

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20230404003

http://www.yykxjz.cn/

郭赛, 陈效儒, 袁汉文, 罗凯, 张付贤, 陈焱, 郜卫华, 田娟. 饲料蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾生长性能、消化力和抗氧化性能的影响. 渔业科学进展, 2023, 44(5): 90-103

GUO S, CHEN X R, YUAN H W, LUO K, ZHANG F X, CHEN Y, GAO W H, TIAN J. Effects of dietary protein levels and processing techniques on the growth performance, digestibility, and antioxidant capacity of red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*). Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(5): 90-103

饲料蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾生长性能、消化力和抗氧化性能的影响*

郭 赛^{1,2#} 陈效儒^{3#} 袁汉文¹ 罗 凯¹ 张付贤¹
陈 焱¹ 郜卫华^{1①} 田 娟^{2①}

(1. 长江大学 涝渍灾害与湿地农业湖北省重点实验室 湖北 荆州 434024;

2. 中国水产科学研究院长江水产研究所 湖北 武汉 430223;

3. 通威股份有限公司 水产健康养殖四川省重点实验室 四川 成都 610041)

摘要 为研究不同蛋白质水平和加工工艺饲料对克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)生长性能、消化力和抗氧化能力的影响,本研究采用4个蛋白质水平(28%、30%、32%和36%)和2种加工工艺即膨化饲料(EF)和硬颗粒饲料(PF)的4×2双因素实验设计,进行为期13周的养殖实验。结果显示,蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾增重率和肝体比有显著的交互作用($P<0.05$)。主效应结果显示,28%蛋白质可显著提高增重率和特定生长率,EF组的末重和增重率显著高于PF组($P<0.05$)。蛋白质水平和加工工艺对肝胰脏的胰蛋白酶和淀粉酶活性有交互作用($P<0.05$)。主效应结果显示,肝胰脏的胰蛋白酶、淀粉酶和肠道胰蛋白酶、淀粉酶均在28%蛋白质水平时最高,EF组肝胰脏胰蛋白酶、淀粉酶和肠道胰蛋白酶活力高于PF组($P<0.05$)。蛋白质水平和加工工艺对肝胰脏的丙二醛和碱性磷酸酶活性有显著的交互作用($P<0.05$)。主效应结果显示,肝胰脏碱性磷酸酶活性以及血清的碱性磷酸酶和酸性磷酸酶均在28%蛋白质水平时最低。PF组肝胰脏丙二醛含量显著低于EF组($P<0.05$),碱性磷酸酶活性显著低于EF组($P<0.05$)。4种模型(Logistic、Gompertz、Von Bertalanffy和Brody)均能很好地模拟克氏原螯虾体重和体长的生长曲线,拟合度均大于0.97,其中,以Logistic模型拟合克氏原螯虾体重和体长最优,且幂函数可以反映体重和体长之间的关系。综上所述,28%蛋白质水平和膨化加工工艺使克氏原螯虾具有最优的生长性能和消化力,28%蛋白质水平的硬颗粒饲料可提高克氏原螯虾的抗氧化能力。

关键词 克氏原螯虾; 蛋白水平; 加工工艺; 生长曲线; 消化力; 抗氧化

中图分类号 S963.7 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)05-0090-14

* 湖北省教育厅百校联百县项目(BXLBX0312)、中国水产科学研究院基本科研业务费(2022XT01)、通威股份有限公司产学研合作项目(TW2011259)、湿地生态与农业利用教育部工程研究中心开放课题(KFT202003; KFT202102)和大学生创新创业训练项目(YZ2021062)共同资助。

#共同第一作者: 郭 赛, E-mail: 1151740175@qq.com; 陈效儒, E-mail: CHENXR@tongwei.com

①通信作者: 郜卫华, E-mail: gwh105@126.com; 田 娟, E-mail: tianjuan@yfi.ac.cn

收稿日期: 2023-04-04, 收修改稿日期: 2023-05-14

克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)原产于美国、墨西哥北部等地区(蔡凤金等, 2010), 于 20 世纪 30 年代从日本引入我国, 具有生长周期短、适应力强、口感鲜美、营养丰富等优点(黄晓丽等, 2022)。近 10 年来, 克氏原螯虾产量快速增长, 由 2011 年的 56.3 万 t 增加到 2021 年的 263.3 万 t, 目前已是我国淡水养殖规模最大的养殖虾类(农业农村部渔业渔政管理局等, 2022)。蛋白质是影响克氏原螯虾生长性能和饲料成本的最重要因素之一, 饲料蛋白质水平过高或过低都会对甲壳动物起负面作用(Teles *et al.*, 2020)。饲料中蛋白质水平不足会降低克氏原螯虾机体免疫力从而影响生长, 而蛋白质水平过高会引起代谢负担, 增加成本(范陈伟等, 2020)。然而, 不同研究得出的克氏原螯虾饲料蛋白质最适添加量的结果差异较大。凌俊等(2012)认为克氏原螯虾饲料中蛋白质含量以 30% 为宜, 吴东等(2007)认为蛋白质水平在 27% 时可以满足克氏原螯虾的需求, 王自蕊等(2020)研究得出克氏原螯虾饲料中适宜的蛋白质水平为 31.37%~32.20%, Lu 等(2020)认为饲料蛋白质水平为 35.77% 时增重率最高。这可能与所选择的饲料原料、生长阶段和评价指标等不同有关。

目前, 市场上克氏原螯虾饲料主要有膨化沉性饲料和挤压颗粒饲料 2 种。在异育银鲫(*Carassius gibelio var.*) (Gao *et al.*, 2019)、草鱼(*Ctenopharyodon idellus*) (陈团等, 2018)、哲罗鲑(*Hucho taimen*) (王常安等, 2008)和台湾泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*) (李玲丽等, 2020)中发现膨化饲料优于硬颗粒饲料, 在金头鲷(*Sparus aurata*)中膨化饲料和硬颗粒饲料对生长性能无显著差异(Venou *et al.*, 2010), 而在大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)中得到相反的结论(魏旭光, 2015)。这些结果表明膨化饲料和硬颗粒饲料对不同水产动物的促生长作用存在较大差异。

目前, 关于不同蛋白质水平和加工工艺对水生动

物生长的影响研究较少。胡兵(2021)研究发现, 蛋白质水平为 41% 和 43% 和膨化加工工艺可促进凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长和体蛋白沉积。然而, 蛋白质水平和加工工艺是否影响克氏原螯虾的生长至今未知。因此, 本研究基于饲料企业的实际生产需要, 研究 4 个不同蛋白质水平(28%、30%、32% 和 36%)和 2 种加工工艺(膨化饲料和硬颗粒饲料)的饲料对克氏原螯虾生长性能、消化力和抗氧化性能的影响, 旨在为优化克氏原螯虾饲料配方和加工工艺提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验设计和实验饲料

采用 4 种蛋白质水平和 2 种加工工艺的 4×2 双因素实验设计, 所制作的 8 种饲料分别为蛋白质水平 28%、30%、32% 和 36% 的膨化饲料(expanded feed, 分别简称为 EF28、EF30、EF32 和 EF36 组)和硬颗粒饲料(pelleted feed, 分别简称为 PF28、PF30、PF32 和 PF36 组)。实验饲料由通威股份有限公司提供, 所有饲料置于-20℃ 储存, 饲料营养成分见表 1。

1.2 饲养管理

养殖实验在长江大学动物科学学院水产研究基地进行, 克氏原螯虾虾苗购于湖北荆州高清养殖合作社, 采用塑料圆桶(直径×高= 150 cm×50 cm)饲养。实验用水为经曝气的自来水, 养殖水深为 0.25 m。虾苗先于圆桶中暂养 1 周, 正式实验前 24 h 停止喂食, 挑选初始体重为(5.35±0.63) g 的虾苗随机分到 24 个养殖桶中。每 3 个养殖桶(30 尾/桶)为一个处理, 进行为期 13 周的养殖实验, 每天分别于 08:00 和 17:00 饱食投喂 2 次。养殖用水 pH 为 7.5~8.0, 溶解氧为 5.0~7.0 mg/L, 氨氮低于 0.1 mg/L。

表 1 实验饲料基本营养成分(干物质, %)

Tab.1 Basic nutrient composition of experimental feed (dry matter, %)

饲料 Feed	水分 Moisture	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude lipid	灰分 Ash
EF28	9.68	28.54±0.26	7.27±0.13	13.91±0.03
EF30	9.67	30.19±0.35	7.96±0.31	14.62±0.09
EF32	10.48	32.76±0.32	8.41±0.24	13.72±0.09
EF36	9.83	37.24±0.42	7.79±0.03	14.64±0.04
PE28	8.33	29.23±0.39	7.21±0.21	14.10±0.16
PE30	8.87	31.67±0.45	7.70±0.34	14.05±0.12
PE32	9.76	33.21±0.42	8.04±0.19	13.44±0.10
PE36	10.62	36.95±0.51	7.58±0.15	13.14±0.04

1.3 样本收集与分析

正式实验开始后,每7 d从每桶随机捞取10尾虾测量体重和体长,所得数据用于生长曲线拟合。实验结束后,每个重复随机选择15尾,用1 mL无菌注射器从围心腔内抽取血淋巴,于4 °C冰箱放置24 h后,4 °C离心(12 000 ×g) 20 min,取上清液于-80 °C保存。取肝胰脏和肠道,-80 °C保存待用。采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定血清和肝胰脏的酸性磷酸酶(acid phosphatase, ACP)、碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC)以及肠道和肝胰脏的胰蛋白酶(trypsin)、淀粉酶(amylase)和脂肪酶(lipase)。

饲料及虾体营养组成按照AOAC(2005)国际标准方法分析。饲料中水分含量的测定采用105 °C干燥法,全虾水分的测定采用真空冷冻干燥法。粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定,粗脂肪含量用索氏提取法进行测定,灰分通过550 °C灼烧法测定。

1.4 计算公式与统计分析

克氏原螯虾生长指标计算公式如下:

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

成活率(survival rate, SR, %)= $100 \times (N_2 / N_1)$

肝体比(hepatosomatic index, HSI, %)= $100 \times H / W$

式中, W_t 为虾终末均重(g), W_0 为虾初始均重(g); N_2 为终末虾尾数, N_1 为初始虾尾数; H 为肝脏质量(g), W 为体重(g)。

本研究所有结果用平均值±标准差(Mean±SD)表示。实验数据采用SPSS 19.0进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、 T 检验、双因素方差分析(two-way ANOVA)和非线性回归分析,用Duncan法进行多重比较, $P < 0.05$ 为差异显著水平。

生长曲线选用4种常用的生长模型对克氏原螯虾体重和体长进行拟合(表2),根据拟合曲线参数值、估计值和拟合度(R^2)选择最优的生长模型。使用幂函数对体重和体长进行拟合,方程表达式为 $W = aL^b$ (a 和 b 为参数, W 为体重, L 为体长)。本研究中所选的4个模型均为非线性微分方程,采用高斯-牛顿(Gauss-Newton)算法,以残差平方和最小为目标函数,逐次迭代计算各参数值,收敛标准为 1×10^{-8} ,计算复相关指数(R^2),作为衡量拟合优度的指标。

表2 4种生长曲线模型表达式

Tab.2 Four growth curve model expressions

模型 Model	表达式 Expression	拐点(t, y) Inflection point
Logistic	$y = A/[1+B \times \exp(-k \times t)]$	$(\ln B)/k, A/2$
Gompertz	$y = A \times \exp[-B \times \exp(-k \times t)]$	$(\ln B)/k, A/e$
Von Bertalanffy	$y = A[1-B \times \exp(-k \times t)]^3$	$(\ln 3B)/k, 8A/27$
Brody	$y = A[1-B \times \exp(-k \times t)]$	-

注:A为极限生长值, k 为瞬时生长速度,B为参数, t 为天数(d)。

Note: A is the limit growth value, k is the instantaneous growth rate, B is the parameter, and t is the number of days (d).

2 结果

2.1 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾生长性能和体组成的影响

蛋白质水平和加工工艺对增重率和肝体比有显著的交互作用($P < 0.05$)(表3)。由主效应分析可知,蛋白水平对终末体重、增重率和肝体比有显著影响($P < 0.05$)。随着蛋白质水平的提高,增重率逐渐下降。EF28组终末体重和增重率显著高于EF36组,EF28组肝体比显著低于其他实验组($P < 0.05$)。膨化加工工艺组末重和增重率显著高于颗粒加工工艺组($P < 0.05$)。此外,本实验养殖在半露天养殖环境中,养殖水体中有其他杂质,而饲料为沉性饲料,残余饲料较难收集,因此,没有摄食率和饲料系数等相关数据。

蛋白质水平和加工工艺对全虾粗蛋白和粗脂肪有显著的交互作用($P < 0.05$)(表4)。主效应分析显示,蛋白质水平对全虾粗蛋白和粗脂肪影响显著($P < 0.05$)。加工工艺对粗脂肪有显著影响($P < 0.05$),膨化饲料粗脂肪含量显著高于颗粒饲料组($P < 0.05$)。

2.2 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾酶活性和丙二醛的影响

蛋白质水平和加工工艺对肝胰脏的胰蛋白酶和淀粉酶活性有显著的交互作用($P < 0.05$)(表5)。主效应结果显示,蛋白质水平对肝胰脏的胰蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶和肠道胰蛋白酶与淀粉酶活性影响显著($P < 0.05$)。肝胰脏的胰蛋白酶、淀粉酶和肠道胰蛋白酶、淀粉酶活性随蛋白水平升高而降低,均在28%蛋白水平时达到最大值,肝胰脏脂肪酶呈先上升后下降的趋势($P < 0.05$)。膨化饲料组肝胰脏胰蛋白酶、淀粉酶活力和肠道胰蛋白酶活性显著高于颗粒饲料组($P < 0.05$)。

表 3 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾生长的影响

Tab.3 Effects of protein level and processing technique on the growth of *P. clarkii*

项目 Items	初始体重 IBW/g	终末体重 FBW/g	增重率 WGR/%	成活率 SR/%	肝体比 HSI/%
组别 Group					
EF28	5.23±0.10	19.80±2.77 ^a	279.16±10.11 ^a	68.89±1.92	5.31±0.52 ^a
EF30	5.27±0.17	17.59±0.76 ^b	234.59±4.77 ^b	70.00±6.67	6.23±0.49 ^{bc}
EF32	5.05±0.14	17.51±1.07 ^b	244.18±5.98 ^b	70.00±6.67	7.04±0.30 ^{cd}
EF36	5.38±0.45	16.09±0.69 ^{bc}	199.51±5.88 ^d	70.00±3.33	7.27±0.15 ^d
PF28	5.49±0.34	17.02±0.97 ^{bc}	211.53±9.22 ^c	72.22±3.85	6.30±0.03 ^{bc}
PF30	5.26±0.16	15.60±0.07 ^{bc}	196.81±9.82 ^d	70.00±3.33	6.76±0.89 ^{bc}
PF32	5.33±0.28	16.26±0.67 ^{bc}	205.26±6.73 ^{bcd}	74.44±5.09	5.91±0.53 ^{ab}
PF36	5.52±0.12	14.87±0.65 ^c	169.41±12.19 ^e	70.00±6.67	6.11±0.50 ^{abc}
主效应 Main effect					
蛋白水平 Protein level					
28	5.36±0.11	18.41±0.98 ^a	245.35±15.90 ^a	70.56±1.34	5.80±0.26 ^b
30	5.26±0.06	16.59±0.49 ^a	215.70±9.06 ^c	70.00±1.92	6.50±0.29 ^a
32	5.19±0.10	16.88±0.43 ^a	224.72±9.01 ^b	72.22±2.38	6.47±0.30 ^a
36	5.45±0.12	15.48±0.37 ^b	184.46±6.96 ^d	70.00±1.92	6.69±0.29 ^a
加工工艺 Processing					
膨化饲料 Expanded feed	5.23±0.07	17.75±0.56 ^a	239.36±8.99 ^a	69.72±1.26	6.46±0.25
硬颗粒饲料 Pelleted feed	5.40±0.07	15.94±0.29 ^b	195.75±5.07 ^b	71.67±1.33	6.27±0.17
双因素方差分析 Two-way ANOVA					
蛋白质水平 Protein level	0.509	0.002	0.000	0.849	0.030
加工工艺 Processing	0.464	0.006	0.000	0.355	0.050
交互作用 Interaction effect	0.735	0.648	0.012	0.814	0.002

注: 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$). The following table is the same.

表 4 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾常规成分的影响(鲜物质, %)

Tab.4 Effects of protein level and processing technique on the composition of *P. clarkii* (fresh matter, %)

项目 Items	全虾 Whole body			
	水分 Moisture/%	粗蛋白 Crude protein/%	粗脂肪 Crude lipid/%	灰分 Ash/%
组别 Group				
EF28	70.46±0.45	11.58±0.16 ^{cd}	4.98±0.23 ^a	9.19±0.25
EF30	69.84±0.68	12.51±0.11 ^{ab}	4.95±0.21 ^{ab}	9.51±0.98
EF32	69.44±0.58	11.33±0.52 ^e	4.62±0.22 ^{cd}	9.94±0.17
EF36	69.66±0.93	12.87±0.38 ^a	4.35±0.07 ^d	10.08±0.43
PF28	69.65±1.66	12.20±0.60 ^{bc}	4.67±0.36 ^{cd}	10.41±2.13
PF30	70.61±0.49	12.30±0.56 ^{ab}	4.45±0.31 ^{cd}	8.80±0.16
PF32	69.48±1.51	11.53±0.46 ^{de}	4.81±0.29 ^{bc}	10.40±0.81
PF36	69.96±0.97	11.47±0.48 ^{cde}	4.35±0.22 ^d	9.97±0.28
主效应 Main effect				
蛋白水平 Protein level				
28	70.05±0.48	11.89±0.52 ^b	4.82±0.32 ^a	9.80±1.11
30	70.23±0.28	12.41±0.38 ^a	4.70±0.36 ^{ab}	9.15±0.74
32	69.46±0.42	11.43±0.45 ^c	4.72±0.25 ^a	10.17±0.58
36	69.81±0.35	12.17±0.85 ^{ab}	4.35±0.15 ^c	10.02±0.33
加工工艺 Processing				
膨化饲料 Expanded feed	69.85±0.20	12.07±0.72	4.73±0.31 ^a	9.68±0.60
硬颗粒饲料 Pelleted feed	69.92±0.33	11.87±0.60	4.57±0.32 ^b	9.90±0.97
双因素方差分析 Two-way ANOVA				
蛋白质水平 Protein level	0.896	0.000	0.040	0.344
加工工艺 Processing	0.921	0.252	0.000	0.487
交互作用 Interaction effect	0.935	0.003	0.009	0.481

表5 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾肝胰脏和肠道消化酶活性的影响
Tab.5 Effects of protein level and processing technique on the activities of digestive enzymes in hepatopancreas and intestines of *P. clarkii*

项目 Items	肝胰脏 Hepatopancreas			肠道 Intestine		
	胰蛋白酶 Trypsin /(U/mg prot)	淀粉酶 Amylase /(U/mg prot)	脂肪酶 Lipase /(U/g prot)	胰蛋白酶 Trypsin /(U/mg prot)	淀粉酶 Amylase /(U/mg prot)	脂肪酶 Lipase /(U/g prot)
组别 Group						
EF28	5 038.44±119.86 ^a	13.66±0.53 ^a	28.21±1.61 ^{abc}	92.97±4.30 ^a	1.81±0.06 ^a	33.92±3.45
EF30	4 648.51±183.74 ^b	8.24±0.13 ^{cd}	30.21±1.00 ^a	82.42±3.02 ^{bc}	1.83±0.11 ^a	34.92±3.83
EF32	4 343.80±68.33 ^c	11.84±0.24 ^b	28.99±1.09 ^{ab}	81.64±3.27 ^{bc}	1.71±0.18 ^a	33.14±5.19
EF36	2 551.40±101.58 ^g	6.26±1.21 ^{ef}	26.71±1.80 ^{bc}	72.32±2.92 ^{de}	1.45±0.11 ^b	34.28±4.15
PF28	4 353.07±122.06 ^c	8.96±0.65 ^c	28.01±1.55 ^{abc}	84.66±4.77 ^b	1.85±0.11 ^a	34.05±2.54
PF30	3 833.29±70.73 ^d	7.11±0.89 ^{de}	28.26±1.33 ^{abc}	76.46±2.62 ^{cd}	1.78±0.07 ^a	33.32±2.69
PF32	3 538.54±91.04 ^e	7.49±0.89 ^{de}	28.69±2.6 ^{abc}	74.81±2.09 ^{de}	1.70±0.20 ^a	35.53±1.00
PF36	2 984.19±118.54 ^f	4.84±1.87 ^f	25.61±1.46 ^c	69.07±3.53 ^e	1.45±0.10 ^b	34.74±0.72
主效应 Main effect						
蛋白质水平 Protein level						
28	4 695.76±159.49 ^a	11.31±1.07 ^a	28.11±0.58 ^b	88.81±2.49 ^a	1.83±0.03 ^a	33.99±1.11
30	4 240.90±189.25 ^b	7.68±0.34 ^c	29.23±0.61 ^a	79.44±1.69 ^b	1.80±0.04 ^a	34.12±1.26
32	3 941.17±182.45 ^c	9.67±1.00 ^b	28.84±0.73 ^a	78.23±1.83 ^b	1.71±0.07 ^a	34.33±1.47
36	2 767.79±104.83 ^d	5.55±0.66 ^d	26.16±0.66 ^b	70.69±1.39 ^c	1.45±0.04 ^b	34.51±1.09
加工工艺 Processing						
膨化饲料 Expanded feed	4 145.54±288.92 ^a	10.00±0.89 ^a	28.53±0.52	82.34±2.36 ^a	1.70±0.05	34.06±1.05
硬颗粒饲料 Pelleted feed	3 677.27±151.42 ^b	7.10±0.53 ^b	27.64±0.57	76.25±1.88 ^b	1.69±0.06	34.41±0.54
双因素方差分析 Two-way ANOVA						
蛋白质水平 Protein level	0.000	0.000	0.201	0.000	0.000	0.993
加工工艺 Processing	0.000	0.000	0.023	0.000	0.886	0.798
交互作用 Interaction effect	0.000	0.007	0.774	0.636	0.935	0.774

蛋白水平和加工工艺对肝胰脏丙二醛含量和碱性磷酸酶活性有显著的交互作用($P<0.05$)。主效应结果显示,蛋白质水平对肝胰脏丙二醛含量、碱性磷酸酶活力和血清碱性磷酸酶、酸性磷酸酶活性及丙二醛含量影响显著($P<0.05$) (表6)。随着蛋白质水平升高,肝胰脏碱性磷酸酶活性和血清总抗氧化能力、碱性磷酸酶和酸性磷酸酶活性逐渐降低,肝胰脏和血清的丙二醛逐渐升高($P<0.05$)。颗粒饲料肝胰脏丙二醛含量显著低于膨化饲料组($P<0.05$),碱性磷酸酶活力显著低于膨化饲料($P<0.05$)。

2.3 生长模型拟合

蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾体重和体长的累计生长曲线如图1所示,体重呈先上升后逐渐平缓的趋势,其中,EF28实验组从第28天开始体重

累计生长曲线高于其他各实验组。体长的生长曲线前期(0~35 d)呈生长较快,到第49天开始减慢,70 d后各组的体长增长趋势差异不明显。

用 Logistic、Gompertz、Von Bertalanffy 和 Brody 共4种模型对体重进行拟合(表7)。结果显示,除 Gompertz 模型对 EF28 组拟合效果最好, R^2 为 0.992, 其余各组均为 Logistic 模型效果最好, R^2 分别为 0.992、0.994、0.989、0.993、0.987、0.989 和 0.996, 拟合曲线见图2。说明 Logistic 模型最适宜拟合克氏原螯虾的体重生长过程。EF28、EF30、EF32、EF36、PF28、PF30、PF32 和 PF36 组体重在最适模型(Logistic)条件下的拐点时间分别为 35.47、31.26、35.00、34.30、33.12、27.76、29.92 和 26.58 d, 拐点体重分别为 10.20、9.28、9.60、8.87、9.42、8.36、8.81 和 8.19 g。

用 Logistic、Gompertz 和 Von Bertalanffy 3 种模

表 6 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾肝胰脏和血清抗氧化和免疫酶活性及丙二醛的影响

Tab.6 Effects of protein level and processing technique on activities of antioxidant- and immune-related indices in hepatopancreas and serum of *P. clarkii*

项目 Items	肝胰脏 Hepatopancreas			血清 Hemolymph		
	MDA /(nmol/mg prot)	AKP /(King U/g prot)	ACP /(King U/g prot)	MDA /(nmol/mL)	AKP /(King U/100 mL)	ACP /(King U/100 mL)
组别 Group						
EF28	2.43±0.52 ^a	58.99±1.01 ^d	6.45±0.90	0.63±0.08 ^a	2.43±0.24 ^{ab}	1.46±0.05 ^c
EF30	4.79±0.57 ^b	53.98±2.50 ^c	7.27±0.84	1.21±0.22 ^{ab}	2.37±0.19 ^{ab}	1.36±0.14 ^{bc}
EF32	5.90±0.25 ^c	56.82±0.79 ^{cd}	6.60±0.62	1.26±0.08 ^{ab}	2.25±0.48 ^{ab}	1.23±0.10 ^b
EF36	5.11±0.46 ^{bc}	56.71±2.13 ^{cd}	6.58±0.19	1.45±0.29 ^b	2.17±0.37 ^{ab}	1.09±0.13 ^a
PF28	2.52±0.55 ^a	46.79±3.86 ^b	6.95±0.67	1.26±0.10 ^{ab}	3.08±0.15 ^c	1.51±0.14 ^c
PF30	2.54±0.79 ^a	45.80±2.86 ^b	6.81±0.52	1.21±0.22 ^{ab}	2.55±0.22 ^b	1.25±0.11 ^{ab}
PF32	2.58±0.20 ^a	42.05±2.38 ^a	6.41±0.30	1.41±0.16 ^b	2.45±0.49 ^{ab}	1.2±0.18 ^{ab}
PF36	2.99±0.65 ^a	39.68±3.24 ^a	6.94±0.23	1.64±0.84 ^b	2.01±0.26 ^a	1.19±0.09 ^{ab}
主效应 Main effect						
蛋白质水平 Protein level						
28	2.47±0.20 ^a	52.89±2.48 ^b	6.70±0.28	0.94±0.15 ^b	2.75±0.14 ^a	1.48±0.04 ^a
30	3.67±0.56 ^b	45.80±0.94 ^a	7.27±0.28	1.21±0.08 ^a	2.46±0.08 ^b	1.30±0.05 ^b
32	4.24±0.75 ^b	49.43±2.85 ^a	6.50±0.16	1.33±0.06 ^a	2.35±0.16 ^c	1.22±0.05 ^{bc}
36	4.05±0.52 ^b	39.68±1.06 ^a	6.58±0.06	1.55±0.23 ^a	2.09±0.11 ^c	1.14±0.04 ^c
加工工艺 Processing						
膨化饲料 Expanded feed	4.56±0.41 ^a	56.62±0.60 ^a	6.73±0.18	1.14±0.10	2.30±0.08	1.28±0.04
硬颗粒饲料 Pelleted feed	2.66±0.16 ^b	43.58±1.02 ^b	6.78±0.12	1.38±0.12	2.52±0.12	1.29±0.05
双因素方差分析 Two-way ANOVA						
蛋白质水平 Protein level	0.000	0.000	0.870	0.179	0.072	0.926
加工工艺 Processing	0.000	0.008	0.361	0.095	0.004	0.000
交互作用 Interaction effect	0.000	0.013	0.329	0.76	0.131	0.367

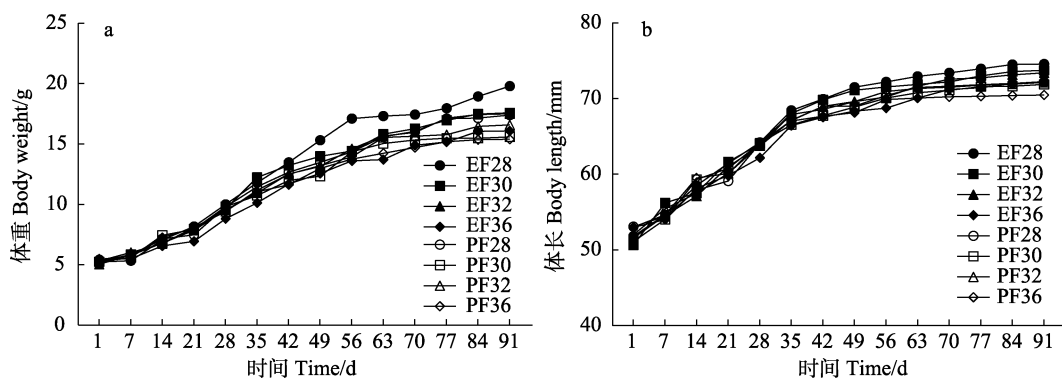


图 1 饲料蛋白质水平和加工工艺克氏原螯虾体重(a)和体长(b)的累计生长曲线

Fig.1 Cumulative growth curves of body weight (a) and body length (b) on different protein level and processing technique of *P. clarkii*

型对体长进行拟合(表 8)。结果显示, Logistic 模型最适宜拟合克氏原螯虾的体长生长过程, 各组的 R^2 依次为 0.993、0.989、0.994、0.987、0.978、0.996、0.983

和 0.982, 拟合曲线见图 2。EF28、EF30、EF32、EF36、PF28、PF30、PF32 和 PF36 组体长在最优模型(Logistic)条件下的拐点时间分别为 6.19、5.51、6.11、6.12、

表7 不同饲料蛋白质水平和加工工艺下克氏原螯虾体重生长曲线模型拟合
 Tab.7 Fitting of body weight growth curve model with different protein level and processing technique of *P.clarkii*

组别 Group	模型 Model	拟合参数 Fitting parameter			R^2	拐点(t, y) Inflection point	
		A	B	k			
EF28	Logistic	20.395	5.079	0.330	0.991	34.47	10.20
	Gompertz	17.367	1.577	0.201	0.992	15.86	6.39
	Von Bertalanffy	23.580	0.520	0.159	0.985	25.15	6.99
	Brody	28.841	0.869	0.011	0.981	—	—
EF30	Logistic	18.553	4.047	0.313	0.992	31.26	9.28
	Gompertz	20.033	1.827	0.199	0.989	21.20	7.37
	Von Bertalanffy	20.977	0.476	0.161	0.987	22.74	6.22
	Brody	24.315	0.829	0.013	0.984	—	—
EF32	Logistic	19.200	4.116	0.283	0.997	35.00	9.60
	Gompertz	21.215	1.848	0.173	0.994	24.85	7.80
	Von Bertalanffy	22.573	0.480	0.136	0.993	27.14	6.69
	Brody	28.152	0.851	0.010	0.990	—	—
EF36	Logistic	17.739	3.646	0.264	0.989	34.30	8.87
	Gompertz	19.838	1.724	0.159	0.986	23.98	7.30
	Von Bertalanffy	21.267	0.456	0.124	0.984	28.28	6.30
	Brody	27.240	0.839	0.008	0.982	—	—
PF28	Logistic	18.840	3.907	0.288	0.993	33.12	9.42
	Gompertz	20.644	1.791	0.179	0.99	22.79	7.59
	Von Bertalanffy	21.832	0.469	0.142	0.988	25.40	6.47
	Brody	26.371	0.835	0.011	0.985	—	—
PF30	Logistic	16.726	3.392	0.308	0.989	27.76	8.36
	Gompertz	17.734	1.653	0.206	0.985	17.08	6.52
	Von Bertalanffy	18.332	0.440	0.171	0.983	19.79	5.43
	Brody	20.152	0.786	0.016	0.980	—	—
PF32	Logistic	17.623	3.605	0.300	0.988	29.92	8.81
	Gompertz	18.978	1.708	0.193	0.984	19.42	6.98
	Von Bertalanffy	19.818	0.451	0.157	0.983	22.09	5.87
	Brody	22.880	0.809	0.013	0.985	—	—
PF36	Logistic	16.372	3.136	0.301	0.996	26.58	8.19
	Gompertz	17.367	1.577	0.201	0.992	15.86	6.39
	Von Bertalanffy	17.949	0.424	0.168	0.990	19.41	5.32
	Brody	19.668	0.770	0.015	0.988	—	—

注：表中 A 为极限生长值， k 为瞬时生长速度，B 为参数， t 为拐点天数(d)， y 为拐点体重(g)。

Note: In the table, A is the limit growth value, k is the instantaneous growth speed, B is the parameter, t is the inflexion days (d), and y is the inflexion weight (g).

5.62、4.85、5.10 和 3.84 d，拐点体长分别为 38.06、37.32、37.46、37.13、37.04、36.39、36.75 和 35.81 mm。

通过幂函数对各组克氏原螯虾体重和体长之间关系进行拟合，EF28、EF30、EF32、EF36、PF28、PF30、PF32 和 PF36 的拟合方程分别为 $W=1.321 \times 10^{-6} \times L^{3.814}$ ($R^2=0.981$)、 $W=4.923 \times 10^{-6} \times L^{3.496}$ ($R^2=0.970$)、

$W=3.186 \times 10^{-6} \times L^{3.601}$ ($R^2=0.982$)、 $W=2.332 \times 10^{-6} \times L^{3.669}$ ($R^2=0.976$)、 $W=1.740 \times 10^{-6} \times L^{3.751}$ ($R^2=0.985$)、 $W=6.272 \times 10^{-6} \times L^{3.438}$ ($R^2=0.979$)、 $W=4.331 \times 10^{-6} \times L^{3.527}$ ($R^2=0.973$)、 $W=2.174 \times 10^{-6} \times L^{3.692}$ ($R^2=0.977$)，拟合度(R^2)均大于 0.97，说明幂函数可很好地对克氏原螯虾体重和体长之间的关系进行拟合。

表 8 不同蛋白质水平和加工工艺下克氏原螯虾体长生长曲线模型拟合
Tab.8 Fitting of body length growth curve model with different protein level and processing technique of *P.clarkii*

项目 Items	模型 Model	拟合参数 Fitting parameter			R^2	拐点(t, y) Inflection point	
		A	B	k		t	y
EF28	Logistic	76.126	0.651	0.269	0.993	6.19	38.06
	Gompertz	76.667	0.520	0.232	0.992	5.65	28.20
	Von Bertalanffy	76.882	0.161	0.219	0.991	5.65	19.22
EF30	Logistic	74.647	0.639	0.291	0.989	5.51	37.32
	Gompertz	75.049	0.513	0.254	0.988	4.92	27.61
	Von Bertalanffy	75.206	0.159	0.242	0.988	5.05	18.80
EF32	Logistic	74.925	0.618	0.258	0.994	6.11	37.46
	Gompertz	75.467	0.499	0.223	0.992	5.64	27.76
	Von Bertalanffy	75.682	0.155	0.211	0.992	5.65	18.92
EF36	Logistic	74.252	0.541	0.223	0.987	6.20	37.13
	Gompertz	74.858	0.447	0.192	0.986	5.92	27.54
	Von Bertalanffy	75.099	0.140	0.182	0.986	5.92	18.77
PF28	Logistic	74.086	0.565	0.253	0.978	5.62	37.04
	Gompertz	74.583	0.462	0.219	0.976	5.23	27.44
	Von Bertalanffy	74.779	0.144	0.208	0.975	5.32	18.69
PF30	Logistic	72.777	0.586	0.293	0.996	4.85	36.39
	Gompertz	73.109	0.478	0.259	0.985	4.29	26.90
	Von Bertalanffy	73.239	0.149	0.247	0.995	4.64	18.31
PF32	Logistic	73.505	0.582	0.281	0.983	5.10	36.75
	Gompertz	73.886	0.474	0.246	0.981	4.59	27.18
	Von Bertalanffy	74.035	0.148	0.235	0.98	4.84	18.51
PF36	Logistic	71.617	0.509	0.294	0.982	3.84	35.81
	Gompertz	71.880	0.424	0.262	0.980	3.37	26.44
	Von Bertalanffy	71.982	0.133	0.252	0.980	4.06	17.99

注: 表中 A 为极限生长值, k 为瞬时生长速度, B 为参数, t 为拐点天数(d), y 为拐点体长(mm)。

Note: In the table, A is the limit growth value, k is the instantaneous growth speed, B is the parameter, t is the inflexion days (d), and y is the inflexion body length (mm).

3 讨论

3.1 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾生长性能的影响

增重率是反映养殖动物生长速度快慢的一项重要指标。在本研究中, 克氏原螯虾在 28% 蛋白质水平的膨化加工工艺饲料组生长性能最佳, 且蛋白质水平和加工工艺对增重率存在交互作用。胡兵(2021)研究发现, 凡纳滨对虾在 41% 和 43% 蛋白质水平的膨化饲料生长最佳, 这与本结果存在一定差异, 表明在不同的甲壳动物之间蛋白质水平和加工工艺对其促生长作用存在差异。李强(2012)认为克氏原螯虾饲料中适宜的蛋白质水质平为 33.44%~37.95%(硬颗粒加工工

艺), 何吉祥等(2009)发现克氏原螯虾对蛋白质的最适需求量为 31.86%(硬颗粒加工工艺)。本研究发现, 添加 28% 蛋白质的膨化加工工艺饲料能够使克氏原螯虾达到最佳生长性能, 表明膨化加工工艺可降低克氏原螯虾饲料蛋白质添加水平, 节约饲料成本。主效应分析结果显示, 随着蛋白质水平的升高, 克氏原螯虾增重率显著下降, 说明过高的蛋白质水平降低了其生长性能。这有可能是由于蛋白质水平过高, 机体的代谢负担增加, 从而抑制其生长发育(Lu *et al*, 2020)。在罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)(董云伟等, 2001)和斑节对虾(*Penaeus monodon*)(张加润等, 2012)中也发现相似的结果。此外, 膨化加工工艺的饲料对克氏原螯虾生长性能的影响优于颗粒加工工艺, 这与草鱼

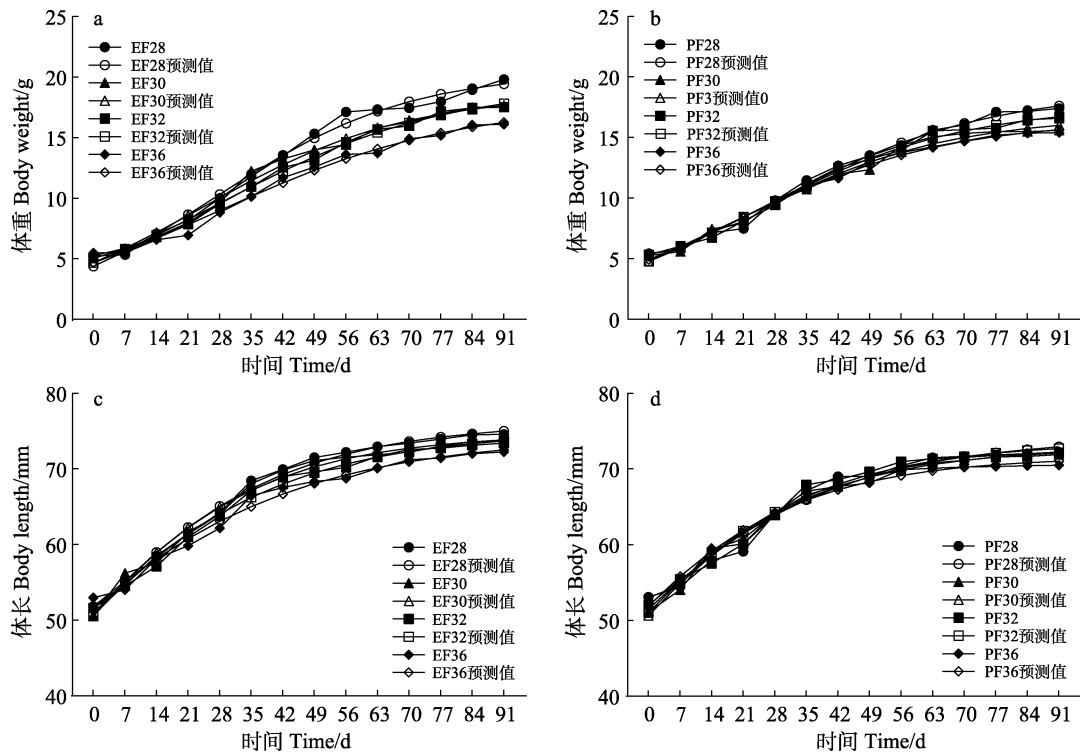


图2 克氏原螯虾实际体重和体长生长曲线与 Logistic 模型拟合生长结果的比较
Fig.2 Comparison between growth curve and Logistic fitting curve models of actual body weight and body length of *P. clarkia*

a: 膨化饲料组体重; b: 硬颗粒饲料组体重; c: 膨化饲料组体长; d: 硬颗粒饲料组体长
a: Body weight of EF groups; b: Body weight of PF groups; c: Body length of EF groups; d: Body length of PF groups

(陈团等, 2018)和凡纳滨对虾(胡兵, 2021)结果相似。相反, 对斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)(徐怀兵, 2017), 膨化饲料相比于硬颗粒饲料并没有显著优势。表明不同蛋白水平和加工工艺对不同水生动物生长的影响存在较大差异, 还需要在实际生产中进一步研究。

消化酶是维持机体正常代谢的活性物质, 消化酶活性直接反映机体对营养物质消化吸收的能力(Mairesse *et al*, 2006; Mohanta *et al*, 2009), 消化酶活性与生长呈正相关(于宁等, 2014)。本研究中, 主效应分析结果表明, 克氏原螯虾肝脏和肠道胰蛋白酶和淀粉酶活性随着饲料蛋白质水平的升高而降低。这可能是蛋白质水平超过其需要量时, 增加了肠道及肝脏消化负担, 导致消化酶活性降低(王建等, 2019)。膨化饲料消化酶活性高于硬颗粒饲料, 可能是由于膨化饲料通过机器高温加工, 饲料中蛋白质结构疏松, 抗营养因子被破坏, 消化酶活性得到提高, 从而促进其生长(林仕梅等, 2001), 这与草鱼(陈团等, 2018)和哲罗鲑(王常安等, 2008)研究相一致。综上可知, 28%蛋白质的膨化饲料可提高克氏原螯虾的消化能力, 进而促进其生长。

3.2 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾生长曲线的影响

目前, 已有许多学者针对水生动物进行生长发育规律研究并寻求与之符合的生长模型。在这些研究中, Logistic 模型能很好地拟合日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)(刘军等, 2003)的生长曲线, Gompertz 模型可以很好地拟合白斑红点鲑(*Salvelinus leucomaenis*)幼鱼(郭媛等, 2015)和罗氏沼虾(Chen *et al*, 2019)的生长曲线, Von Bertalanfy 模型能很好地拟合欧洲沟对虾(*Melicertus kerathurus*)的生长曲线(Conides *et al*, 2006)。以往研究发现, 即便是同一物种, 饲喂不同营养水平饲料时的最优生长模型也存在较大差异(Araneda *et al*, 2013; Chávez-García *et al*, 2020)。本研究利用 Logistic、Gompertz、Von Bertalanffy 和 Brody 4 种生长模型对克氏原螯虾体重和体长进行拟合。结果发现, 这 4 种生长模型均能很好地拟合克氏原螯虾生长模型(除 Brody 方程无法拟合体长外), 且预测值与实际相接近。从拟合度来看, Logistic 模型的拟合度最高, 且 Logistic 模型的预测

生长曲线与实际值更为接近。因此,从拟合曲线的拟合度、生长拐点和预测值等多方面进行比较,认为 Logistic 模型模拟克氏原螯虾体长和体重的生长规律优于另外 3 种模型。

在本实验中,用幂函数对克氏原螯虾体长与体重的关系进行拟合,得到各组拟合度均大于 0.97,表明幂函数能很好拟合体长与体重的关系。在幂函数中, b 值代表生物的生长特点,当 $b=3$ 代表等速生长, $b>3$ 为正异速生长, $b<3$ 为负异速生长(臧娜等, 2021)。本实验中, 各组 b 值均大于 3, 且相差不大, 说明克氏原螯虾是正异速生长, 各组之间的生长特点较为一致。唐建清等(2003)用幂函数对不同性别克氏原螯虾体长与体重的关系进行拟合, 得出其雌虾和雄虾体长与体重关系式分别为 $W=0.0199L^{3.2442}$ 、 $W=0.0155L^{3.4065}$, 为正异速生长, 与本实验结果一致。张年国等(2020)对池塘养殖条件下的虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)体长与体重的关系进行拟合, 拟合方程为 $W=0.016L^{2.879}$, 为负异速生长, 说明不同物种之间生长特点有所不同。本研究不同组之间 b 值出现一定差异, 这可能是蛋白水平和加工工艺所导致。

3.3 蛋白质水平和加工工艺对克氏原螯虾抗氧化和免疫酶活的影响

水生动物的免疫应答和抗氧化能力可以反映其健康状况。研究表明, 适宜范围内的饲料蛋白质水平可以提高生物机体的非特异性免疫机能(张宝龙等, 2021; 王纤纤等, 2020)。T-AOC 是反映机体抗氧化酶和非酶系统总体能力的指标。MDA 是脂质过氧化作用形成的产物, MDA 含量的多少可反映体内脂质氧化的程度, 间接地反映机体细胞受自由基攻击的严重程度, 即细胞受损程度(Li *et al*, 2019)。AKP 和 ACP 是溶酶体的组成部分, 是甲壳类动物重要的先天免疫酶。ACP 和 AKP 活性越高, 说明免疫状态越好(Krogdahl *et al*, 2000)。本研究中, 主效应分析结果显示, 克氏原螯虾肝脏和血清的 ACP 和 AKP 随蛋白水平的上升而下降, 在 28% 蛋白质水平组最高, 而 MDA 含量在 36% 蛋白质组最高。这说明饲料中添加 28% 蛋白质可以使克氏原螯虾具有最优的抗氧化能力和免疫反应能力, 过高的蛋白质水平会对机体产生免疫抑制并削弱抗氧化系统能力。原因可能是过高的蛋白质含量摄入增加了机体代谢负担, 产生代谢紊乱, 从而影响其免疫和抗氧化机能的正常发挥(Buentello *et al*, 2001)。谢国驹等(2007)研究发现, 适宜的蛋白质水平可以提高凡纳冰对虾的 SOD 和 AKP

活性。张宝龙等(2021)得出饲料蛋白质水平在 34.64% 时澳洲淡水龙虾(*Cherax quadricarinatus*) SOD、CAT、T-AOC、GSH-PX 和 GSH-ST 活性显著升高, 均与本实验结果相符。加工工艺的主效应结果显示, 投喂膨化饲料的克氏原螯虾肝脏的 AKP 显著低于颗粒饲料, MDA 含量显著高于颗粒饲料。对于膨化加工工艺来说, 随着蛋白质水平升高到 32%, MDA 显著升高, 这与脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)(范陈伟等, 2020)和中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)(Zhu *et al*, 2021)的结果相一致。原因可能是膨化饲料加工过程中的高温高压会导致一些热敏性物质维生素 E、维生素 C 和类胡萝卜素等被破坏, 这些物质失活后会使得生物体内的抗氧化能力降低(张采等, 2008)。综上所述, 28% 蛋白质水平可提高克氏原螯虾抗氧化能力。虽然膨化饲料会使克氏原螯虾抗氧化能力下降, 但在 28% 蛋白质水平时, 2 种加工工艺之间克氏原螯虾抗氧化能力并无差异。

4 结论

本研究结果表明, 蛋白水平和加工工艺以交互作用的方式影响克氏原螯虾的生长性能和抗氧化能力。在 28% 蛋白质水平时, 克氏原螯虾生长性能、消化酶, 和抗氧化能力最高, 膨化饲料组生长性能优于硬颗粒饲料。生长模型拟合结果表明, 4 种模型(Logistic、Gompertz、Von Bertalanffy 和 Brody)均能很好模拟克氏原螯虾体重和体长的生长曲线, 以 Logistic 模型最优, 且幂函数可以反映体重和体长之间的关系。综上所述, 建议在实际生产中对克氏原螯虾投喂 28% 蛋白质水平的膨化饲料。

参 考 文 献

- AOAC. Animal feed in official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemist, Washington, USA, 2005, 52
- ARANEDA M E, HERNÁNDEZ J M, GASCA-LEYVA E, *et al*. Growth modelling including size heterogeneity: Application to the intensive culture of white shrimp (*P. vannamei*) in freshwater. *Aquacultural Engineering*, 2013, 56: 1–12
- BUENTELLO J A, GATLIN III D M. Effects of elevated dietary arginine on resistance of channel catfish to exposure to *Edwardsiella ictaluri*. *Journal of Aquatic Animal Health*, 2001, 13(3): 194–201
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook. Beijing: China Agriculture Press, 2022 [农业农村部渔业渔

- 政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2022]
- CAI F J, WU Z J, HE N, *et al.* Research progress in invasive ecology of *Procambarus clarkii*. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(1): 124–132 [蔡凤金, 武正军, 何南, 等. 克氏原螯虾的入侵生态学研究进展. 生态学杂志, 2010, 29(1): 124–132]
- CHÁVEZ-GARCÍA R, CONTRERAS-RAMOS A, ORTEGA-CAMARILLO C, *et al.* Morphometric comparison of the growth curve in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) sexually reverted to masculinized and feminized. Latin American Journal of Aquatic Research, 2020, 48(1): 1–6
- CHEN T, HU Y, CHEN Y F, *et al.* Comparison of extruded feed and pelleted feed on the growth and physiological-biochemical indices of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*). Journal of Hydroecology, 2018, 39(2): 82–87 [陈团, 胡毅, 陈云飞, 等. 膨化与非膨化饲料对草鱼生长及部分生理生化指标影响. 水生态学杂志, 2018, 39(2): 82–87]
- CHEN T, LV M, WU Y, *et al.* A new growth curve model for giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* in a prawnplant symbiotic system. Ecological Modelling, 2019, 411: 108801
- CONIDES A, GLAMUZINA B, JUG-DUJAKOVIC J, *et al.* Age, growth, and mortality of the karamote shrimp, *Melicertus kerathurus* (Forskoål, 1775), in the East Ionian Sea (Western Greece). Crustaceana, 2006, 79(1): 33–52
- DONG Y W, NIU C J, DU L. Effects of dietary protein levels on growth and activity of digestive enzymes of giant fresh water prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2001(1): 96–99 [董云伟, 牛翠娟, 杜丽. 饲料蛋白水平对罗氏沼虾 (*Macrobrachium rosenbergii*) 生长和消化酶活性的影响. 北京师范大学学报(自然科学版), 2001(1): 96–99]
- FAN C W, JIANG X D, HE X L, *et al.* Effects of dietary protein levels on growth, physiological indexes and body composition of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*). Guangdong Agricultural Sciences, 2020, 47(10): 140–148 [范陈伟, 姜晓东, 何先林, 等. 饲料蛋白水平对池塘养殖脊尾白虾生长、生理指标和体组成的影响. 广东农业科学, 2020, 47(10): 140–148]
- GAO S, JIN J, LIU H, *et al.* Effects of pelleted and extruded feed of different ingredients particle sizes on feed quality and growth performance of gibel carp (*Carassius gibelio* var. CASV). Aquaculture, 2019, 511: 734236
- GUO Y, HU G, GU W, *et al.* Growth modelling of *Salvelinus fominalis* and *S. leucomaenis* juveniles and their hybrid offspring. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(1): 51–59 [郭媛, 户国, 谷伟, 等. 美洲红点鲑和白斑红点鲑及其杂交子代幼鱼的生长曲线拟合. 中国水产科学, 2015, 22(1): 51–59]
- HE J X, WANG Z G, MEI L, *et al.* Studies on the appropriate protein requirement and energy to protein ratio in feed for *Procambarus clarkii*. Journal of Hydroecology, 2009, 30(3): 77–80 [何吉祥, 王志耕, 梅林, 等. 克氏螯虾饲料中适宜的蛋白质含量和能量蛋白比研究. 水生态学杂志, 2009, 30(3): 77–80]
- HU B. Effect of dietary different protein levels and processing technology on growth performance, body composition and body color of *Litopenaeus vannamei*. China Feed, 2021(11): 78–83, 87 [胡兵. 饲料蛋白质水平与加工工艺对凡纳滨对虾生长性能、体组成及体色的影响. 中国饲料, 2021(11): 78–83, 87]
- HUANG X L, GAO L, WANG P, *et al.* Levels of 24 trace elements and health risk assessment in rice-crayfish (*Procambarus clarkii*) muscle in three provinces of China. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(7): 1257–1268 [黄晓丽, 高磊, 王鹏, 等. 我国三省稻田养殖克氏原螯虾肌肉中 24 种微量元素含量及健康风险评价. 水产学报, 2022, 46(7): 1257–1268]
- KROGDAHL A, BAKKE-MCKELLEP A M, ROED K H, *et al.* Feeding Atlantic salmon *Salmo salar* L. soybean products: Effects on disease resistance (furunculosis), and lysozyme and IgM levels in the intestinal mucosa. Aquaculture Nutrition, 2000, 6(2): 77–84
- LI L L, WU F, YANG Z C, *et al.* Comparison of feeding extruded and pelleted diet on growth performance of loach. Feed Industry, 2020, 41(22): 44–47 [李玲丽, 武帆, 杨振才. 膨化饲料与硬颗粒饲料对泥鳅生长性能的影响. 饲料工业, 2020, 41(22): 44–47]
- LI Q. Dietary protein and phosphorus requirement of red swamp crayfish, *Procambarus clarkii*. Master's Thesis of Huazhong Agricultural University, 2012 [李强. 克氏原螯虾对饲料中蛋白质与磷适宜需求量的研究. 华中农业大学硕士研究生学位论文, 2012]
- LI X, RAHIMNEJAD S, WANG L, *et al.* Substituting fish meal with housefly (*Musca domestica*) maggot meal in diets for bullfrog *Rana (Lithobates) catesbeiana*: Effects on growth, digestive enzymes activity, antioxidant capacity and gut health. Aquaculture, 2019, 499: 295–305
- LIN S M. Application of extrusion and extrusion technology in floating aquatic feed. Cereal and Feed Industry, 2001(3): 15–18 [林仕梅. 挤压膨化工艺在浮性水产饲料中的应用. 粮食与饲料工业, 2001(3): 15–18]
- LING J, HU W, JIANG H. Effects of protein level and composition on growth and meat quality of *Procambarus clarkii*. Feed Research, 2012(8): 61–63, 75 [凌俊, 胡王, 江河. 蛋白水平与构成对克氏原螯虾生长及肉质影响. 饲料研究, 2012(8): 61–63, 75]
- LIU J, GONG S Y, HE X G, *et al.* Studies on the growth character of freshwater shrimp, *Macrobrachium nipponensis*, in Wuhu Lake, Hubei Province. Journal of Lake Science, 2003(2): 177–183 [刘军, 龚世园, 何绪刚, 等. 湖北武湖日本沼虾的生长特性. 湖泊科学, 2003(2): 177–183]

- LU X, PENG D, CHEN X, *et al.* Effects of dietary protein levels on growth, muscle composition, digestive enzymes activities, hemolymph biochemical indices and ovary development of pre-adult red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*). *Aquaculture Reports*, 2020, 18: 100542
- MAIRESSE G, THOMAS M, GARDEUR J N, *et al.* Effects of geographic source, rearing system, and season on the nutritional quality of wild and farmed *Perca fluviatilis*. *Lipids*, 2006, 41(3): 221–229
- MOHANTA K N, MOHANTY S N, JENA J, *et al.* Carbohydrate level in the diet of silver barb, *Puntius gonionotus* (Bleeker) fingerlings: Effect on growth, nutrient utilization and whole body composition. *Aquaculture Research*, 2009, 40(8): 927–937
- TANG J Q, SONG S L, LÜ J, *et al.* A study on growth model and ecological parameters of *Procambarus clarkii*. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 2003(1): 96–100 [唐建清, 宋胜磊, 吕佳, 等. 克氏原螯虾种群生长模型及生态参数的研究. *南京师大学报(自然科学版)*, 2003(1): 96–100]
- TELES A O, COUTO A, ENES P, *et al.* Dietary protein requirements of fish a meta analysis. *Reviews in Aquaculture*, 2020, 12(3): 1445–1477
- VENOU B, ALEXIS M N, FOUNTOULAKI E, *et al.* Performance factors, body composition and digestion characteristics of gilthead sea bream (*Sparus aurata*) fed pelleted or extruded diets. *Aquaculture Nutrition*, 2010, 15(4): 390–401
- WANG C A, XU Q Y, XU H, *et al.* Effects of feeding extruded and pelleted diet on the growth, body composition, digestive enzyme activities and plasma biochemical indexes of *Hucho taimen*. *Chinese Journal of Fisheries*, 2008, 21(2): 47 [王常安, 徐奇友, 许红, 等. 膨化饲料和颗粒饲料对哲罗鲑生长、体成分、消化酶活性和血液生化指标影响的比较. *水产学杂志*, 2008, 21(2): 47]
- WANG J, ZENG B H, XU Z L, *et al.* Effect of dietary protein level on digestive enzyme activity and histological structure in intestine and liver of juvenile *Schizopygopsis younghusbandi*. *South China Fisheries Science*, 2019, 15(6): 112–119 [王建, 曾本和, 徐兆利, 等. 饲料蛋白水平对拉萨裸裂尻幼鱼肠道和肝脏的消化酶活性及组织结构的影响. *南方水产科学*, 2019, 15(6): 112–119]
- WANG X X, ZENG B H, LIU L L, *et al.* Effects of feed protein levels on growth, digestive enzyme activities, non-specific immunity and protein metabolism of *Schizothorax o'connori*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(4): 693–706 [王纤纤, 曾本和, 刘乐乐, 等. 饲料蛋白质水平对异齿裂腹鱼生长、消化酶活性、非特异性免疫及蛋白质代谢反应的影响. *水生生物学报*, 2020, 44(4): 693–706]
- WANG Z R, LI Y A, XU Z C, *et al.* Effect of dietary protein level on growth performance of *Procambarus clarkii*. *Fisheries Science and Technology Information*, 2020, 47(4): 202–205 [王自蕊, 李永安, 许志城, 等. 饲料蛋白质水平对克氏原螯虾生长性能的影响. *水产科技情报*, 2020, 47(4): 202–205]
- WEI X G. Effects of extruded and pelleted feed on growth performance and metabolism of turbot *Scophthalmus maximus*. Master's Thesis of Agricultural University of Hebei, 2015 [魏旭光. 膨化和非膨化饲料对大菱鲆生长代谢的影响. 河北农业大学硕士研究生学位论文, 2015]
- WU D, XIA L Z, HOU G J, *et al.* Effects of three dietary protein levels on the growth and meat quality of *Procambarus clarkii*. *Freshwater Fisheries*, 2007(5): 36–40 [吴东, 夏伦志, 侯冠军, 等. 3种蛋白水平饲料对克氏螯虾生长和虾肉品质的影响. *淡水渔业*, 2007(5): 36–40]
- XIE G S, CAI Y X, XU W N, *et al.* Effects of dietary protein levels on growth, digestive enzyme activities and immune enzyme activities of *Macrobrachium nipponense*. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2007(6): 612–617 [谢国驷, 蔡永祥, 徐维娜, 等. 饲料蛋白水平对日本沼虾生长、消化酶和免疫酶的影响. *江苏农业学报*, 2007(6): 612–617]
- XU H B. Comparitive study on channel catfish and grass carp fed extruded feed and pelleted feed with differing feeding rates. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2017 [徐怀兵. 不同投喂率下膨化饲料、颗粒饲料对斑点叉尾鲷、草鱼作用效果的比较研究. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2017]
- YU N, ZHU Z Y, FENG W H, *et al.* Optimum energy-protein ratios in diets of *Procambrus clarkii*. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(4): 1111–1119 [于宁, 朱站英, 冯文和, 等. 克氏原螯虾饲料最适能量蛋白质比. *动物营养学报*, 2014, 26(4): 1111–1119]
- ZANG N, LIAN J X, CHEN X J, *et al.* The yearly growth and body condition of argentinean shortfin squid, *Illex argentinus*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(4): 906–916 [臧娜, 连晋欣, 陈新军, 等. 阿根廷滑柔鱼年间生长及体征变化. *水生生物学报*, 2021, 45(4): 906–916]
- ZHANG B L, QU M, ZHAO Z X, *et al.* Effects of dietary protein levels on growth, meat quality and immunity of *Cherax quadricarinatus*. *Biological Chemical Engineering*, 2021, 7(2): 40–46 [张宝龙, 曲木, 赵子续, 等. 饲料中蛋白质水平对澳洲淡水龙虾生长、肉质及免疫力的影响. *生物化工*, 2021, 7(2): 40–46]
- ZHANG C. The principle of extrusion and the effect of extrusion on various nutrients in feed. *Contemporary Animal Husbandry*, 2008(9): 34–36 [张采. 挤压膨化原理以及膨化对饲料中各种营养成分的影响. *当代畜牧*, 2008(9): 34–36]
- ZHANG J R, HUANG Z, LIN H Z, *et al.* Effects of dietary protein content on growth performance and digestive enzyme activities of black tiger shrimp, *Penaeus monodon*. *Marine Fisheries*, 2012, 34(4): 429–437 [张加润, 黄忠, 林黑着, 等. 饲料中不同蛋白含量对斑节对虾幼虾生长及消化酶的影响. *海洋渔业*, 2012, 34(4): 429–437]

ZHANG N G, PAN G P, ZHOU W Y, *et al.* The growth characteristics of juvenile *Oratosquilla oratoria* in pond culture. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(32): 147–152 [张年国, 潘桂平, 周文玉. 池塘养殖条件下当年口虾蛄生长特性的研究. 中国农学通报, 2020, 36(32): 147–152]

ZHU S, LONG X, TURCHINI G M, *et al.* Towards defining optimal dietary protein levels for male and female sub-adult Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis* reared in earthen ponds: Performances, nutrient composition and metabolism, antioxidant capacity and immunity. Aquaculture, 2021, 536: 736442

(编辑 冯小花)

Effects of Dietary Protein Levels and Processing Techniques on the Growth Performance, Digestibility, and Antioxidant Capacity of Red Swamp Crayfish (*Procambarus clarkii*)

GUO Sai^{1,2#}, CHEN Xiaoru^{3#}, YUAN Hanwen¹, LUO Kai¹, ZHANG Fuxian¹,
CHEN Yan¹, GAO Weihua^{1①}, TIAN Juan^{2①}

(1. Yangtze University, Hubei Key Laboratory of Waterlogging Disaster and Agricultural Use of Wetland, Jingzhou 434024, China; 2. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China; 3. Tongwei Co., Ltd., Healthy Aquaculture Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract The red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) is the largest freshwater shrimp cultured in China. Protein is a critical factor affecting red swamp crayfish growth performance and feed cost. Too high or too low protein levels in feed negatively affect crustaceans. However, the results of the optimal dietary protein content of red swamp crayfish identified in different studies vary considerably. There are mainly two types of feed for red swamp crayfish on the market: extruded and pellet feed. There have been few reports on the impact of processing technique on red swamp crayfish. Many studies have shown that the growth-promoting effects of extruded and pellet feed on diverse aquatic animals differ considerably. Moreover, there have been few studies on the impact of different protein levels and processing techniques on the growth of aquatic species. This study aimed to investigate the effects of dietary protein levels and processing techniques on the growth performance, digestibility, and antioxidant capacity of red swamp crayfish. The two-factor experiment (4×2) with four different protein levels (28%, 30%, 32%, and 36%) and two processing techniques (expanded feed [EF] and pellet feed [PF]) was conducted for 13 weeks as a feeding trial, aiming to provide theoretical support for optimizing the feed formula and processing technique of red swamp crayfish. The results showed that the protein levels and processing technique significantly influenced the weight gain rate (WGR) and hepatosomatic index of red swamp crayfish ($P<0.05$). The main effects showed that 28% protein could significantly increase the WGR of red swamp crayfish. The WGR and SGR (specific growth rate) of the EF group were significantly higher than those of the PF group ($P<0.05$). There was an interaction between the protein level and processing technique and the trypsin and amylase activities in the hepatopancreas of the red swamp crayfish ($P<0.05$). The activities of trypsin and amylase in the hepatopancreas and intestine were highest, with 28% of dietary protein. Trypsin and amylase activities in the hepatopancreas and trypsin activity in the intestine of red swamp crayfish from the EF group were higher than those from the PF group ($P<0.05$). The impact of dietary protein levels and processing technique on the malondialdehyde (MDA) content and alkaline

① Corresponding author: GAO Weihua, E-mail: gwh105@126.com; TIAN Juan, E-mail: tianjuan@yfi.ac.cn

phosphatase (AKP) activity in the hepatopancreas of the red swamp crayfish was observed ($P<0.05$). The results revealed that AKP activities in the hepatopancreas, and AKP and acid phosphatase activities in the serum were significantly lower at 28% dietary protein ($P<0.05$). The MDA content in the hepatopancreas of the PF group was significantly lower than that in the EF group, respectively ($P<0.05$). The AKP activity in the hepatopancreas of the PF group was significantly lower than that of the EF group ($P<0.05$). Logistic, Gompertz, von Bertalanffy, and Brody models could be suitable for fitting the growth curves of body weight and body length of red swamp crayfish with a R^2 value of no less than 0.97. The Logistic model was the most suitable for fitting the body weight and length, and the power function could reflect the relationship between the body weight and length. Overall, a dietary protein level of 28% and expanded processing could optimize the growth performance and digestibility of red swamp crayfish, and supplementation with a 28% dietary protein level and pellet processing could improve their antioxidative ability.

Key words *Procambarus clarkii*; Protein levels; Processing technique; Growth curve; Digestibility; Antioxidant