

DOI: 10.12264/JFSC2023-0149

不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾生长、抗氧化能力及蛋白质利用的影响

刘秋瑀¹, 王伟隆¹, 黄旭雄^{1,2,3}

1. 上海海洋大学, 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;
2. 中国-东盟海水养殖技术一带一路联合实验室, 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: 为探究不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长性能的影响, 以饲料蛋白质含量为37%, 蛋白能量比为20.23 mg/kJ的饲料作为对照组饲料(C), 在此基础上分别通过提高饲料碳水化合物、脂肪含量调节饲料能量水平, 制作饲料蛋白能量比分别为19.51 mg/kJ(中碳水化合物组, MC)、18.85 mg/kJ(高碳水化合物组, HC)、19.45 mg/kJ(中脂肪组, ML)和18.54 mg/kJ(高脂肪组, HL)的4组实验饲料, 在淡水养殖条件下投喂初始体重为(0.6±0.02) g的凡纳滨对虾幼虾56 d。结果表明, 与对照组相比, 提升饲料脂肪水平能显著提高凡纳滨对虾的生长性能和蛋白质沉积率($P<0.05$), HL组凡纳滨对虾获得最大特定生长率及蛋白质沉积率; 增加饲料碳水化合物水平对凡纳滨对虾的生长性能及蛋白质沉积率无显著影响($P>0.05$)。与对照组相比, ML组、MC组、HC组对虾肌肉粗蛋白含量显著提高($P<0.05$), HL组对虾肌肉粗蛋白含量较对照组有所提高, 但差异不显著($P>0.05$), 对虾肌肉总脂肪含量则随着饲料能量水平提高均显著增高($P>0.05$)。ML组、HL组、MC组、HC组对虾肝胰腺蛋白酶、脂肪酶活性较对照组均显著增高($P<0.05$)。MC组与HC组对虾肝胰腺淀粉酶活性显著高于对照组($P>0.05$), ML组与HL组对虾肝胰腺淀粉酶活性较对照组无显著性差异($P>0.05$)。与对照组相比, 在同一蛋白水平下提高饲料脂肪水平会导致对虾血清谷丙转氨酶(GPT)活性及甘油三酯(TG)含量显著提升($P<0.05$), 同时HL组对虾血清谷草转氨酶(GOT)活性较对照组显著增高($P<0.05$), 提高饲料碳水化合物水平同样会提升对虾血清GPT活性与TG含量($P<0.05$), 但对血清GOT活性无显著性影响($P>0.05$)。相同蛋白水平下, ML组与HL组对虾血清及肝胰腺丙二醛(MDA)含量显著高于对照组($P<0.05$), MC组与HC组对虾血清及肝胰腺MDA含量较对照组显著增高($P<0.05$), HC组与HL组对虾血清碱性磷酸酶(AKP)活性显著高于对照组($P<0.05$); 与对照组相比, 提高饲料脂肪水平能显著提升对虾血清及肝胰腺的总抗氧化能力(T-AOC), 而随着饲料碳水化合物水平提升, 对虾血清T-AOC得到提升, 肝胰腺T-AOC呈现先升后降的趋势($P<0.05$), 过氧化氢酶(CAT)呈现先降后升的趋势($P<0.05$)。结果表明, 本研究条件下饲料脂肪含量为9.59%, 蛋白能量比为18.54 mg/kJ组凡纳滨对虾表现出最佳生长性能, 相比碳水化合物, 脂肪更适于作为凡纳滨对虾的饲料能量物质。

关键词: 凡纳滨对虾; 脂肪; 碳水化合物; 蛋白能量比; 生长性能; 蛋白质利用

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)09-1067-13

在对虾养殖中, 饲料成本占比通常在50%~60%^[1]。饲料中蛋白质、脂肪、碳水化合物是水产动物生长发育必需的营养物质, 也是生物体维持

正常新陈代谢的主要能量来源^[2-3]。优质蛋白源紧缺是当前我国水产养殖中面临的重要困境之一, 当饲料中蛋白质缺乏时, 对虾类生长、繁殖、免

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-08-07.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0203900); 上海市科技兴农项目(2021-02-08-00-12-F00761).

作者简介: 刘秋瑀(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: 429233041@qq.com

通信作者: 黄旭雄, 教授, 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: xxhuang@shou.edu.cn

疫等均会造成不同程度的不利影响^[1,4-5]。当饲料中蛋白质过量时,不仅使得生物体代谢负担加重,影响其正常生长,同时代谢所产生的氨氮等废物排入水中还会造成水体污染^[6]。

合理应用脂肪与碳水化合物可以提高饲料蛋白质的利用率^[1],起到节约饲料蛋白质、节约饲料成本、降低机体氨氮排放的效果。熊益民^[7]研究表明维持饲料蛋白质水平并适当提升脂肪含量能促进高盐度(28~30)养殖条件下凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)的生长。Ruvalcaba-Márquez 等^[8]应用 5 组不同碳水化合物/蛋白质水平以及 4 组不同脂肪/蛋白质水平饲料在海水中养殖凡纳滨对虾,发现摄食碳水化合物含量最高组以及脂肪含量次高组凡纳滨对虾表现出最佳生长性能,同时摄食高脂饲料的凡纳滨对虾抗氧化能力得到提升。以不同蛋白质水平和脂肪水平的饲料饲喂鲤(*Cyprinus carpio*),相同饲料蛋白质水平下,鱼体增重、饲料蛋白质效率随饲料脂肪水平增加显著提高,饲料系数随饲料脂肪水平上升显著下降^[9]。等氮等脂饲料中添加碳水化合物,可使摄食饲料的鲈(*Lateolabrax japonicus*)生长性能表现出先增后降的趋势^[10]。这些结果表明,提高饲料中的非蛋白质能量水平能否有效提高饲料蛋白质的利用率与其能量来源、能量水平及养殖动物种类密切相关。

凡纳滨对虾是世界三大主流养殖经济虾类之一,具有适应力强、肉质鲜美等优点^[11],2021 年我国海、淡水养殖的凡纳滨对虾总产量已达 1977 kt^[12]。虾类对饲料中蛋白质需求量相对较高,同时蛋白质也是虾类饲料中最昂贵的大量营养素^[13]。探究凡纳滨对虾饲料中蛋白质和能量物质的适宜配比对节约饲料蛋白质、节省养殖成本、促进对虾养殖可持续发展具有重要意义。本研究分别以脂肪、碳水化合物提升饲料能值,探究具有相似蛋白能量比的两种能源物质对淡水养殖条件下凡纳滨对虾生长、蛋白质利用等的影响,以期为内陆淡水养殖凡纳滨对虾的精准营养供给提供依据。

1 材料与方 法

1.1 饲料的制备

根据凡纳滨对虾的营养需求,设计蛋白含量为

37%,脂肪含量为 6.6%,蛋白能量比为 20.2 mg/kJ 的对照饲料,在此基础上,分别以脂肪、碳水化合物调节饲料蛋白能量比,设计蛋白能量比分别为 19.5 mg/kJ 和 18.5 mg/kJ 的 4 组试验饲料(表 1)。对照组(C)、中脂肪组(ML)、高脂肪组(HL)、中碳水化合物组(MC)以及高碳水化合物组(HC)饲料的蛋白能量比分别为 20.23 mg/kJ、19.45 mg/kJ、18.54 mg/kJ、19.51 mg/kJ 和 18.85 mg/kJ。

所有原料均破碎后过 80 目筛网,先将干粉原料按照饲料配方配比称重并逐级混合均匀,后加入油脂再次混合均匀,再用适量水混合均匀后用绞肉机制粒,饲料制粒完成后放入烘箱中 90 °C 后熟化 30 min 并于阴凉通风处晾干。成品饲料破碎至合适粒径后放于-20 °C 冰箱保存。

1.2 养殖管理

从对虾育苗场购买 P5 虾苗,于水泥池中暂养 40 d,暂养池初始盐度为 5,通过定期换水 20%将养殖水体逐步淡化至盐度低于 0.5,暂养前一周每日投喂 6 次,后逐步减少至一日投喂 4 次,期间每日吸污。暂养结束后,挑选平均体重为 0.6 g 左右、健康且活力好的幼虾 1000 尾随机放养于悬挂在同一室内水泥池(10 m×5 m×1.5 m)中的 20 个网箱(1 m×1 m×1.2 m)里,每个网箱 50 尾虾,分别投喂 5 种饲料,每组设置 4 个平行。每日分别于 7:00、12:00、17:00、22:00 投喂 4 次,日投喂量根据虾摄食情况控制在虾体重的 5%~8%,并于每次投喂 2 h 后收集食台上残饵,用于养殖周期摄食量统计。养殖实验持续 56 d,养殖期间持续充气,保持水体溶解氧>6 mg/L,水温(30±2) °C,定期换水,保证水中氨氮<0.2 mg/L, pH7.8~8.5。

1.3 样品采集

养殖实验结束前对虾停食 24 h,各网箱对虾捞出后称重并计数,计算对虾的成活率及增重率。各网箱中分别取 12 尾对虾用无菌注射器于腹窦处抽取血淋巴存于 2 mL 离心管中,血淋巴在 4 °C 下经 6000 r/min 离心 20 min,取上清于-80 °C 中保存,用于检测血清生化指标。各网箱中分别取 6 尾虾去壳取肌肉以及肝胰腺置于 10 mL 离心管中,于-80 °C 中保存,分别用于测定肌肉组成及肝胰腺消化酶及抗氧化酶活性。所有取样

表 1 实验饲料组成及营养水平
Tab. 1 Compositions and nutritional contents of the experimental diets

组分 ingredient	组别 treatment group				
	对照组(C)	中脂肪组(ML)	高脂肪组(HL)	中碳水化合物组(MC)	高碳水化合物组(HC)
混合蛋白源 protein mixture ^a	58	58	58	58	58
α-淀粉 α-starch	3	3	3	7	11.9
面粉 flour	20.8	20.4	20.7	21.3	20.9
纤维素 cellulose	9	7.4	5.1	4.5	0
混合油脂 oil mixture ^b	1.9	3.9	5.9	1.9	1.9
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	2	2	2	2	2
虾多矿 ^c mineral mixture ^c	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
虾多维 vitamin mixture ^d	1	1	1	1	1
氯化胆碱 choline chloride	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
鱿鱼膏 squid paste	2	2	2	2	2
氧化钇 Y ₂ O ₃	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
总计 total	100	100	100	100	100
营养组成(干物质%) nutritional composition (dry matter %)					
水分 moisture	6.98	7.40	7.32	7.11	7.22
粗蛋白 crude protein	37.56	37.29	36.96	37.56	37.03
粗脂肪 crude lipid	6.56	8.21	9.59	6.15	6.13
灰分 ash	9.03	9.18	9.38	9.02	9.09
总能(kJ/g) total energy	18.56	19.16	19.94	19.25	19.64
蛋白能量比(mg/kJ) protein energy ratio	20.23	19.45	18.54	19.51	18.85

注: a. 混合蛋白源由鱼粉(32.8%), 肉粉(6.6%), 豆粕(32.8%), 花生粕(13.1%), 玉米蛋白粉(6.6%), 血粉(4.9%), 啤酒酵母(3.2%)组成。
b. 混合油脂由鱼油、豆油、大豆磷脂油混合而成。c. 虾多矿购自维诺众养有限公司, 矿物盐预混料每 kg 中含: Ca (CaCl₂) 10.5 g, K (KCl) 90 g, Mg (MgSO₄·H₂O) 12 g, Fe (FeSO₄) 1.0 g, Cu (CuSO₄) 3.0 g, Zn (ZnSO₄) 10 g, Mn (MnSO₄) 3.8 g, Co (CoCl₂) 0.8 g, Se (Na₂SeO₃) 20 mg。d. 虾多维购自维诺众养有限公司, 维生素预混料每千克中含: VA 8000000 IU, VD 2000000 IU, VE 50 g, VK 10 g, VB₁ 5 g, VB₂ 15 g, VB₆ 8 g, VB₁₂ 0.02 g, 烟酰胺 40 g, D-泛酸钙 25 g, 叶酸 2.5 g, 生物素 0.08 g, 肌醇 100 g。

Note: a. The protein mixture is consisted of fish meal (32.8%), meat meal (6.6%), soybean meal (32.8%), peanut meal (13.1%), corn protein meal (6.6%), blood meal (4.9%), and brewer's yeast (3.2%). b. The oil mixture contains fish oil, soybean oil, and soy lecithin oil. c. Mineral premix purchased from Weinuo Public Raising Co., LTD, contained the following mineral premix per kg: Ca(CaCl₂) 10.5 g, K (KCl) 90 g, Mg (MgSO₄·H₂O) 12 g, Fe (FeSO₄) 1.0 g, Cu (CuSO₄) 3.0 g, Zn (ZnSO₄) 10 g, Mn (MnSO₄) 3.8 g, Co (CoCl₂) 0.8 g, Se (Na₂SeO₃) 20 mg. d. Vitamin premix purchased from Wino Public Nutrition Co., LTD, contained the following per kg of vitamin premix: VA 8000000 IU, VD 2 000000 IU, VE 50 g, VK 10 g, VB₁ 5 g, VB₂ 15 g, VB₆ 8 g, VB₁₂ 0.02 g, nicotinamide 40 g, calcium pantothenate 25 g, folic acid 2.5 g, D-Biotin 0.08 g, inositol 100 g.

动物均按照上海海洋大学动物伦理审查委员会制定的原则进行实验操作。

1.4 样品检测与分析

生长指标计算公式如下:

成活率: $SR=100 \times N_t/N_0$;

增重率: $WGR=100 \times (W_t - W_0)/W_0$;

特定生长率: $SGR=100 \times (\ln W_t - \ln W_0)/t$;

饲料系数: $FCR=$ 摄食饲料干物质质量/(终末体重-初始体重);

蛋白质效率: $PER=100 \times$ (终末总重-初始总

重)/(总投饵量×饲料蛋白质含量);

蛋白质沉积率: $PR=100 \times$ 体重蛋白增加量/蛋白质摄入量;

式中, N_t (尾)和 N_0 (尾)分别为实验末期和初期虾的存活数; W_t (g)、 W_0 (g)分别为实验末期和初期的平均体重; t (d)为实验周期。

饲料及肌肉常规成分分析: 采用凯氏定氮法测定饲料及肌肉中粗蛋白含量(GB/T 6432-2018); 采用氯仿-甲醇法测定肌肉中总脂肪含量(GB/T 6433-2006); 饲料中粗脂肪含量采用索氏抽提法

测定(GB/T 6433-2006); 灰分采用马弗炉灼烧法测定(GB/T 6438-2007); 水分采用烘干恒重法测定(GB/T 6435-2014)。

血清及肝胰腺生化指标测定: 肝胰腺用生理盐水按 1 : 9 (*W* : *V*) 匀浆, 并将匀浆液置于 12000 r/min, 4 °C 下离心 10 min, 取上清液用于测定。肝胰腺蛋白酶测定参考 Cupp-Enyard^[14]的方法, 肝胰腺脂肪酶、淀粉酶、T-AOC、MDA、CAT 按照南京建成试剂盒说明书测定。血清 T-AOC、MDA、AKP、GPT、GOT、TG 按照南京建成试剂盒说明书测定。

1.5 数据处理与统计

实验结果均采用平均数±标准误($\bar{x} \pm SE$)的方式表示, 各数据使用 SPSS 23.0 分析软件中的单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 氏多重比较法进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 则为差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾生长性能的影响

在对照饲料基础上分别以脂肪或碳水化合物提升饲料能量, 对凡纳滨对虾养殖存活率无显著影响($P > 0.05$)(表 2)。与对照组 C 相比, 以脂肪为能量源提升饲料能值的 ML 与 HL 组凡纳滨对虾

增重率及特定生长率显著提升($P < 0.05$), HL 组表现出最大增重率及特定生长率; 以碳水化合物为能量源提升饲料能值的 MC 与 HC 组凡纳滨对虾生长性能与对照组相比无显著变化($P > 0.05$)。ML 与 HL 组较对照组 C 饲料系数显著降低($P < 0.05$), 而 MC 与 HC 组饲料系数与对照组 C 相比无显著差异($P > 0.05$)。随着饲料脂肪水平的提升, 凡纳滨对虾的饲料蛋白质效率及蛋白质沉积率显著提高($P < 0.05$), 以 HL 组蛋白质效率及蛋白质沉积率最高。提升饲料碳水化合物水平, 对虾的饲料蛋白质效率与蛋白质沉积率较对照组无显著差异($P > 0.05$)。结果表明, 在相似饲料蛋白能量比下, ML 组较 MC 组、HL 组较 HC 组均表现出更高的生长性能及蛋白质沉积率($P < 0.05$)。

2.2 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾肝胰腺消化酶活性的影响

与对照组相比, 以脂肪或碳水化合物为能量源提升饲料能值, 对虾肝胰腺中蛋白酶与脂肪酶活性显著提升($P < 0.05$); 以碳水化合物为能量源提升饲料能值, 还能显著提升对虾肝胰腺淀粉酶活性($P < 0.05$); ML 组对虾表现出最高肝胰腺蛋白酶活性, HL 组对虾肝胰腺脂肪酶活性最高(表 3)。在相似饲料蛋白能量比下, ML 组较 MC 组、HL 组较 HC 组均具有更高的蛋白酶与脂肪酶活性, 更低的淀粉酶活性($P < 0.05$)。

表 2 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary energy sources and levels on growth performance of *Litopenaeus vannamei*

$n=4$; $\bar{x} \pm SE$

生长指标 parameter	组别 treatment group				
	C	ML	HL	MC	HC
存活率/% SR	98.50±1.91	98.50±1.91	98.00±2.83	96.00±3.65	94.50±5.00
末虾重/g FBW	11.28±0.54 ^c	12.24±0.42 ^b	13.84±0.06 ^a	11.10±0.41 ^c	11.35±0.24 ^c
增重率/% WGR	1 779.38±89.98 ^c	1 939.23±70.67 ^b	2 206.17±11.35 ^a	1 750.80±67.80 ^c	1 792.68±40.65 ^c
特定生长率/% SGR	5.33±0.09 ^c	5.48±0.06 ^b	5.71±0.01 ^a	5.30±0.06 ^c	5.35±0.04 ^c
饲料系数 FCR	1.51±0.08 ^a	1.39±0.05 ^b	1.22±0.01 ^c	1.54±0.06 ^a	1.50±0.05 ^a
蛋白沉积率/% PR	29.79±0.80 ^c	33.41±0.65 ^b	37.41±0.11 ^a	30.44±0.71 ^c	31.19±0.41 ^c
蛋白质效率/% PER	1.76±0.03 ^c	1.93±0.03 ^b	2.18±0.03 ^a	1.74±0.03 ^c	1.79±0.03 ^c

注: 同一行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。C: 对照组; ML: 中脂肪组; HL: 高脂肪组; MC: 中碳水化合物组; HC: 高碳水化合物组。

Note: Different lowercase letters in the same line mean significant differences ($P < 0.05$). SR: survival rate; FBW: final body weight; WGR: weight gain rate; SGR: specific growth rate; FCR: feed conversion ratio; PDR: protein deposition rate; PER: protein efficiency ratio; C: control group; ML: medium lipid group; HL: high lipid group; MC: medium carbohydrate group; HC: high carbohydrate group.

表 3 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾肝胰腺消化酶活的影响

Tab. 3 Effects of dietary energy sources and levels on digestive enzyme activities in hepatopancreas of *Litopenaeus vannamei*

$n=4; \bar{x} \pm SE$

生长指标 parameter	组别 treatment group				
	C	ML	HL	MC	HC
蛋白酶/(U/mg prot) protease	2.34±0.05 ^c	3.50±0.08 ^a	3.38±0.09 ^a	2.62±0.10 ^b	3.28±0.04 ^a
淀粉酶/(U/mg prot) amylase	5.57±0.16 ^b	5.63±0.17 ^b	5.61±0.16 ^b	6.70±0.17 ^a	6.87±0.19 ^a
脂肪酶/(U/g prot) lipase	0.78±0.09 ^c	1.95±0.15 ^a	2.18±0.17 ^a	1.42±0.14 ^b	1.36±0.09 ^b

注: 同一行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), C: 对照组; ML: 中脂肪组; HL: 高脂肪组; MC: 中碳水化合物组; HC: 高碳水化合物组。

Note: Different lowercase letters in the same line mean significant differences ($P<0.05$). C: control group; ML: medium lipid group; HL: high lipid group; MC: medium carbohydrate group; HC: high carbohydrate group.

2.3 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾肌肉常规营养组成的影响

与对照组相比, 以脂肪为能量源提升饲料能值可显著提升凡纳滨对虾肌肉粗蛋白及总脂肪含量($P<0.05$); 以碳水化合物为能量源提升饲料能值也可显著提升凡纳滨对虾肌肉总脂肪及粗蛋白质含量($P<0.05$)(表 4)。在相似饲料蛋白能量比下, ML 组较 MC 组, HL 组较 HC 组对虾肌肉粗蛋白含量无显著性差异($P>0.05$), ML 组较 MC 组对虾肌肉总脂肪含量更低($P<0.05$)。

2.4 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾血清生化指标的影响

与对照组相比, 以脂肪或碳水化合物为能量源提升饲料能值, 对虾血清中 GPT 活性及 TG 含量均显著提升($P<0.05$)(表 5)。在脂肪添加组中, HL 组血清 GOT 活性显著高于对照组($P<0.05$); 在碳水化合物添加组中, MC 组与 HC 组血清 GOT 活性与对照组无显著差异($P>0.05$)。在相似饲料蛋白能量比下, ML 组较 MC 组, HL 组较 HC 组对虾血清中 TG 含量更高($P<0.05$)。

表 4 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾肌肉营养成分的影响(干物质)

Tab. 4 Effects of dietary energy sources and levels on muscular composition of *Litopenaeus vannamei* (dry matter)

$n=4; \bar{x} \pm SE$

肌肉营养成分 parameters	组别 treatment group				
	C	ML	HL	MC	HC
水分 moisture	77.39±0.41	77.68±0.14	75.84±1.03	77.68±0.95	77.77±0.08
粗蛋白 crude protein	84.65±0.45 ^b	87.02±0.51 ^a	85.92±0.23 ^{ab}	87.62±0.68 ^a	87.50±0.31 ^a
总脂肪 total lipid	3.58±0.08 ^c	4.43±0.06 ^b	5.51±0.18 ^a	5.66±0.03 ^a	5.70±0.13 ^a
灰分 ash	6.14±0.09	6.31±0.06	6.21±0.10	6.36±0.02	6.33±0.13

注: 同一行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$). C: 对照组; ML: 中脂肪组; HL: 高脂肪组; MC: 中碳水化合物组; HC: 高碳水化合物组。

Note: Different lowercase letters in the same line mean significant differences ($P<0.05$). C: control group; ML: medium lipid group; HL: high lipid group; MC: medium carbohydrate group; HC: high carbohydrate group.

表 5 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾血清生化指标的影响

Tab. 5 Effects of dietary energy sources and levels on serum biochemical parameters of *Litopenaeus vannamei*

$n=4; \bar{x} \pm SE$

血清生化指标 serum parameters	组别 treatment group				
	C	ML	HL	MC	HC
谷丙转氨酶(U/L) GPT	80.07±1.00 ^b	86.98±0.97 ^a	84.98±0.93 ^a	86.49±1.77 ^a	86.16±2.11 ^a
谷草转氨酶(U/L) GOT	40.56±0.99 ^b	42.71±0.92 ^b	46.50±0.81 ^a	41.81±0.89 ^b	42.20±0.99 ^b
甘油三酯(mmol/L) TG	0.30±0.01 ^c	0.60±0.02 ^c	0.89±0.01 ^a	0.55±0.01 ^d	0.70±0.02 ^b

注: 同一行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$). C: 对照组; ML: 中脂肪组; HL: 高脂肪组; MC: 中碳水化合物组; HC: 高碳水化合物组。

Note: Different lowercase letters in the same line mean significant differences ($P<0.05$). C: control group; ML: medium lipid group; HL: high lipid group; MC: medium carbohydrate group; HC: high carbohydrate group.

2.5 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾血清及肝胰腺抗氧化能力的影响

与对照组相比,以脂肪或碳水化合物为能量源提升饲料能值,对虾血清中的 T-AOC 水平及 MDA 含量均显著提升($P<0.05$),且随着饲料能值提升而逐渐增大(表 6)。AKP 活性在 HL 组与 HC 组中显著增高($P<0.05$)。相似饲料蛋白能量比下,相比摄食脂肪,对虾摄食碳水化合物时血清中 T-AOC 水平更高($P<0.05$);与 HC 组相比,HL 组对虾血清中 MDA 含量及 AKP 活性更高($P<0.05$)。

与对照组相比,以脂肪为能量源提升饲料能值,凡纳滨对虾肝胰腺 T-AOC 水平、CAT 活性及 MDA 含量均随饲料脂肪含量的增加显著提高($P<0.05$);以碳水化合物为能量源提升饲料能值,凡纳滨对虾肝胰腺 T-AOC 水平呈现先升后降的变化($P<0.05$),CAT 活性呈现先降后升的变化($P<0.05$),MDA 含量则随饲料碳水化合物含量的增加持续增加($P<0.05$)。在相似饲料蛋白能量比下,相比碳水化合物,以脂肪为能量源时对虾肝胰腺具有更高 T-AOC 水平、MDA 含量以及 CAT 活性(表 6)。

表 6 不同饲料能量源及其水平对凡纳滨对虾血清及肝胰腺抗氧化、非特异性免疫指标的影响

Tab. 6 Effects of dietary energy sources and levels on serum, hepatopancreatic antioxidant and non-specific immune parameters of *Litopenaeus vannamei*

$n=4$; $\bar{x} \pm SE$

生长指标 parameter	组别 treatment group				
	C	ML	HL	MC	HC
血清 serum					
总抗氧化能力/($\mu\text{mol}/\text{mL}$) T-AOC	0.61 \pm 0.03 ^d	1.05 \pm 0.09 ^c	1.84 \pm 0.05 ^b	2.06 \pm 0.03 ^a	2.13 \pm 0.25 ^a
丙二醛/(mmol/mL) MDA	3.52 \pm 0.09 ^c	4.35 \pm 0.09 ^d	6.94 \pm 0.16 ^a	4.91 \pm 0.09 ^c	5.65 \pm 0.09 ^b
碱性磷酸酶/(U/dL) AKP	15.50 \pm 0.37 ^c	16.12 \pm 0.26 ^{cb}	22.58 \pm 1.06 ^a	15.10 \pm 0.47 ^c	17.54 \pm 0.24 ^b
肝胰腺 hepatopancreas					
总抗氧化能力/($\mu\text{mol}/\text{g prot}$) T-AOC	302.34 \pm 1.37 ^c	332.02 \pm 2.24 ^b	382.19 \pm 10.25 ^a	324.37 \pm 2.57 ^b	257.35 \pm 2.13 ^d
丙二醛/($\text{nmol}/\text{mg prot}$) MDA	2.58 \pm 0.06 ^d	3.47 \pm 0.10 ^b	3.89 \pm 0.08 ^a	2.89 \pm 0.03 ^c	3.24 \pm 0.12 ^b
过氧化氢酶/($\text{U}/\text{mg prot}$) CAT	2.34 \pm 0.06 ^c	3.45 \pm 0.08 ^b	5.16 \pm 0.08 ^a	2.06 \pm 0.05 ^d	2.44 \pm 0.08 ^c

注:同一行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。C: 对照组; ML: 中脂肪组; HL: 高脂肪组; MC: 中碳水化合物组; HC: 高碳水化合物组。

Note: Different lowercase letters in the same line mean significant differences ($P<0.05$). C: control group; ML: medium lipid group; HL: high lipid group; MC: medium carbohydrate group; HC: high carbohydrate group.

3 讨论

3.1 不同饲料能源及其水平对凡纳滨对虾生长性能的影响

研究表明,饲料蛋白能量比会显著影响虾类生长。当饲料蛋白质水平为 35%时,减小饲料蛋白能量比可提高罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)的生长性能^[15]。Hamidoghli 等^[16]认为在饲料蛋白质水平相同的情况下,适当提升饲料能量水平可显著提高凡纳滨对虾的生长性能。在本研究中,通过提高饲料脂肪水平降低饲料蛋白能量比,显著提高了凡纳滨对虾的生长性能以及对饲料蛋白的利用效率($P<0.05$),而通过提高碳水化合物水

平降低饲料蛋白能量比时,并未取得与脂肪添加组相似的促生长效果。表明凡纳滨对虾在有效利用脂肪、碳水化合物上存在重要差异。相比碳水化合物,饲料脂肪更适合作为凡纳滨对虾的供能物质,并提高对虾对摄入蛋白质的利用率,使其获得更好的生长性能。类似现象在其他水产动物中已有报道。在相同蛋白水平下,日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)生长性能随饲料脂肪水平的增加而提高^[17]。适量提高饲料脂肪水平可提升克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)的特定增长率^[18]。当饲料中豆油添加量为 1%~3%时草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)生长性能得到显著提高^[19]。用 4%、8%、12%、16%、18% 5 个脂肪水平等氮

饲料饲喂杂交鲟, 16%脂肪组杂交鲟生长性能显著优于其他脂肪水平组^[20]。由此可见, 以脂肪提高饲料能值在一定程度上对水产动物具有促生长作用, 且不同物种所需的最适脂肪添加量并不相同。在低盐度下, 对虾需要消耗更多能量调节渗透压以适应低盐环境。Zhu 等^[21]研究发现, 当水体盐度为 30 时, 同一饲料蛋白质水平下 60 g/kg 脂肪水平组凡纳滨对虾生长优于 80 g/kg、100 g/kg 脂肪水平组, 当水体盐度为 2 时, 在 38%、41% 饲料蛋白质水平下 80 g/kg 脂肪水平组对虾生长优于 60 g/kg、100 g/kg 脂肪水平组。与其他在高盐度海水条件下养殖凡纳滨对虾的报道相比, 本研究中凡纳滨对虾所需饲料脂肪水平更高。当对虾饲料中脂肪含量过高时, 会对虾类生长造成不利影响^[7]。Zhang 等^[22]研究发现, 当饲料脂肪水平为 10%~12% 时凡纳滨对虾生长及免疫能力并未受到不良影响。本研究中随着饲料脂肪水平的增加, 凡纳滨对虾获得了更好的生长性能以及更高的蛋白质沉积率, 这表明本研究所设计的最大脂肪梯度符合凡纳滨对虾对饲料脂肪的需求。

碳水化合物作为一种廉价能量物质, 在饲料中适量添加同样能起到节约饲料蛋白质、促进动物生长的作用。以 17%、21% 和 25% 3 个碳水化合物水平的等氮等脂饲料养殖黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*) 幼鱼, 鱼体生长性能表现出随饲料碳水化合物水平增高而先增后降的趋势^[23]。以饲料碳水化合物水平为 20%、27%、34%、41%、48% (对应蛋白水平为 48%、41%、34%、27%、20%) 5 个组等脂饲料饲喂奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus* ♀ × *Oreochromis aureus* ♂), 鱼体生长性能在 41% 碳水化合物组中表现最佳, 且生长性能随饲料碳水化合物水平增高而先增后降^[24]。与脂肪相似, 碳水化合物同样也能起到为水产动物供能以调节渗透压的作用。然而相较于鱼类, 虾类对于碳水化合物的利用能力可能较低。Rosas 等^[25]发现当饲料中碳水化合物含量达到 21% 时, 南美蓝对虾(*Litopenaeus stylirostris*) α 淀粉酶活性达到饱和, 其认为虾类利用饲料碳水化合物获取代谢能的能力有限。在凡纳滨对虾中也有类似报道^[26-27]。

本研究以 α 淀粉提高饲料能值, 凡纳滨对虾的生长及蛋白质沉积并未取得与脂肪添加组相同的效果。

3.2 不同饲料能源及其水平对虾肝胰腺消化酶活性与体组成的影响

肝胰腺是虾类代谢营养物质的重要器官, 肝胰腺消化酶活性能够直接反映其对营养物质消化吸收的能力。在本研究中, 凡纳滨对虾肝胰腺消化酶活性受到饲料蛋白能量比影响, 且与饲料营养组成密切相关。凡纳滨对虾的肝胰腺脂肪酶活性随饲料脂肪水平升高显著提高($P < 0.05$), 这与 Hamidoghli 等^[16]的研究结果相似, 对虾通过提升自身脂肪酶活性, 以提高对摄入脂肪的消化能力。同样, 饲料中提高碳水化合物水平, 也能提高对虾肝胰腺淀粉酶活性($P < 0.05$), 但淀粉酶活性在 MC 和 HC 组间无显著差异($P > 0.05$), 表明对虾可通过提高淀粉酶活性以适应高碳水化合物饲料, 但持续提高饲料中的碳水化合物并不能进一步提高淀粉酶活性, 这可能与对虾淀粉酶活性已经达到饱和有关^[25]。与提高饲料中脂肪水平不同, 饲料碳水化合物水平提高同时使得对虾肝胰腺脂肪酶活性显著增高($P < 0.05$)。这可能是由于虾类摄食高碳水化合物饲料后, 饲料中多余的碳水化合物可转化为糖原或脂肪储存于肝胰腺中^[28], 从而导致肝胰腺中脂肪酶水平较高。在动物体内多余的糖也可以脂肪形式存于机体中^[23], 这促使对虾肌肉中脂肪含量提升。适量提高斜带石斑鱼(*Epinephelus coioides*) 饲料中的碳水化合物含量能够有效提高其肠道中的蛋白酶活性^[29]。提高饲料脂肪水平可诱导日本沼虾肝胰腺蛋白酶活性显著提高^[30]。低盐度下以高碳水化合物饲料投喂凡纳滨对虾使得虾体粗蛋白含量显著增高^[31]。提高饲料脂肪水平能显著提高日本沼虾的肌肉粗蛋白含量^[32]。上述报道与本研究中凡纳滨对虾肌肉粗蛋白含量及肝胰腺蛋白酶活性的变化相似, 这可能是由于在高能饲料的刺激下, 机体做出反馈进一步提高蛋白酶分泌, 加强对饲料蛋白质的消化, 促使更多蛋白质在机体中积累, 在拟穴青蟹(*Scylla paramamosain*)^[33], 鲈^[10]等水生动物中也有类似报道。

3.3 不同饲料能源及其水平对凡纳滨对虾血清生化、抗氧化及非特异性免疫指标的影响

GPT 及 GOT 是血液中的重要转氨酶,其在血液中的含量常用于反映机体肝脏健康状况^[34]。克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)血清 GPT、GOT 活性均随饲料脂肪含量上升而显著增高^[35];随着饲料糖水平提高,淡水石斑鱼(*Cichlasoma managuense*)血液中 GPT、GOT 活性均表现出上升趋势^[36],上述报道与本研究结果相似,这表明增加饲料中非蛋白能量物质在一定程度上可能会增加凡纳滨对虾肝胰腺的负担。TG 是脂质代谢的重要产物,因甲壳类动物具有开放式血循环系统,包括脂类在内的诸多营养物质运输均在血淋巴中进行^[16],因此血清中 TG 含量与机体脂肪积累密切相关。Xu 等^[37]发现随饲料脂肪水平升高,凡纳滨对虾体内脂肪含量与血清 TG 含量增高。本研究还发现,提升饲料中非蛋白能量物质水平均能增加对虾体内脂肪积累与血清 TG 含量。

MDA 为脂质过氧化产物,是评价生物体肝脏损伤的指标。生物体内的抗氧化系统具有去除脂质过氧化产物的能力,包括 SOD、CAT 等抗氧化酶。CAT 具有将 H_2O_2 催化分解为水,从而阻断羟自由基反应,使细胞免受 H_2O_2 毒性的作用^[38]。T-AOC 代表生物体总抗氧化能力,反映生物体内酶活性与大小分子的总和,能够间接反映生物体清除自由基的能力。本研究中,随着饲料能量水平的提升,凡纳滨对虾血清及肝胰腺中 MDA 含量显著升高($P<0.05$)。这可能是由于凡纳滨对虾摄入高脂肪、高碳水化合物饲料后,机体内脂肪积累增加,进一步导致了机体内脂质过氧化水平增高,在丝尾鳢(*Hemibagrus wychioides*)^[39]与青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)^[40]的研究中也有相似报道。水生动物诸如美洲红点鲑(*Salvelinus fontinalis*)^[41]、浅色黄姑鱼(*Nibea coibor*)^[42]、凡纳滨对虾^[22]等均能通过提高自身 SOD、CAT、GPx 等抗氧化酶活性,以应对由于饲料中能量水平增加而引起的脂质过氧化。本研究中,以脂肪提高饲料能值时,对虾肝胰腺以及血清抗氧化能力得到提高,表明饲料脂肪水平升高会诱导机体通过提高自身抗氧化能力,以应对体内脂质过氧化水

平的增高。而以碳水化合物提高饲料能值时,对虾肝胰腺 T-AOC 随饲料碳水化合物水平升高表现出先升高后降低。对虾体内的抗氧化系统由 CAT、SOD、GPx 等多个酶构成^[43],虽然高碳水化合物组肝胰腺 CAT 活性升高,但 T-AOC 已经显著降低($P<0.05$),这可能是由于饲料中碳水化合物水平过高导致对虾肝胰腺中某些抗氧化酶或抗氧化因子降低所造成,因此,进一步提高饲料碳水化合物水平不能有效提高凡纳滨对虾的生长性能。AKP 作为水生生物的一种重要代谢调控酶,当组织细胞受到损伤时其会大量涌入血液中^[44],在本研究中,高能组饲料血清 AKP 均显著提高($P<0.05$),说明当饲料中非蛋白能量物质过高时,对虾体肝胰腺会造成一定负担,使细胞组织中的 AKP 向对虾血液中释放。

盐度对虾类的抗氧化及血清生化指标同样会造成一定影响。在一定盐度范围内,斑节对虾(*Penaeus monodon*)的非特异性免疫指标及抗氧化指标随养殖水体盐度升高而升高^[45],与盐度 6 水体中养殖的凡纳滨对虾相比,盐度 18 水体中养殖的凡纳滨对虾肝胰腺中的 *PO*、*CAT* 基因表达水平,血细胞中 *PO*、*SOD* 基因表达水平增高^[46]。适当提升盐度可以激活日本沼虾体内的抗氧化系统,从而提高虾体抗氧化能力^[47]。当饲料脂肪水平为 9%、12% 时,3 盐度水体中养殖的凡纳滨对虾血清 GOT、GPT 活性较 25 盐度水体中养殖的凡纳滨对虾降低^[37]。本研究采用淡水养殖,与海水养殖相比,本研究中凡纳滨对虾相关抗氧化及血清生化指标均会因盐度降低而有所降低。

4 结论

脂肪较碳水化合物更适于作为凡纳滨对虾饲料的能源物质,显著提高了凡纳滨对虾的生长及蛋白沉积;适当地提高饲料中的能量水平,可增加对虾肌肉蛋白质和脂肪水平,提升虾肉品质,但饲料中能量水平的提高会对凡纳滨对虾造成一定的代谢负担并导致体内脂质过氧化水平升高。本研究条件下饲料脂肪含量为 9.59%,蛋白能量比为 18.54 mg/kJ 组凡纳滨对虾表现出最佳生长性能。

参考文献:

- [1] Hu Y. Optimum feed formula selection and some feed additive application on juvenile *Litopenaeus vannamei*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. [胡毅. 凡纳滨对虾饲料配方优化及几种饲料添加剂的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.]
- [2] Zhang X, Wang Z F. Progress in research on nutritional requirements and feed additives for Japanese eel (*Anguilla japonica*): A review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2023, 38(3): 543-552. [张翔, 王祖峰. 日本鳗鲡营养需求及饲料添加剂研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(3): 543-552.]
- [3] Wang Z X, Liang M Q, Wei Y L, et al. Research progress on broodstock nutrition of crustaceans[J]. Feed Industry, 2022, 43(16): 4-10. [王照欣, 梁萌青, 卫育良, 等. 甲壳动物亲体营养研究进展[J]. 饲料工业, 2022, 43(16): 4-10.]
- [4] Zheng C (O/Q). Study on the requirements of the dietary protein and lipid in two sizes of Pacific white shrimp[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012. [郑昌区. 两种规格凡纳滨对虾对蛋白质和脂肪需要量的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.]
- [5] Du L, Niu C J. Effects of dietary protein level on bioenergetics of the giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (de Man, 1879) (Decapoda, Natantia)[J]. Crustaceana, 2002, 75(7): 875-889.
- [6] Sun Y P, Qiu J M, Wang G X, et al. Effects of tryptophan supplemented in low protein diets on apparent digestibility coefficients, digestive enzyme activity and amino acids composition of *Litopenaeus vannamei*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2016, 40(4): 720-727. [孙育平, 裘金木, 王国霞, 等. 低蛋白质饲料中添加色氨酸对凡纳滨对虾饲料表观消化率、消化酶活和全虾氨基酸组成的影响[J]. 水生生物学报, 2016, 40(4): 720-727.]
- [7] Xiong Y M. Studies on the optimum P/E and effects on additional dietary tyrosine and proline on growth of *Penaeus vannamei*[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2013. [熊益民. 凡纳滨对虾适宜蛋能比研究及添加酪氨酸、脯氨酸对其的影响[D]. 广州: 中山大学, 2013.]
- [8] Ruvalcaba-Márquez J C, Álvarez-Ruiz P, Zenteno-Savín T, et al. Performance, immune response, and oxidative stress parameters of *Litopenaeus vannamei* fed diets containing varying carbohydrate/protein, lipid/protein, and energy/protein ratios[J]. Aquaculture Reports, 2021, 21: 100771.
- [9] Wu D Y, Zhu C Z, Yang J, et al. Effects of dietary protein and lipid levels on growth and feed utilization of common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. China Feed, 2011(16): 31-35. [伍代勇, 朱传忠, 杨健, 等. 饲料中不同蛋白质和脂肪水平对鲤鱼生长和饲料利用的影响[J]. 中国饲料, 2011(16): 31-35.]
- [10] Dou B S, Liang M Q, Zheng K K, et al. Effects of dietary carbohydrate level on growth, physiology and body composition of Japanese seabass *Lateolabrax japonicus*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(1): 46-54. [窦兵帅, 梁萌青, 郑珂珂, 等. 饲料中碳水化合物水平对鲈鱼生长、生理状态参数及体组成的影响[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(1): 46-54.]
- [11] An W Q, Li W W, Tan B P, et al. Effects of dietary calcium and phosphorus levels on growth, body composition, tissue calcium and phosphorus deposition and serum biochemical indices in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Fisheries Science, 2020, 39(1): 1-11. [安文强, 黎文伟, 谭北平, 等. 凡纳滨对虾对饲料中钙、磷的营养需求[J]. 水产科学, 2020, 39(1): 1-11.]
- [12] Wang D, Wu F X. China Fishery Statistics Yearbook. 2022[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022. [王丹, 吴反修, 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. 2022[M]. 北京: 中国农业出版社 2022.]
- [13] Gao C C, Hao T, Yang J R, et al. Nutritional requirements analysis of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(1): 1-5, 10. [郜晨晨, 郝彤, 杨佳睿, 等. 凡纳滨对虾营养需求研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(1): 1-5, 10.]
- [14] Cupp-Enyard C. Sigma's non-specific protease activity assay-casein as a substrate[J]. Journal of Visualized Experiments: JoVE, 2008(19): 899.
- [15] Goda A M A S. Effect of dietary protein and lipid levels and protein-energy ratio on growth indices, feed utilization and body composition of freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (de Man 1879) post larvae[J]. Aquaculture Research, 2008, 39(8): 891-901.
- [16] Hamidoghli A, Yun H, Shahkar E, et al. Optimum dietary protein-to-energy ratio for juvenile whiteleg shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in a biofloc system[J]. Aquaculture Research, 2018, 49(5): 1875-1886.
- [17] Zhang N N. The study of optimal protein source, lipid source at a proper dietary protein/energy ratio in juvenile *Macrobrachium nipponense*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016. [张南南. 基于适宜饲料蛋白和能量水平下的日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)适宜蛋白源和脂肪源研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016.]
- [18] Mo C Q, Huang K, Cao X S, et al. Effects of dietary lipid levels on growth performance and muscle quality of juvenile *Procambarus clarkii*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023,

- 44(2): 214-223. [莫翠琴, 黄凯, 曹鑫盛, 等. 饲料脂肪水平对克氏原螯虾幼虾生长性能及肌肉品质的影响[J]. 渔业科学进展, 2023, 44(2): 214-223.]
- [19] Zhang L, Zhang W D, Zhao D F, et al. Effects of dietary lipid level on growth and hepatopancreas morphology of juvenile grass carp *ctenopharyngodon idella*[J]. China Feed, 2023(1): 98-104. [张玲, 张卫东, 赵德福, 等. 饲料脂肪水平对草鱼幼鱼生长和肝胰脏组织形态的影响[J]. 中国饲料, 2023(1): 98-104.]
- [20] Qi C Q. Effect of feed fat level on growth of juvenile hybrid sturgeon[J]. Jiangxi Fishery Science and Technology, 2022(6): 23-25. [齐长青. 饲料脂肪水平对杂交鲟幼鱼生长的影响[J]. 江西水产科技, 2022(6): 23-25.]
- [21] Zhu X Z, Liu Y J, Tian L X, et al. Effects of dietary protein and lipid levels on growth and energy productive value of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at different salinities[J]. Aquaculture Nutrition, 2009, 16(4): 392-399.
- [22] Zhang S P, Li J F, Wu X C, et al. Effects of different dietary lipid level on the growth, survival and immune-relating genes expression in Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2013, 34(5): 1131-1138.
- [23] Xiao J X, Li G J, Hua Y, et al. Effects of dietary carbohydrate levels on growth performance and serum biochemical indexes of juvenile *Sparus macrocephalus*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(10): 125-129. [肖金星, 李广经, 华颖, 等. 饲料碳水化合物水平对黑鲟幼鱼生长性能和血清生化指标的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(10): 125-129.]
- [24] Wu F, Wen H, Jiang M, et al. Effects of different dietary carbohydrate levels on growth performance, body composition and serum biochemical indices of juvenile hybrid Tilapia (*Oreochromis niloticus* ♀ × *O. aureus* ♂)[J]. Journal of South China Agricultural University, 2011, 32(4): 91-95. [吴凡, 文华, 蒋明, 等. 饲料碳水化合物水平对奥尼罗非鱼幼鱼生长、体成分和血清生化指标的影响[J]. 华南农业大学学报, 2011, 32(4): 91-95.]
- [25] Rosas C, Cuzon G, Gaxiola G, et al. Influence of dietary carbohydrate on the metabolism of juvenile *Litopenaeus stylirostris*[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2000, 249(2): 181-198.
- [26] Guo R, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of dietary cornstarch levels on growth performance, digestibility and microscopic structure in the white shrimp, *Litopenaeus vannamei* reared in brackish water[J]. Aquaculture Nutrition, 2006, 12(1): 83-88.
- [27] Rosas C, Cuzon G, Taboada G, et al. Effect of dietary protein and energy levels on growth, oxygen consumption, haemolymph and digestive gland carbohydrates, nitrogen excretion and osmotic pressure of *Litopenaeus vannamei* (Boone) and *L. setiferus* (Linne) juveniles (Crustacea, Decapoda; Penae)[J]. Aquaculture Research, 2001, 32(7): 531-547.
- [28] Wang X D. Carbohydrate metabolism and regulation in *Litopenaeus vannamei* at low salinity[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017. [王晓丹. 凡纳滨对虾适应低盐度胁迫的糖营养和糖代谢研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.]
- [29] Liu H, Yang J J, Dong X H, et al. Effects of dietary carbohydrate level on growth performance, body composition, plasma biochemical parameters and intestinal and liver enzyme activities of orange-spotted grouper (*Epinephelus coioides*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(1): 357-371. [刘浩, 杨俊江, 董晓慧, 等. 饲料碳水化合物水平对斜带石斑鱼生长性能、体成分、血浆生化指标及肠道和肝脏酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(1): 357-371.]
- [30] Si L G, Zou L C, Shentu J K, et al. Effect on different dietary lipid and protein level on growth performance, body composition and digestive enzymes activities of freshwater shrimp *Macrobrachium nipponensis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(2): 400-408. [斯烈钢, 邹李昶, 申屠基康, 等. 饲料添加不同脂肪及蛋白质水平对日本沼虾(*Macrobrachium nipponensis*)生长性能、体成分及消化酶活力的影响[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(2): 400-408.]
- [31] Wang X D, Li E C, Wang S F, et al. Protein-sparing effect of carbohydrate in the diet of white shrimp *Litopenaeus vannamei* at low salinity[J]. Aquaculture Nutrition, 2015, 21(6): 904-912.
- [32] Etefaghdoost M, Noveirian H, Falahatkar B. Growth performance, feed efficiency and whole-body chemical composition of the oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense*, fed different dietary protein and lipid levels[J]. Iranian Journal of Fisheries Sciences, 2018, 17: 585-602.
- [33] Dong L F, Tong T, Zhang Q, et al. Effects of dietary carbohydrate level on growth performance, body composition and digestive enzyme activities of juvenile crab, *Scylla paramamosain*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(2): 252-258. [董兰芳, 童童, 张琴, 等. 饲料碳水化合物水平对拟穴青蟹稚蟹生长、体成分和消化酶活性的影响[J]. 水生生物学报, 2019, 43(2): 252-258.]
- [34] Luo D Q. Effects of fermented Chinese herbal medicine on performance, nutrient digestion and blood indexes of beef cattle[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022. [罗德强. 发酵复方中药对肉牛生产性能、营养物质

- 消化及血液指标的响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.]
- [35] Peng D, Chen X R, Wen H, et al. Effects of dietary lipid levels on growth performance, muscle composition, reproductive performance and hemolymph biochemical indices of *Procambarus clarkii* broodstock[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(10): 2175-2185. [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.]
- [36] Sun X L, Wang Q K, Cheng Z Y, et al. Effects of different sugar levels in feed on growth, digestive enzymes and blood biochemical indexes in *Cichlasoma managuense*[J]. Feed Research, 2017(23): 39-45. [孙学亮, 王庆奎, 程镇燕, 等. 饲料中不同糖水平对淡水石斑鱼生长、消化酶及血液生化指标的影响[J]. 饲料研究, 2017(23): 39-45.]
- [37] Xu C, Li E, Liu Y, et al. Effect of dietary lipid level on growth, lipid metabolism and health status of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* at two salinities[J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(1): 204-214.
- [38] Liu K, Huang K, Qin X, et al. Effects of dietary carbohydrate levels on immunity and serum biochemical indices under low temperature stress in *Tilapia (Oreochromis niloticus)*[J]. Fisheries Science, 2014, 33(2): 87-91. [刘康, 黄凯, 覃希, 等. 饲料糖水平对吉富罗非鱼幼鱼免疫指标及低温下血液生化指标的影响[J]. 水产科学, 2014, 33(2): 87-91.]
- [39] Lin B, Chen L, Zhang J, et al. Effects of dietary protein and lipid levels on growth performance, feed utilization, plasma biochemical parameters, and antioxidant capacity of asian eed-tailed catfish (*Hemibagrus wyckioides*)[J]. Israeli Journal of Aquaculture-Bamidgeh, 2019, 71: 1644.
- [40] Wu C L, Ye J Y, Gao J E, et al. The effects of dietary carbohydrate on the growth, antioxidant capacities, innate immune responses and pathogen resistance of juvenile Black carp *Mylopharyngodon piceus*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 49: 132-142.
- [41] Zhang Q J, Chen Y S, Xu W B, et al. Effects of dietary carbohydrate level on growth performance, innate immunity, antioxidant ability and hypoxia resistant of brook trout *Salvelinus fontinalis*[J]. Aquaculture Nutrition, 2021, 27(1): 297-311.
- [42] Huang Y S, Wen X B, Li S K, et al. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition, fatty acid profiles and antioxidant parameters of juvenile Chu's croaker *Nibea coibor*[J]. Aquaculture International, 2016, 24(5): 1229-1245.
- [43] Fan B. Comparative study on the different content of protein in feed of the growth and immune effect of different local populations of *Macrobrachium nipponensis*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018. [范斌. 饲料中不同蛋白含量对日本沼虾不同地方种群生长、免疫性能影响的比较研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.]
- [44] Xie Y X, Zhang M Z, Li M, et al. Effects of starvation and refeeding on growth performance, blood health, antioxidant capacity and immune response of juvenile yellow catfish under ammonia stress[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(8): 3073-3081. [谢雨欣, 张木子, 黎明, 等. 氨氮胁迫下饥饿和再投喂对黄颡鱼幼鱼生长性能、血液健康、抗氧化能力及免疫应答的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(8): 3073-3081.]
- [45] Gu Y. Effects of salinity on osmotic pressure, growth, nonspecific immunity and respiratory metabolism of *Penaeus monodon*[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. [顾宇. 盐度对斑节对虾渗透压、生长与免疫及呼吸代谢的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.]
- [46] Zhan W H, Zhou S H, Yuan C Y, et al. Effect of salinity on lymphocytes phagocytosis and expression of immune-related factor genes in Pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(1): 18-22. [展文豪, 周书洪, 袁春营, 等. 盐度对凡纳滨对虾血细胞吞噬与免疫相关因子基因表达的影响[J]. 水产学杂志, 2021, 34(1): 18-22.]
- [47] Huang Y H. Effects of salinity on growth and physiology of oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2021. [黄有辉. 盐度对日本沼虾生长生理的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.]

Effects of dietary energy sources and levels on growth, antioxidant capacity and protein utilization of *Litopenaeus vannamei*

LIU Qiuyu¹, WANG Weilong¹, HUANG Xuxiong^{1,2,3}

1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrition (CREEFN) of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. China-ASEAN Belt and Road Joint Laboratory on Mariculture Technology, Shanghai 201306, China;
3. Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Proteins, lipids, and carbohydrates are essential nutrients and main energy sources for the growth and development of organisms. When dietary protein is excessive, it is metabolized as energy, which not only increases the organism's metabolic burden, affecting normal growth, but also causes water pollution through the discharge of waste products such as ammonia nitrogen. Reasonable use of lipids and carbohydrates can improve the utilization of dietary protein, save breeding costs, and promote the growth of aquatic animals. To explore the effects of different energy sources and dietary levels on the growth performance of *Litopenaeus vannamei*, we prepared a control diet (C) with 37% protein content and a protein-energy ratio of 20.23 mg/kJ. Four experimental diets were formulated to investigate the effects of different energy sources and levels on *L. vannamei* growth. These diets had protein-energy ratios of 19.51 mg/kJ (medium carbohydrate group, MC), 18.85 mg/kJ (high carbohydrate group, HC), 19.45 mg/kJ (medium lipid group, ML), and 18.54 mg/kJ (high lipid group, HL). These ratios were prepared by increasing the dietary energy content through carbohydrates or lipids. Juvenile shrimps, initially weighing (0.6±0.02) g, were fed these diets for 56 days under freshwater conditions. Before the end of the experiment, the shrimps underwent a 24-hours fast, followed by weighing and counting after removal from the net cage to calculate the survival rate, weight gain rate, specific growth rate, feed coefficient, protein efficiency ratio, and protein deposition rate. The muscle and hepatopancreas were collected from six shrimps in each cage to assess muscle composition, digestive enzymes (protease, lipase, and amylase), and antioxidant enzyme activities (T-AOC, MDA, and CAT). Serum samples were collected from 12 shrimps from each cage to determine serum biochemical indexes (GOT, GPT, and TG), serum antioxidants, and non-specific immune indexes (T-AOC, MDA, and AKP). The results evidenced that, compared with the control group, increasing dietary lipid levels significantly increased the growth performance and protein deposition rate of shrimp ($P<0.05$). The HL group exhibited the highest specific growth rate and protein deposition rate. Conversely, increasing dietary carbohydrate levels did not significantly affect shrimp growth and protein deposition rate ($P>0.05$). These results indicate that *L. vannamei* has a strong ability to utilize dietary lipids, and increasing dietary lipid levels can significantly improve both growth performance and the utilization of dietary protein in *L. vannamei*. Conversely, increasing dietary carbohydrate levels has limited effects on the growth and dietary protein utilization of *L. vannamei*. In terms of muscle composition, compared with the control group, the ML, MC, and HC groups evidenced significant increases in crude protein content ($P<0.05$), while the HL group displayed a slight increase in crude protein content compared with the control group, although this difference was not significant ($P>0.05$). The total lipid content in shrimp muscle increased significantly with the rise in dietary energy levels in all groups ($P>0.05$). The ML, HL, MC, and HC groups all demonstrated significantly higher protease and lipase activities in the hepatopancreas compared with the control group ($P<0.05$). The hepatopancreas amylase activity of shrimp in MC and HC groups was significantly higher than that in the control group ($P>0.05$), but no significant difference was observed in the activities of amylase in the hepatopancreas of ML and HL groups compared with the control group

($P>0.05$). Increasing dietary lipid levels led to a significant rise in the activity of serum GPT and TG contents ($P<0.05$). In addition, HL group demonstrated significantly higher serum GOT activity than the control group ($P<0.05$). Increasing dietary carbohydrate levels also significantly increased serum GPT and TG ($P<0.05$), but had no significant effect on serum GOT ($P>0.05$). At the same protein level, ML and HL groups exhibited significantly higher serum and hepatopancreatic MDA levels than the control group ($P<0.05$), while MC and HC groups also had significantly higher serum and hepatopancreatic MDA levels than the control group ($P<0.05$). In HC and HL groups, AKP activity was significantly higher than that in the control group ($P<0.05$). Compared with the control group, increasing dietary lipid levels significantly increased the serum and hepatopancreatic T-AOC in shrimp. Increasing dietary carbohydrate levels also elevated the T-AOC in the serum but evidenced a trend of initially increasing and then decreasing in the hepatopancreas ($P<0.05$). CAT activity exhibited a trend of initially decreasing followed by an increase compared with the control group ($P<0.05$). These results suggest that shrimp fed a diet with a lipid content of 9.59% and a protein-energy ratio of 18.54 mg/kJ exhibited the best growth performance under the experimental conditions. Lipids, as a dietary energy source, are more suitable for *L. vannamei* than carbohydrates.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; lipids; carbohydrates; protein-energy ratio; growth performance; protein utilization

Corresponding author: HUANG Xuxiong. E-mail: xxhuang@shou.edu.cn