灰分含量($P<0.05$)。随着投喂水平的增加,全虾粗脂肪的含量有增加的趋势,灰分和水分的含量有降低的趋势。投喂水平和投喂频率对全虾的粗脂肪和粗灰分的影响有显著的交互作用($P<0.05$),对全虾的水分和粗蛋白的影响无显著的交互作用($P>0.05$)。

表3 不同投喂水平和频率下克氏原螯虾的营养成分($n=3$)

Table 3 Nutritional composition of whole-body *Procambarus clarkii* under varying feeding levels and frequencies ($n=3$)

投喂水平 Feeding frequency level(L)	投喂频率 Feeding (F)	全虾 Whole-body					肌肉 Muscle				%
		水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	灰分 Ash	水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	灰分 Ash		
L3	F1	69.39±0.24a	13.54±0.14b	2.74±0.06cd	14.32±0.19c	79.13±0.19a	17.22±0.09bc	2.08±0.04e	1.56±0.04b		
	F2	69.32±0.63a	13.61±0.55b	2.69±0.18cd	14.37±0.20c	78.97±0.63ab	16.86±0.32d	2.28±0.03c	1.65±0.06ab		
	F3	68.98±0.12a	13.05±0.48b	2.56±0.02d	14.47±0.12c	78.63±0.12ab	17.04±0.06cd	2.32±0.01c	1.70±0.06a		
L4.5	F1	68.25±0.09b	14.48±0.38a	2.83±0.02c	12.12±0.22bc	77.90±0.09c	17.51±0.12a	2.40±0.06b	1.27±0.03cde		
	F2	68.87±0.12a	14.64±0.30a	2.90±0.10c	12.50±0.31ab	78.52±0.12b	17.58±0.04a	2.24±0.03cd	1.20±0.00e		
	F3	68.35±0.40b	14.73±0.23a	2.85±0.27c	12.68±0.65a	78.00±0.40c	17.51±0.08a	2.19±0.07d	1.33±0.12cd		
L6	F1	67.91±0.33bc	14.47±0.13a	3.32±0.01b	12.71±0.34a	77.56±0.33cd	17.37±0.10ab	2.62±0.06a	1.37±0.03c		
	F2	67.62±0.13cd	14.42±0.19a	3.50±0.11ab	11.71±0.22c	77.27±0.13de	17.51±0.07a	2.57±0.05a	1.25±0.04de		
	F3	67.32±0.23d	14.27±0.35a	3.71±0.08a	11.66±0.09c	76.97±0.23e	17.51±0.09a	2.28±0.01c	1.29±0.01cde		
P值 P-value	L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		
	F	0.035	0.449	0.353	0.429	0.028	0.717	<0.001	0.046		
	L×F	0.134	0.392	0.014	0.002	0.106	0.039	<0.001	0.015		

与全虾的营养成分含量变化趋势一致,L6组肌肉的粗脂肪含量(2.28%~2.62%)最高,L4.5和L6组的粗蛋白含量较高(17.37%~17.58%),L6肌肉的粗蛋白和粗脂肪显著高于L3和L4.5组($P<0.05$),其中L6F1组肌肉粗脂肪含量最高,与L6F2组无显著差异($P>0.05$)。L3组肌肉的水分和灰分均显著高于L4.5和L6组($P<0.05$),L4.5F2组灰分含量最低。统计结果显示,投喂水平和投喂频率对克氏原螯虾肌肉的粗蛋白、粗脂肪和灰分有显著的交互作用($P<0.05$),对肌肉的水分无显著的交互作用($P>0.05$)。综上,高投喂水平(6%)显著提升全身和肌肉的粗脂肪含量,但可能导致水分和灰分降低;4.5%投喂水平在粗蛋白和灰分平衡上表现更优。

2.4 生化指标

由表4可知,L4.5组试验虾的LZM活性水平最

高(26.40~27.65 U/mL),显著高于L3组,L6F3组的LZM活性水平达到峰值(28.37 U/mL);L4.5和L6组的AKP活性水平较高,其中当投喂频率增加活性更高,L6F3组的AKP(24.12 U/mL)和ACP活性(19.51 U/mL)最高。L4.5F2组SOD活性最高,与L6F3组无显著差异($P>0.05$),但显著高于其他各组($P<0.05$)。L4.5F2组CAT活性最高,显著高于L3F1、L3F2和L3F3组($P<0.05$),与其他组没有显著差异($P>0.05$)。L3组试验虾的血清AKP、SOD和CAT活性水平显著低于L4.5和L6组($P<0.05$),F2、F3组试验虾的MDA水平显著高于F1组($P<0.05$)。统计结果显示,投喂水平对LZM、AKP、ACP、MDA、CAT和SOD均有极显著影响($P<0.001$),投喂频率对LZM、AKP、ACP、MDA和SOD均有极显著影响($P<0.001$),投喂水平和投喂频率的交互作用对克氏原螯虾血清中的LZM、AKP、

表4 不同投喂水平和频率下克氏原螯虾的血清生化指标($n=3$)
Table 4 Serum biochemical parameters of *Procambarus clarkii* under varying feeding levels and frequencies ($n=3$)

投喂水平 Feeding level(L)	投喂频率 Feeding frequency (F)	溶菌酶/(U/mL) LZM	碱性磷酸酶/ (U/mL) AKP	酸性磷酸酶/ (U/mL) ACP	丙二醛/ (nmol/mL) MDA	超氧化物歧化酶/ (U/mL) SOD	过氧化氢酶/ (U/mL) CAT
L3	F1	23.92±0.61d	18.84±0.19e	9.97±0.32e	1.56±0.03e	126.83±2.15e	1.20±0.05d
	F2	24.98±0.31cd	19.38±0.21d	12.95±0.24c	1.80±0.05d	125.57±1.26e	1.42±0.14c
	F3	25.16±0.53bcd	18.66±0.19e	9.14±0.41f	1.92±0.06c	106.52±2.65f	1.51±0.10bc
L4.5	F1	26.40±0.31b	21.01±0.37c	15.25±0.33ab	2.08±0.03b	137.10±2.24c	1.72±0.09a
	F2	27.65±0.31a	23.74±0.36a	12.89±0.40c	2.25±0.08a	147.02±0.95a	1.78±0.05a
	F3	26.41±1.24b	23.90±0.09a	14.81±0.64b	2.23±0.09a	137.78±1.57c	1.69±0.05ab
L6	F1	24.81±1.10cd	22.96±0.08b	11.49±0.64d	1.89±0.04cd	134.07±1.14d	1.66±0.14ab
	F2	25.69±0.53bc	24.12±0.12a	15.75±0.18a	2.29±0.05a	143.03±1.11b	1.69±0.14ab
	F3	28.37±0.54a	24.10±0.19a	15.91±0.21a	2.17±0.10ab	146.11±1.33a	1.72±0.09a
P值 P-value	L	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	F	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.056
	L×F	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.088

ACP、MDA 和 SOD 水平存在显著影响($P<0.05$)，但对 CAT 无显著的交互作用($P>0.05$)。

3 讨 论

本研究发现在低投喂水平时试验虾的生长性能随着投喂水平的升高而显著提高,相似的结果曾在吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[19]、长吻鮠仔稚鱼(*Leiocassis longirostris* Günther)^[20]、胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus* Bleeker)^[21]等鱼类中报道过。此外,当投喂水平从4.5%增加到6%时,生长性能保持相对稳定,推测试验动物的摄食量过高时,机体无法将全部的营养物质消化吸收,投喂水平具有最适宜和经济价值最高的临界点,投喂水平超过这个临界点,养殖对象无法摄取过量的饲料,生长速度趋于稳定,但投喂水平过高会导致饲料浪费、成本增加、利润降低。当投喂水平为4.5%时,2次/d和3次/d试验虾饲料系数显著低于1次/d试验组,效益显著高于1次/d试验组。2次/d和3次/d试验组试验虾之间没有显著差异。推测投喂频率为2次/d时已满足克氏原螯虾正常生长的需求,继续提高投喂频率,无法持续促进养殖动物的生长但会浪费更多的人力成本,这在其他鱼类中也发现相似的结果,如Zheng等^[9]报道1次/d的投喂频率便可以满足大菱鲆(*Scophthalmus maximus* Linnaeus)的生长,继续提高至2~3次/d,对大菱鲆的生长性能没有进一步改

善;Karadal等^[22]发现2次/d的投喂频率使施氏厚唇丽鱼(*Iodotropheus sprengerae*)达到最好的生长效果和肌肉品质。此外,试验中还发现L3F1、L3F2和L3F3组的试验虾存活率显著低于其他试验组,推测可能是3%投喂水平过低无法满足试验虾生长需求,导致试验虾长期饥饿,从而抵抗力水平低下。

水产动物的体成分会受到投喂水平的影响,其中粗脂肪含量受到的影响最为显著^[23]。本研究中克氏原螯虾全虾和肌肉的粗蛋白含量受投喂频率的影响并不显著,但水分含量有随投喂水平的增加而下降的趋势,粗脂肪含量随投喂水平的增加有上升的趋势。推测随着投喂水平的增加,机体的摄食量提高,体内能量物质摄入提高,过多的能量物质以脂肪的形式储存。投喂水平还显著影响了肌肉中粗蛋白的含量,随着投喂水平的增加,肌肉中粗蛋白含量随之增加。综上,在养殖过程中可以适当提高投喂水平。

甲壳动物主要依靠非特异性免疫来保护机体健康,溶菌酶(LZM)是甲壳动物非特异性免疫中关键的杀菌物质,研究者通常把溶菌酶的活性作为观察机体非特异性免疫的关键指标之一^[24]。碱性磷酸酶(AKP)是重要的代谢调节酶,主要作用于甲壳动物体内营养物质的消化吸收和代谢,对于提高甲壳动物免疫力发挥着重要作用;酸性磷酸酶(ACP)可以维持甲壳动物正常的生理功能和提高免疫力^[25-26]。

王艺超等^[27]研究饱食水平下刺参体壁与体腔液内AKP、LZM的活性水平,发现这2种酶表现出较高水平活性提高。本研究中,克氏原螯虾在投喂水平提高至4.5%时,LZM、ACP和AKP的活性水平显著提高。这表明当投喂水平达到4.5%时,克氏原螯虾抗病能力相对较强;低投喂水平不能满足养殖动物的营养需要,本研究中3%的投喂水平导致克氏原螯虾长期处于较低的代谢水平,从而影响了抗病能力。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)可以清除机体内产生的过量活性氧(ROS),对缓解体内应激发挥着重要作用。超氧化物歧化酶系统将超氧化物催化为过氧化氢,为机体对抗氧化应激提供了首道防线。CAT接着通过一系列酶促反应消除过氧化氢^[28]。当水产动物体内产生过多的自由基足以对抗抗氧化系统时,丙二醛(MDA)大量积累,危害机体健康。在本研究中,随着投喂水平升高,SOD和CAT活性增强。推测过饱食作为一种应激源,会引起机体损伤,机体通过提高抗氧化酶活性及时缓解体内的氧化应激反应。综上,考虑投喂水平和投喂频率对试验虾生长、饲料系数、健康程度的影响,并结合养殖成本和效益,建议克氏原螯虾养殖的投喂水平4.5%,投喂频率2次/d。

参考文献 References

- [1] 呼光富,刘香江.克氏原螯虾生物学特性及其对我国淡水养殖业产生的影响[J].北京水产,2008(1):49-51.HU G F, LIU X J.Biological characteristics of *Procambarus clarkii* and its influence on freshwater aquaculture in China [J].Journal of Beijing fisheries,2008(1):49-51 (in Chinese).
- [2] YUE G H, LI J, BAI Z, et al.Genetic diversity and population structure of the invasive alien red swamp crayfish [J].Biological invasions,2010,12(8):2697-2706.
- [3] 封功能,王爱民,邵荣,等.克氏原螯虾不同生长阶段营养成分分析与评价[J].江苏农业科学,2011,39(4):383-385. FENG G N, WANG A M, SHAO R, et al.Analysis and evaluation of nutritional components of *Procambarus clarkii* at different growth stages [J].Jiangsu agricultural sciences,2011,39(4):383-385 (in Chinese).
- [4] SAPKOTA A, SAPKOTA A R, KUCHARSKI M, et al. Aquaculture practices and potential human health risks: current knowledge and future priorities [J].Environment international, 2008,34(8):1215-1226.
- [5] 胡倩,王齐帅,黄瑾,等.基于形态性状和SSR标记的克氏原螯虾养殖群体遗传多样性分析[J].华中农业大学学报,2024,43(3):258-266.HU Q, WANG Q S, HUANG J, et al. Genetic diversity analysis of farming *Procambarus clarkii* population based on morphology traits and SSR markers [J].Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43 (3) : 258-266 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王慧.淮安市克氏原螯虾的养殖现状与可持续发展研究[D].南京:南京农业大学,2013.WANG H.Research on the current situation and sustainable development of *Procambarus clarkii* aquaculture in Huai'an City [D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [7] 董家莲.小龙虾养殖中的技术细节与误区[J].农业与技术,2019,39(4):135-136.DONG J L.Technical details and misunderstandings in crayfish culture [J].Agriculture and technology, 2019, 39 (4):135-136 (in Chinese).
- [8] 陈松文,江洋,汪金平,等.湖北省稻虾模式发展现状与对策分析[J].华中农业大学学报,2020,39(2):1-7.CHEN S W, JIANG Y, WANG J P, et al.Situation and countermeasures of integrated rice-crayfish farming in Hubei Province [J].Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39 (2) : 1-7 (in Chinese with English abstract).
- [9] ZHENG K K, LIANG M Q, FANG W, et al.Effects of feeding frequency and ration level on growth performance and non-specific immunity of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) at different growth stages [J].Israeli journal of aquaculture - bamidgeh, 2017, 1416:1-7.
- [10] 覃希.投喂频率和投喂水平对吉富罗非鱼幼鱼生长性能和生理机能的影响[D].南宁:广西大学,2014.QIN X.Effects of feeding frequency and feeding level on growth performance and physiological function of juvenile Gifu tilapia [D].Nanning: Guangxi University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [11] 王建学.红鳍东方鲀幼鱼蛋白源消化率研究[D].上海:上海海洋大学,2020.WANG J X.The study on optimum protein to energy ratio in diet, feeding strategies and apparent digestibility coefficients of selected feed ingredients of juvenile tiger puffer (*Takifugu rubripes*) [D].Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [12] 孙晓峰,冯健,陈江虹,等.投喂频率对尼罗系吉富罗非鱼幼鱼胃排空、生长性能和体组成的影响[J].水产学报,2011,35(11):1677-1683.SUN X F, FENG J, CHEN J H, et al.Effects of feeding frequency on gastric evacuation, growth benefit and body composition of juvenile genetic improved farmed tilapia strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J].Journal of fisheries of China, 2011, 35(11):1677-1683 (in Chinese with English abstract).
- [13] 徐革锋,刘洋,李永发,等.不同投喂率对细鳞鲑(*Brachymystax lenok*)幼鱼生长及体成分的影响[J].海洋与湖沼,2013,44(2):433-437.XU G F, LIU Y, LI Y F, et al.Effect of feeding rate on growth and body composition of juvenile *Brachymystax lenok* [J].Oceanologia et limnologia sinica,

- 2013,44(2):433-437 (in Chinese with English abstract).
- [14] MIZANUR R M, PARK G, YUN H, et al. The effects of feeding rates in juvenile Korean rockfish (*Sebastes schlegeli*) reared at 17 °C and 20 °C water temperatures [J]. *Aquaculture international*, 2014, 22(3):1121-1130.
- [15] EROLDOĞAN O T, KUMLU M, AKTAŞ M. Optimum feeding rates for European sea bass *Dicentrarchus labrax* L. reared in seawater and freshwater [J]. *Aquaculture*, 2004, 231 (1/2/3/4):501-515.
- [16] 田红艳.光照与投喂策略对团头鲂幼鱼摄食、生长及免疫的影响研究[D].南京:南京农业大学,2018.TIAN H Y. Effects of light and feeding strategies on feeding, growth and immunity of juvenile *Megalobrama amblycephala* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [17] 褚志鹏,金佳利,陈细华,等.不同投喂率和投喂频率对杂交鲟幼鱼生长、体成分和生化指标的影响[J].中国水产科学,2020,27(2):177-185.CHU Z P, JIN J L, CHEN X H, et al. Effects of different feeding rates and frequencies on the growth performance, body composition, and biochemical parameters of juvenile hybrid sturgeon [J]. *Journal of fishery sciences of China*, 2020, 27(2):177-185 (in Chinese with English abstract).
- [18] 彭迪,陈效儒,文华,等.饲料脂肪水平对克氏原螯虾亲虾生长性能、肌肉成分、繁殖性能以及血淋巴生化指标的影响[J].*水产学报*,2019,43 (10):2175-2185. PENG D, CHEN X R, WEN H, et al. Effects of dietary lipid levels on growth performance, muscle composition, reproductive performance and he molymph biochemical indices of *Procambarus clarkii* brood-stock [J]. *Journal of fisheries of China*, 2019, 43(10): 2175-2185 (in Chinese with English abstract).
- [19] SOUSA R M R, AGOSTINHO C A, OLIVEIRA F A, et al. Productive performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed at different frequencies and periods with automatic dispenser[J]. *Arq Bras Med Vet Zool*, 2012, 64(1):192-197.
- [20] 刘变枝,朱晓鸣,韩冬,等.投喂水平对长吻𬶏仔稚鱼生长和存活的影响[J].*水生生物学报*,2013,37(2):261-268.LIU B Z, ZHU X M, HAN D, et al. Effects of feeding level on growth performance of Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther) larvae [J]. *Acta hydrobiologica sinica*, 2013, 37 (2):261-268 (in Chinese with English abstract).
- [21] 袁勇超.胭脂鱼适宜蛋白能量水平、投喂水平和磷需要量及对植物蛋白源的利用研究[D].武汉:华中农业大学,2011. YUAN Y C. Optimum protein and energy levels, feeding levels and phosphorus requirement and utilization of plant protein sources for *Myxocyprinus asiaticus* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [22] KARADAL O, TRKMEN G, GROY D. Effect of feeding frequency on growth performance, reproduction efficiency and skin coloration of rusty cichlids (*Iodotropheus sprengerae*) [J]. *Journal of applied aquaculture*, 2020, 32(2):124-138.
- [23] TIAN H Y, YANG C C, YU Y B, et al. Dietary cholesterol level affects growth, molting performance and ecdysteroid signal transduction in *Procambarus clarkii* [J/OL]. *Aquaculture*, 2020, 523: 735198 [2024-09-30]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735198>.
- [24] MUTA T, IWANAGA S. The role of hemolymph coagulation in innate immunity [J]. *Current opinion in immunology*, 1996, 8 (1):41-47.
- [25] LIU X L, XI Q Y, YANG L, et al. The effect of dietary *Panax ginseng* polysaccharide extract on the immune responses in white shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. *Fish & shellfish immunology*, 2011, 30(2):495-500.
- [26] 何海琪,孙凤.中国对虾酸性和碱性磷酸酶的特性研究[J].*海洋与湖沼*,1992,23(5):555-560.HE H Q, SUN F. Studies on the characteristics of acid and alkaline phosphatases in Chinese shrimp, *Penaeus chinensis* [J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 1992, 23 (5) : 555-560 (in Chinese with English abstract).
- [27] 王艺超,梁萌青,郑珂珂.不同投喂水平对刺参(*Apostichopus japonicus* Selenka)生长、消化酶及免疫相关酶活性的影响[J].*渔业科学进展*,2016,37(1):87-92.WANG Y C, LIANG M Q, ZHENG K K. Effects of different ration levels on growth, activities of digestive enzymes and immunity-related enzymes in *Apostichopus japonicus* Selenka [J]. *Progress in fishery sciences*, 2016, 37(1):87-92 (in Chinese with English abstract).
- [28] GUO K, RUAN G L, FAN W H, et al. The effect of nitrite and sulfide on the antioxidant capacity and microbial composition of the intestines of red swamp crayfish, *Procambarus clarkii* [J]. *Fish & shellfish immunology*, 2020, 96:290-296.

Effects of feeding frequency and feeding level on growth, nutrient composition, and biochemical parameters of *Procambarus clarkii*

ZHANG Qian¹, YANG Weijie¹, MO Ajie², YANG Huijun¹, GU Zemao^{1,2}, YUAN Yongchao^{1,2}

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Shuangshui Shuanglü Institute, Huazhong Agricultural University/

Engineering Research Center of Ministry of Education for Green Development of Aquatic Biological Industry in Yangtze River Economic Belt/Hubei Hongshan Laboratory, Wuhan 430070, China

Abstract This study aimed to investigate the effects of feeding frequency and feeding levels on the physiological responses of *Procambarus clarkii*, with the goal of optimizing feeding strategies to enhance feed utilization and reduce environmental waste discharge. A total of 810 crayfish, with an average body weight of (4.97 ± 0.11) g were randomly divided into 9 treatment groups, each with 3 replicates, following a 3×3 two-factor experimental design. The daily feeding frequencies were once (F1), twice (F2), and three times (F3), while the feeding levels were set at 3% (L3), 4.5% (L4.5), and 6% (L6) of the experimental shrimp's body weight. The experiment lasted for 56 days. The results showed that the weight gain rate (WGR) and specific growth rate (SGR) of shrimp in the L4.5 and L6 groups were significantly higher than those in the L3 group ($P < 0.05$). The L6 group exhibited significantly higher WGR, SGR, and feed conversion ratio (FCR) compared to the L3 and L4.5 groups ($P < 0.05$). In terms of whole-body and muscle nutrient composition, the crude protein content in the L4.5 and L6 groups was significantly higher than that in the L3 group ($P < 0.05$), while the crude fat content in the whole body of the L6 group was significantly higher than in that in the L4.5 and L3 groups. Serum biochemical analysis revealed that levels of alkaline phosphatase (AKP), acid phosphatase (ACP), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and malondialdehyde (MDA) in the L6 and L4.5 groups were significantly higher than those in the L3 group ($P < 0.05$). The MDA level in the F1 group was significantly lower than in the F2 and F3 groups ($P < 0.05$), with significant interaction effects observed between feeding frequency and level ($P < 0.05$). Based on WGR, survival rate, and feed cost, the L4.5 group achieved the highest economic benefit (approximately 23.45 yuan/kg), followed by the L6 group, while the L3 group yielded the lowest profit (13.65 yuan/kg). The L4.5F2 group exhibited the lowest feed cost and the highest economic return. Considering growth performance, health status, and cost-effectiveness, a feeding level of 4.5% of body weight, administered twice daily, is recommended for rice-crayfish integrated farming systems.

Keywords *Procambarus clarkii*; level of feeding; feeding frequency; growth; nutrient composition; immunity

(责任编辑:边书京)