

DOI: 10.12264/JFSC2024-0332

饲料硫胺素和蛋白质水平对凡纳滨对虾生长和蛋白质利用的影响

陆健超¹, 李冬艳¹, 何志程¹, 王伟隆^{1, 2, 3}, 易敢峰^{1, 4}, 黄旭雄^{1, 2, 3}

1. 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室(上海海洋大学), 上海 201306;
2. 上海海洋大学, 中国-东盟海水养殖技术一带一路联合实验室(上海), 上海 201306;
3. 水产科学国家级实验教学示范中心(上海海洋大学), 上海 201306;
4. 大北农集团, 北京 100008

摘要: 为探究不同饲料蛋白质和硫胺素组合下凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长性能和饲料蛋白质利用情况, 本研究设计了两个蛋白质水平(37%和 42%)和 4 个硫胺素水平(0 mg/kg, 20 mg/kg, 40 mg/kg, 80 mg/kg)的 8 组等能饲料, 在淡水养殖条件下饲喂初始体重为(0.44±0.05) g 的幼虾 8 周。结果显示, 饲料蛋白质和硫胺素水平影响凡纳滨对虾的终末体重(FBW)、增重率(WGR)、全虾粗蛋白质含量。高蛋白质饲料组对虾生长性能显著优于低蛋白质饲料组($P<0.05$)。摄食相同蛋白质水平饲料组对虾的 FBW、WGR、全虾粗蛋白质含量随着饲料中硫胺素水平的增加呈现先升高后下降的变化。与未添加硫胺素组相比, 添加 40 mg/kg 硫胺素组的对虾表现出显著高的 FBW、WGR、全虾粗蛋白质含量($P<0.05$); 添加硫胺素显著提高了对虾特定生长率(SGR)、蛋白质效率(PER)、蛋白沉积率(PDR)、肝胰腺淀粉酶、蛋白酶活性及饲料蛋白质和脂肪的表观消化率($P<0.05$)。对虾摄食低蛋白质饲料时其 PER、PDR、淀粉酶、饲料蛋白质和脂肪的表观消化率显著高于摄食高蛋白质饲料($P<0.05$)。随着饲料硫胺素水平的提高, 对虾排氨率呈现先下降后上升的趋势。回归分析表明在饲料蛋白质水平为 42%的条件下, 凡纳滨对虾生长最适硫胺素添加量为 45.14 mg/kg; 在饲料蛋白水平为 37%的条件下, 凡纳滨对虾生长最适硫胺素添加量为 49.53 mg/kg。综上所述, 适宜的蛋白质和硫胺素水平通过提高对虾消化酶活性和表观消化率、降低氮排泄来提升对虾生长性能, 且对虾最佳生长所需的硫胺素水平随饲料蛋白水平升高而降低。

关键词: 凡纳滨对虾; 硫胺素; 蛋白质; 生长性能; 蛋白质利用率; 氮排泄

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)04-0490-12

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)是重要的对虾养殖品种之一^[1]。由于虾类代谢排氨的生理特点, 饲料蛋白质在对虾体内的保留率相对较低。因此, 优化饲料中营养素水平不仅关系到对虾的生长性能, 还能提升饲料蛋白质利用效率、有效降低养殖水体的污染。目前, 国内外对于凡纳滨对虾的营养需求与饲料研究已有较多报道, 但总体上特定养殖环境及生长阶段的营养素水平和对虾蛋白质利用率的相互关系研究仍不够精准

和深入。

硫胺素, 又称维生素 B₁, 是水产动物生长发育所必需的水溶性维生素。通常以辅酶的形式参与体内营养物质的代谢过程^[2]。在蛋白质代谢中, 硫胺素能够与氨基酸的羧基部分发生结合, 形成羧基转移复合物, 促进氨基酸的转化、分解和合成, 对于蛋白质合成和维持机体正常的氨基酸代谢至关重要^[3]。在糖代谢过程中, 硫胺素为丙酮酸脱氢酶的辅酶, 催化丙酮酸氧化脱羧生成乙酰辅

收稿日期: 2024-11-26; 修订日期: 2024-12-21.

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: 陆健超(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养与饲料. E-mail: 2432636201@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

酶 A, 继续参与柠檬酸循环, 从而促进了糖酵解过程并为机体提供能量^[3]。此外, 硫胺素还在戊糖磷酸途径中作为转酮醇酶的辅酶, 并与核酸合成及脂肪酸的合成有关^[4-5]。

已有研究表明凡纳滨对虾幼虾硫胺素的需求量在 23.70~44.66 mg/kg 之间^[6-8]。对卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)幼鱼^[9]、中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)^[10]、凡纳滨对虾^[6]的研究表明添加硫胺素促进水产动物对饲料蛋白质的利用及体蛋白质含量的增加, 但有关饲料硫胺素和蛋白质水平互作对蛋白质利用率的影响报道较少。本实验采用双因素设计, 探究在两种饲料蛋白质水平下梯度添加硫胺素对凡纳滨对虾生长性能、体组成、消化酶活、生理生化指标及排氨率的相互作用, 以期获取适合凡纳滨对虾生长的最佳饲料蛋白质和硫胺素水平组合, 为特定养殖环境凡纳滨对虾精准营养需求及健康养殖提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

基于双因素实验设计, 配制 8 组含有两个蛋白质水平(42%和 37%)和 4 个硫胺素添加量(0 mg/kg, 20 mg/kg, 40 mg/kg, 80 mg/kg)梯度的等能饲料^[11-12]。通过调节蛋白源配比保证氨基酸比例一致, 实验基础饲料配方见表 1。所有饲料原料经超微粉碎机破碎后过 80 目筛网, 按照饲料配方称重并采用四分法逐级扩散混匀后, 用制粒机将其制成粒径为 1.5 mm 的颗粒饲料。制粒完成后放入 90 ℃烘箱中熟化 30 min, 风干后(水分降至 10%)于-20 ℃密封储存。饲料中的硫胺素含量采用液相色谱法(GB/T 14700 2018)测定。蛋白质水平为 42%时, 硫胺素含量分别为: 3.88、20.18、42.62、84.60 mg/kg; 蛋白质水平为 37%时, 硫胺素含量分别为: 3.67、19.76、43.63 和 83.36 mg/kg。

1.2 实验动物及养殖管理

挑选规格整齐、健康的凡纳滨对虾幼虾(0.44±0.05)g 1200 尾, 随机分配到同一水泥池(长×宽×高为 5.0 m×11.0 m×1.2 m)中的 24 个网箱(长×

表 1 基础饲料组成和营养水平
Tab. 1 Ingredients and nutrition levels of the basal diets %

配料 ingredient	组别 group	
	42%蛋白质 (42CP)	37%蛋白质 (37CP)
鱼粉 fish meal	10	8.8
玉米蛋白粉 corn protein powder	10	8.8
肉粉 meat meal	8	7.04
豆粕 soybean meal	31	27.28
花生粕 peanut meal	8	7.04
血粉 blood meal	3	2.64
鱿鱼膏 squid paste	2	2
α-淀粉 α-starch	2	10
面粉 wheat meal	13.8	13.8
鱼油 fish oil	3	3.3
大豆磷脂 soybean lecithin	1	1
沸石粉 zeolite powder	2.8	2.1
多维(不含 VB ₁) vitamin premix ^a	1	1
多矿 mineral premix ^b	1.5	1.5
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	2	2.5
氯化胆碱 choline chloride	0.3	0.3
维生素 C vitamin C	0.3	0.3
三氧化二钇 Y ₂ O ₃	0.1	0.1
蛋氨酸 methionine	0.2	0.3
赖氨酸 lysine	0	0.2
合计 total	100	100
营养水平 nutrient levels		
粗蛋白质 crude protein	41.90	37.18
总脂肪 total lipid	5.97	5.87
灰分 ash	8.21	7.86
总能/(kJ/g) gross energy	16.52	16.48
硫胺素/(mg/kg) thiamine ^c	3.88	3.67

注: a. 每千克预混料含有(不含维生素 B₁): 维生素 A 600000 IU, 维生素 D₃ 8000000 IU, 生育酚 10 g, 维生素 K 3.5 g, 核黄素 3 g, 烟酰胺 11 g, D-泛酸钙 10 g, 吡哆醇 10 g, 氰钴胺素 0.02 g, 生物素 0.2 g, 叶酸 1 g, 肌醇 180 g; b. 每千克矿物盐预混料含有: Ca 10.5 g, Fe 1.0 g, Co 0.8 g, Se 0.02 g, Mg 12 g, Mn 3.8 g, K 90 g, Cu 3.0 g, Zn 10 g; c. 每千克基础饲料含有硫胺素 3.88 mg (42CP) 和 3.67 mg (37CP)。基础饲料组添加硝酸硫胺素(其纯度 98%), 实验组在基础饲料的基础上添加 0、20、40、80 mg/kg 硝酸硫胺素。
Note: a. Contained the following per kilogram of premix (VB₁ free): VA 600000 IU, VD₃ 8000000 IU, VE 10 g, VK 3.5 g, riboflavin 3 g, nicotinamide 11 g, calcium D-pantothenate 10 g, pyridoxine 10 g, cyanocobalamin 0.02 g, biotin 0.2 g, folic acid 1 g, inositol 180 g; b. Contained the following per kilogram of mineral premix: Ca 10.5 g, Fe 1.0 g, Co 0.8 g, Se 0.02 g, Mg 12 g, Mn 3.8 g, K 90 g, Cu 3.0 g, Zn 10 g. c. Each kilogram of the basic feed contains 3.88 mg of thiamine (42CP) and 3.67 mg of thiamine (37CP). Thiamine nitrate (purity 98%) was added in the basal diet, and 0, 20, 40, 80 mg/kg thiamine nitrate was added to the experimental diet.

宽×高为 1.2 m×1.2 m×0.8 m)中, 每个网箱放养 50 尾。分成 8 组, 每组设 3 个平行。每天投喂 4 次, 日投喂量为对虾体重的 5%~8%, 并根据天气、设施情况及生长状况调整投喂量。养殖 8 周。养殖期间水体盐度小于 0.5, 溶解氧保持 7 mg/L 以上, 水温 27~29 °C, pH 为 7.8~8.5, 每 3 天换水 1 次, 维持水中氨氮浓度小于 0.2 mg/L。

1.3 样品采集与分析

养殖周期结束前两周, 开始收集粪便。每次投喂 1.5 h 后, 通过虹吸法^[13]收集粪便, 并装入 10 mL 离心管中, 放入-20℃冰箱中保存用于表观消化率检测分析。饲养实验结束后, 所有虾饥饿 12 h 后, 将各网箱的对虾捞出统计各个网箱中对虾存活的数量及总重, 以计算对虾的存活率及增重率。各个网箱中随机取蜕皮间期对虾 12 尾, 其中 3 尾用于全虾体成分分析, 剩余 9 尾对虾取对虾肝胰腺组织于-80℃冰箱保存, 用于测定肝胰腺消化酶活性。

饲料、全虾以及粪便的水分、粗蛋白质、粗灰分以及总脂肪含量根据国标法进行测定, 水分含量采用 105 °C 干燥至恒重(GB/T 6435-2014); 粗蛋白质(GB/T 6432-2018)采用全自动凯氏定氮仪(2300-Auto-analyzer, Foss Tecator, Sweden); 粗灰分含量采用 550 °C 灼烧法(GB/T 6438-2007), 总脂肪含量采用 Cejas 等^[14]和 Huang 等^[15]的方法, 用含有 0.01%二丁基羟基甲苯(BHT)的氯仿-甲醇(2:1)提取样品中总脂肪, 粪便中 Y₂O₃ 含量的测定使用电感耦合等离子体质谱联用仪(ICAPQc, SN03019R, ThermoFisher)。

生化指标测定: 肝胰腺用 0.85%的生理盐水低温匀浆, 在 8000 r/min, 4 °C 下离心 10 min, 取上清液用于测定。蛋白酶测定采用福林法(GB/T 23527-2009), 脂肪酶、淀粉酶活性采用试剂盒检测(南京建成生物工程研究所有限公司)。

1.4 计算公式

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

存活率: $SR = N_t / N_0 \times 100\%$

饲料系数: $FCR = W_f / (W_t - W_0)$

特定生长率:

$SGR = [\ln(W_t / N_t) - \ln(W_0 / N_0)] / t \times 100\%$

蛋白质效率:

$PER = (W_t - W_0) / (W_f \times W_p) \times 100\%$

蛋白质沉积率:

$PDR = (W_t \times CP_t - W_0 \times CP_0) / (W_f \times W_p) \times 100\%$ 干物质表观消化率:

$ADCM = [1 - (B_1 / B_2)] \times 100\%$

饲料营养物质表观消化率:

$ADCN = [1 - (A_1 / A_2) \times (B_1 / B_2)] \times 100\%$

式中, W_t 为终末体重量(g); W_0 为初始体重量(g); W_f 为摄入饲料干重(g); t 为实际养殖实验的天数(d); N_t 为实验结束时整个网箱虾的尾数; N_0 为实验开始时整个网箱虾的尾数; W_p 为饲料干物质粗蛋白含量(%); CP_t 为终末对虾干物质粗蛋白含量(%); CP_0 为初始幼虾干物质体蛋白含量(%); A_2 为饲料中营养物质质量分数(%); A_1 为粪便中营养物质质量分数(%); B_1 为饲料中 Y₂O₃ 质量分数(%); B_2 为粪便中 Y₂O₃ 质量分数(%)。

1.5 氨氮排泄实验

称重结束后, 剩下的虾放回到对应的网箱中继续饲养。待稳定 3 d 后, 饥饿 24 h, 分别从网箱中随机取 5 尾虾置于小型周转箱中, 饱食投喂对应组的饲料, 投喂 45 min 后取肠道饱满的对虾 3 尾, 称重后将虾放入对应编号装有 5 L 水的锥形瓶中。取样测定初始水体的氨氮浓度 C_0 。之后每隔 1 h 取 1 次水样测定氨氮浓度 C_n ($n=1, 2, 3, 4, 5, 6$)。每组饲料设 3 个重复, 实验温度(29±1.5) °C, 实验期间持续供氧保证对虾正常生理活动。氨氮检测方法参考《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535-2009)。

排氨率: $R_N = \frac{(C_n - C_0) \times V}{(m \times t)} \times 1000$

式中, R_N 表示单位体质量排氨率[μg/(g·h)]; C_0 表示第一次水样的氨氮浓度(mg/L); C_n 表示饱食 n h 后水样的氨氮浓度(mg/L); V 为实验水体体积(L); m 表示实验虾的体重(g); t 表示实验持续时间(h)。

1.6 数据统计与分析

所有数据均以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示, 各数据使用 SPSS 23.0 软件进行统计分析, 对数

据进行正态性和方差齐性检验后, 各组数据采用双因素方差分析(two-way ANOVA), 当 $P<0.05$ 时, 说明双因素间存在相互作用, 再进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 并采用 Duncan's 检验。

2 结果与分析

2.1 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾生长性能的影响

饲料蛋白质和硫胺素水平影响凡纳滨对虾的终末体重(FBW)和增重率(WGR)($P<0.05$)。采用单因素方差分析进行组间比较发现, 饲料蛋白质含量 42%组的对虾 FBW 和 WGR 显著高于饲料蛋白质含量 37%组($P<0.05$), 且饲料蛋白质含量 42%且硫胺素添加 40 mg/kg 组显著高于其余各组($P<0.05$)。摄食相同蛋白质水平饲料组对虾 FBW

和 WGR 随着饲料硫胺素添加量升高而呈现先上升后下降的趋势, 在饲料硫胺素添加量为 40 mg/kg 组表现出最大的 FBW 和 WGR。饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾特定生长率(SGR)、饲料系数(FCR)、蛋白质效率(PER)和蛋白质沉积率(PDR)有显著影响($P<0.05$), 但两者之间无显著交互作用。摄食相同蛋白质水平饲料组对虾 FCR 随着硫胺素的升高呈现先下降后上升的趋势, 在饲料硫胺素添加量为 40 mg/kg 组表现出最小的 FCR; 而对虾 PER 和 PDR 随硫胺素水平的升高呈现先升高后降低的趋势, 在硫胺素添加量为 40 mg/kg 时达到最高水平且显著高于未添加组($P<0.05$)。摄食饲料蛋白质含量为 37%时, 对虾 PER 和 PDR 显著高于摄食 42%蛋白质饲料($P<0.05$)。

表 2 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾生长性能的影响
Tab. 2 Effect of dietary protein and thiamine levels on the growth performance of *Litopenaeus vannamei*

饲料蛋白质/% dietary protein	硫胺素添加量/ (mg/kg) thiamine supplementation	指标 index							
		初始体重/ g IBW	终末体重/ g FBW	增重率/% WGR	特定生长率/ (%/d) SGR	饲料系数 FCR	蛋白质效率/% PER	蛋白质沉积 率/% PDR	存活率/% SR
42	0	0.44±0.05	17.48±0.18 ^c	3872.40±41.48 ^c	6.57±0.02 ^c	1.60±0.04 ^c	149.52±3.30 ^c	27.68±0.61 ^d	97.33±3.06 ^a
42	20	0.44±0.05	18.60±0.56 ^b	4128.04±128.35 ^b	6.69±0.05 ^b	1.50±0.03 ^d	157.97±3.45 ^{cd}	29.89±0.65 ^c	96.67±2.31 ^{ab}
42	40	0.44±0.05	19.57±0.44 ^a	4348.16±99.73 ^a	6.78±0.04 ^a	1.44±0.04 ^e	166.29±4.33 ^{ab}	31.38±0.82 ^{ab}	95.00±1.41 ^{ab}
42	80	0.44±0.05	18.20±0.17 ^b	4036.17±37.72 ^b	6.65±0.02 ^b	1.54±0.02 ^{cd}	155.14±1.67 ^{de}	29.62±0.32 ^c	96.00±2.00 ^{ab}
37	0	0.44±0.05	16.49±0.14 ^d	3648.48±31.75 ^d	6.47±0.02 ^d	1.74±0.01 ^a	154.79±1.24 ^{de}	28.25±0.23 ^d	92.67±1.15 ^b
37	20	0.44±0.05	16.94±0.34 ^{cd}	3750.19±77.97 ^{cd}	6.52±0.04 ^{cd}	1.66±0.05 ^b	161.39±4.79 ^{bc}	30.38±0.96 ^{bc}	96.67±2.31 ^{ab}
37	40	0.44±0.05	17.44±0.06 ^c	3863.61±14.03 ^c	6.57±0.01 ^c	1.60±0.01 ^c	168.60±1.26 ^a	32.42±0.24 ^a	98.00±2.00 ^a
37	80	0.44±0.05	17.02±0.33 ^{cd}	3768.33±75.38 ^{cd}	6.53±0.03 ^{cd}	1.66±0.04 ^b	162.81±3.73 ^{abc}	30.34±0.7 ^{bc}	95.33±1.15 ^{ab}
双因素方差分析 P 值 P-value of two-way ANOVA									
蛋白质 protein			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.34
硫胺素 thiamine			<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.35
蛋白质×硫胺素 protein×thiamine			0.03	0.03	0.07	0.63	0.52	0.88	0.08

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)。IBW: 初始体重; FBW: 终末体重; WGR: 增重率; SGR: 特定生长率; FCR: 饲料系数; PER: 蛋白质效率; PDR: 蛋白质沉积率; SR: 存活率。

Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$), IBW: initial body weight; FBW: final body weight; WGR: weight gain rate; SGR: specific growth rate; FCR: feed conversion ratio; PER: protein efficiency ratio; PDR: protein deposition rate; SR: survival rate.

2.2 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾全虾常规成分的影响

饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾全虾水分无显著影响, 也不存在交互作用($P>0.05$)。饲

料硫胺素水平及饲料蛋白质和硫胺素的交互作用对凡纳滨对虾粗蛋白质含量有显著影响($P<0.05$)。饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾全虾总脂肪有显著影响($P<0.05$), 但两者不存在交互作用

($P>0.05$)。饲料蛋白质水平对全虾粗灰分有显著影响($P<0.05$)(表 3)。采用单因素方差分析进行组间比较发现, 饲料蛋白质含量 37%且硫胺素添加 40 mg/kg 组全虾粗蛋白含量显著高于其余各组($P<0.05$)。摄食相同硫胺素水平饲料, 饲料蛋白质含量 42%组对虾的总脂显著高于蛋白质含量 37%组($P<0.05$); 摄食相同蛋白质水平饲料, 与未添加组相比, 硫胺素添加组对虾总脂含量显著升高($P<0.05$)。

2.3 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾肝胰腺消化酶活性的影响

饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾肝胰腺淀粉酶活性有显著影响($P<0.05$), 但两者不存在交互作用($P>0.05$)。饲料硫胺素水平对凡纳滨对虾肝胰腺蛋白酶有显著影响($P<0.05$), 但两者不存在交互作用($P>0.05$)。饲料蛋白质和硫胺素水平对肝胰腺脂肪酶无显著影响, 也不存在交互作用($P>0.05$)(表 4)。摄食相同硫胺素水平饲料, 饲料蛋白质含量 42%组对虾肝胰腺淀粉酶活性显著低于饲料蛋白质含量 37%组($P<0.05$); 摄食蛋白质含量 37%饲料时, 硫胺素添加组的对虾淀粉酶活性显著高于硫胺素未添加组($P<0.05$), 且淀粉酶

活性随着硫胺素水平的提高呈上升趋势。摄食相同蛋白质水平饲料, 其蛋白酶活性随着硫胺素水平的提高呈先上升后下降的趋势, 在硫胺素添加量为 40 mg/kg 时达到最高水平。

2.4 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾营养物质表观消化率的影响

饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾干物质、蛋白质和脂肪的表观消化率有显著影响($P<0.05$), 但两者不存在交互作用($P>0.05$)(表 5)。采用单因素方差分析进行组间比较发现, 饲料蛋白质含量为 37%组的对虾营养物质的表观消化率显著高于 42%蛋白组($P<0.05$); 摄食同一蛋白质水平饲料的对虾蛋白质和脂肪表观消化率随着硫胺素水平的提高呈先上升后下降的趋势, 在硫胺素添加量 40 mg/kg 时达到最高水平且显著高于未添加组($P<0.05$)。

2.5 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾排氨率的影响

凡纳滨对虾在摄食后 0~6 h 的排氨率变化如表 6。实验表明, 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾 0~6 h 排氨率均不存在交互作用($P>0.05$), 各组排氨率随时间均呈现下降的趋势。在摄食第

表 3 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾全虾营养成分的影响
Tab. 3 Effect of dietary protein and thiamine levels on nutritional composition of *Litopenaeus vannamei*
n=3; $\bar{x} \pm SD$

饲料蛋白质/% dietary protein	硫胺素添加量/(mg/kg) thiamine supplementation	指标 index			
		水分 moisture	粗蛋白 crude protein	总脂肪 total lipid	粗灰分 crude ash
42	0	74.68±0.73	18.50±0.04 ^d	1.99±0.06 ^c	2.76±0.04 ^{bc}
42	20	74.22±0.56	18.90±0.10 ^b	2.13±0.04 ^b	2.84±0.10 ^{ab}
42	40	74.39±0.77	18.86±0.05 ^b	2.35±0.08 ^a	2.65±0.14 ^c
42	80	74.13±0.97	18.77±0.05 ^{bc}	2.30±0.06 ^a	2.72±0.09 ^{bc}
37	0	75.22±0.73	18.24±0.04 ^c	1.80±0.07 ^d	2.99±0.13 ^a
37	20	74.83±0.27	18.85±0.14 ^b	1.95±0.09 ^c	2.83±0.08 ^{ab}
37	40	74.54±1.02	19.20±0.14 ^a	2.06±0.03 ^{bc}	2.89±0.02 ^{ab}
37	80	74.98±0.80	18.62±0.16 ^{cd}	2.03±0.02 ^{bc}	2.84±0.06 ^{ab}
双因素方差分析 P 值 P-value of two-way ANOVA					
蛋白质 protein		0.11	0.49	<0.01	0.01
硫胺素 thiamine		0.69	<0.01	<0.01	0.19
蛋白质×硫胺素 protein×thiamine		0.88	0.01	0.28	0.09

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$).
Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 4 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾肝胰腺消化酶活的影响

Tab. 4 Effect of dietary protein and thiamine levels on digestive enzyme activities in hepatopancreatic of *Litopenaeus vannamei*

$n=3; \bar{x} \pm SD$

饲料蛋白质/% dietary protein	硫胺素添加量/(mg/kg) thiamine supplementation	指标 index		
		淀粉酶/(U/g prot) amylase	蛋白酶/(U/g prot)protease	脂肪酶/(U/g prot)lipase
42	0	394.17±15.73 ^d	3197.76±79.27 ^c	8.03±1.88
42	20	404.74±14.95 ^d	3281.61±14.98 ^{abc}	8.67±1.42
42	40	462.65±36.03 ^c	3358.16±12.39 ^a	10.19±1.19
42	80	419.7±10.84 ^d	3213.56±44.68 ^{bc}	8.17±1.96
37	0	486.12±9.53 ^{bc}	3206.27±12.39 ^c	7.97±0.72
37	20	517.71±17.24 ^{ab}	3307.13±64.21 ^{ab}	8.58±1.91
37	40	521.21±13.02 ^a	3349.66±36.2 ^a	8.90±1.32
37	80	528.6±3.63 ^a	3318.06±24.78 ^a	7.95±0.78
双因素方差分析 P 值 P-value of two-way ANOVA				
蛋白质 protein		<0.01	0.15	0.58
硫胺素 thiamine		0.03	0.01	0.44
蛋白质×硫胺素 protein ×thiamine		0.15	0.30	0.92

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$).

Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 5 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾营养物质表观消化率的影响

Tab. 5 Effect of dietary protein and thiamine levels on apparent digestibility of nutrients of *Litopenaeus vannamei*

$n=3; \bar{x} \pm SD$

饲料蛋白质/% dietary protein	硫胺素添加量/(mg/kg) thiamine supplementation	指标 index		
		干物质消化率/% dry matter digestibility	蛋白质消化率/% protein digestibility	脂肪消化率/% lipid digestibility
42	0	74.09±1.35 ^c	81.47±0.96 ^e	92.15±0.41 ^d
42	20	75.20±1.22 ^{bc}	82.78±0.85 ^{de}	92.67±0.36 ^{cd}
42	40	76.53±1.23 ^{ab}	83.56±0.86 ^{cd}	93.64±0.33 ^{ab}
42	80	75.56±1.42 ^{bc}	83.39±0.97 ^{cd}	92.71±0.42 ^{cd}
37	0	76.13±0.60 ^{bc}	84.4±0.39 ^{bc}	93.19±0.17 ^{bc}
37	20	77.42±0.66 ^{ab}	85.31±0.43 ^{ab}	93.53±0.19 ^{ab}
37	40	78.50±1.55 ^a	86.02±1.01 ^a	94.05±0.43 ^a
37	80	76.49±1.47 ^{ab}	84.94±0.94 ^{abc}	93.85±0.38 ^a
双因素方差分析 P 值 P-value of two-way ANOVA				
蛋白质 protein		0.01	<0.01	<0.01
硫胺素 thiamine		0.03	0.01	<0.01
蛋白质×硫胺素 protein × thiamine		0.80	0.55	0.31

注: 同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$).

Note: Values in each column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

3 h 后, 饲料硫胺素水平对排氨率有显著影响($P<0.05$)。当摄食第 5 h 后, 饲料蛋白质和硫胺素水平有显著影响($P<0.05$)。摄食同一蛋白质水平饲料, 对虾排氨率随着饲料硫胺素水平的升高呈先降低后上升的趋势; 摄食同一硫胺素水平饲料, 蛋白质含量为 42%组排氨率显著高于蛋白含量为 37%组($P<0.05$)。根据平均排氨率和蛋白组沉积率折线图发现(图 1), 在硫胺素添加量为 40 mg/kg 时, 凡纳滨对虾蛋白沉积率达到最高水平, 而排氨率达到最低水平。

表 6 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾排氨率的影响

Tab. 6 Effect of dietary protein and thiamine levels on ammonia excretion rate of *Litopenaeus vannamei*

$n=3; \bar{x} \pm SD$

饲料蛋白质/% dietary protein	硫胺素添加量/(mg/kg) thiamine supplementation	排氨率/[$\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{h})$] ammonia excretion rate					
		摄食后 1 h 1 h after feeding	摄食 2 h 2 h after feeding	摄食 3 h 3 h after feeding	摄食 4 h 4 h after feeding	摄食 5 h 5 h after feeding	摄食 6 h 6 h after feeding
42	0	53.03 $\pm$ 4.29	47.31 $\pm$ 5.37 ^{abc}	42.97 $\pm$ 3.31 ^a	39.17 $\pm$ 3.23 ^a	37.83 $\pm$ 1.19 ^a	35.80 $\pm$ 0.82 ^a
42	20	49.68 $\pm$ 3.48	39.14 $\pm$ 6.13 ^c	37.09 $\pm$ 1.34 ^b	37.04 $\pm$ 2.24 ^a	33.80 $\pm$ 2.01 ^{abc}	30.47 $\pm$ 1.41 ^{bcd}
42	40	47.39 $\pm$ 7.99	40.10 $\pm$ 3.15 ^{bc}	40.10 $\pm$ 1.89 ^{ab}	35.49 $\pm$ 2.37 ^{ab}	32.65 $\pm$ 2.66 ^{bc}	29.60 $\pm$ 1.61 ^{bcd}
42	80	56.20 $\pm$ 9.08	50.19 $\pm$ 4.16 ^a	42.55 $\pm$ 3.34 ^a	38.68 $\pm$ 2.04 ^a	35.05 $\pm$ 2.67 ^{ab}	31.63 $\pm$ 1.72 ^{bc}
37	0	54.59 $\pm$ 5.29	46.17 $\pm$ 3.92 ^{abc}	41.13 $\pm$ 0.78 ^{ab}	37.61 $\pm$ 3.75 ^a	34.31 $\pm$ 3.27 ^{abc}	32.67 $\pm$ 2.36 ^b
37	20	59.91 $\pm$ 7.10	49.28 $\pm$ 2.39 ^{ab}	41.53 $\pm$ 3.22 ^{ab}	37.64 $\pm$ 2.39 ^a	33.56 $\pm$ 1.59 ^{abc}	29.08 $\pm$ 0.89 ^{cd}
37	40	49.72 $\pm$ 7.16	47.56 $\pm$ 7.41 ^{abc}	37.41 $\pm$ 3.47 ^b	31.60 $\pm$ 3.12 ^b	30.01 $\pm$ 2.36 ^c	27.28 $\pm$ 2.02 ^d
37	80	58.79 $\pm$ 6.33	47.92 $\pm$ 5.67 ^{abc}	43.31 $\pm$ 0.88 ^a	36.92 $\pm$ 2.57 ^a	32.88 $\pm$ 2.15 ^{bc}	29.30 $\pm$ 2.00 ^{cd}

双因素方差分析 P 值 P-value of two-way ANOVA

蛋白质 protein	0.14	0.10	0.88	0.16	0.04	0.01
硫胺素 thiamine	0.16	0.28	0.03	0.03	0.02	<0.01
蛋白质×硫胺素 protein×thiamine	0.64	0.12	0.11	0.59	0.66	0.85

注：同列数据上标不同表示组间存在显著差异($P<0.05$)。
Note: Values in the same column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

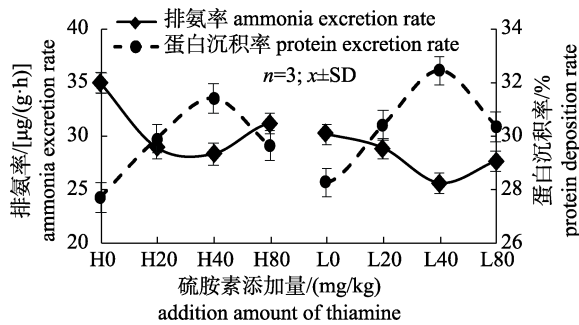


图 1 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾平均排氨率和蛋白沉积率的影响

H 表示 42%蛋白水平饲料, L 表示 37%蛋白水平饲料;
0、20、40、80 表示硫胺素的添加量(mg/kg).

Fig. 1 Effect of dietary protein and thiamine levels on average ammonia excretion rate and protein deposition rate of *Litopenaeus vannamei*

H stands for 42% protein level diet, L stands for 37% protein level diet; 0, 20, 40, 80 indicate the amount of thiamine addition (mg/kg).

2.6 回归分析

通过对两种蛋白质水平下硫胺素添加梯度增重率的回归分析得出, 凡纳滨对虾在蛋白质水平 42%的条件下最适硫胺素添加量为 45.14 mg/kg, 而在蛋白水平 37%的条件下最适硫胺素添加量

为 49.53 mg/kg(图 2); 通过蛋白沉积率的回归分析得出在蛋白质水平为 42%和 37%的条件下, 最适硫胺素添加量分别为 48.81 mg/kg 和 47.69 mg/kg(图 3)。

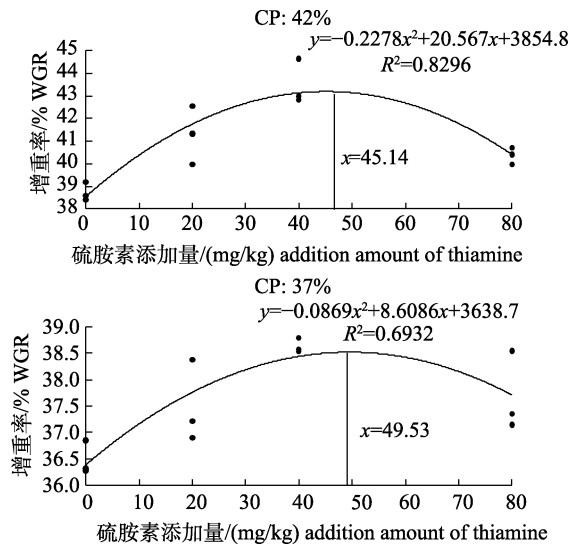


图 2 两种蛋白质水平下硫胺素添加梯度与增重率的回归分析

Fig. 2 Regression analysis of weight gain rate with thiamine supplementation at two protein levels

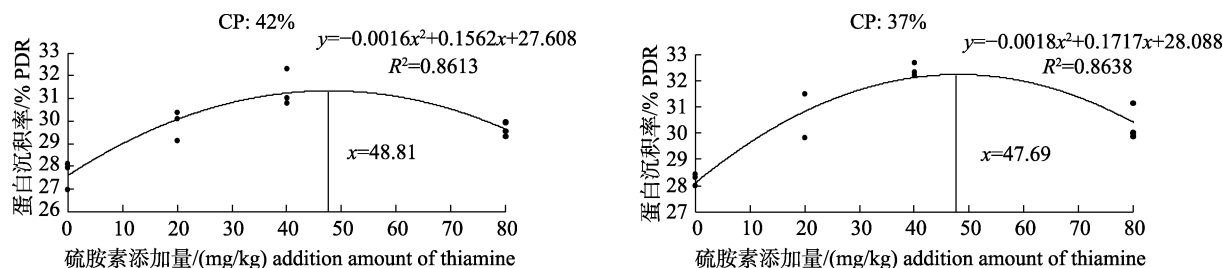


图3 两种蛋白质水平下硫胺素添加梯度与蛋白沉积率的回归分析

Fig. 3 Regression analysis of protein deposition rate with thiamine supplementation at two protein levels

3 讨论

3.1 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾生长性能和体成分的影响

蛋白质是凡纳滨对虾机体的主要成分,对于水产动物生长性能具有至关重要的影响。通常来说,在一定范围内随着饲料蛋白质水平的提高往往伴随着更佳的生长表现^[16]。朱学芝等^[17]在对凡纳滨对虾饲料中适宜蛋白质和淀粉水平的研究中发现,相比摄食蛋白质含量为36%的饲料,摄食蛋白质含量42%的饲料凡纳滨对虾有更高的特定增长率。本研究结果也同样表明,相较37%蛋白质水平饲料,摄食蛋白质含量为42%水平饲料的凡纳滨对虾有着更好的生长性能。然而,虽然较高的蛋白水平能够促进对虾的生长,但在本研究发现,摄食低蛋白饲料的对虾PER和PDR显著高于摄食高蛋白饲料。此外,水产动物生长性能的表现一定程度上能够直接反映硫胺素的需求量。先前的研究发现,在吉富罗非鱼(*GIFT Oreochromis niloticus*)^[18]、黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[19]的饲料中添加适量硫胺素,能够显著提高其增重率、特定增长率以及蛋白质效率。在中华绒螯蟹^[10]的研究中,饲料中添加80 mg/kg硫胺素显著提高其增重率。本实验进一步揭示了饲料中硫胺素添加水平对凡纳滨对虾生长性能的具体影响。结果显示,饲料中硫胺素的添加水平对凡纳滨对虾WGR、SGR、FCR有显著的积极效果并在硫胺素添加量为40 mg/kg时,凡纳滨对虾获得最佳的生长性能。

硫胺素被机体摄入后,通常以辅酶的形式参与体内蛋白质的代谢过程,如氨基酸的脱羧、转

氨以及酮酸的氧化脱羧等多个关键环节,从而有效促进氨基酸的吸收和蛋白质的合成过程^[20]。先前在卵形鲳鲹^[9]、中华绒螯蟹^[10]中的研究表明,饲料中添加硫胺素能够提高机体蛋白含量及蛋白质效率。本研究进一步证实,在饲料中适量添加硫胺素能够显著提高对虾体蛋白含量、蛋白质效率以及蛋白质沉积率。然而,当硫胺素摄入量超出一定范围时,蛋白质的沉积率反而呈现下降的趋势。这可能由于过量的硫胺素摄入加重肝胰腺代谢负担加重,导致硫胺素的利用率下降。

3.2 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾消化酶活性和营养物质表观消化率的影响

肝胰腺是凡纳滨对虾营养物质代谢的重要器官,其消化酶活性的高低能够直接反映机体对饲料的消化能力以及营养物质的吸收能力,进而影响对虾的生长和发育情况^[21]。硫胺素作为一种重要的营养素,具有抑制胆碱酯酶的活性、促进消化液的分泌和肠胃蠕动、促进营养物质消化的作用^[22]。先前研究表明,硫胺素的添加能显著提高幼建鲤(*Cyprinus carpio* var. *Jian*)^[23]和卵形鲳鲹幼鱼^[9]肠道中糜蛋白酶活性,与本研究结果也呈现出相似的趋势。这暗示硫胺素可能通过提高肝胰腺蛋白酶活性来促进凡纳滨对虾对饲料中蛋白质的消化吸收,从而促进蛋白质的合成和生长性能。在本研究中,随着饲料中硫胺素水平的增加,对虾肝胰腺中淀粉酶活力呈先上升后下降的趋势。这与先前在中国对虾(*Penaeus chinensis*)^[24]和中华绒螯蟹^[10]的研究结果相吻合,即适量的硫胺素水平能显著提高肝胰腺淀粉酶活力,但过高的添加量则会对幼蟹淀粉酶活力产生抑制作用。这一现象的潜在机制可能是由于硫胺素作为丙酮酸脱氢酶的

辅酶,其添加能提高该酶的活性,从而促进糖代谢过程,最终在底物水平上影响淀粉酶活力。

营养物质表观消化率是衡量凡纳滨对虾对各类营养物质的总体消化吸收水平的一个重要指标。在本项研究中,营养物质表观消化率与胰腺消化酶活性的变化趋势呈现出一致性。此外,本研究还对比了两种不同饲料蛋白质水平下凡纳滨对虾营养物质表观消化率。结果显示,干物质的表观消化率在两种蛋白质水平之间并未表现出显著差异。然而,在蛋白质表观消化率方面,摄食蛋白质含量为 42% 的凡纳滨对虾相较于摄食蛋白质含量为 37% 的对虾,其蛋白质表观消化率降低。对于这一结果,可能的原因包括:一方面,当饲料中蛋白质含量超过凡纳滨对虾的基本需求时,多余的蛋白质可能更多地被用转化为能量来源进行消耗,而非直接用于生长和蛋白质合成过程,这在一定程度上导致了蛋白质表观消化率的降低;另一方面,凡纳滨对虾对于蛋白质的利用能力存在一定的上限,高蛋白质饲料可能产生更多的氮代谢物,这些代谢物的积累可能对凡纳滨对虾的消化吸收系统造成一定的负担,进而影响了蛋白质表观消化率。

3.3 饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾排氮率的影响

蛋白质经消化分解产生氨基酸,其中一部分氨基酸被机体用于新蛋白质的合成,而余下的氨基酸则经历氧化分解过程。这一分解代谢途径产生的含氮副产物,主要以氨和尿素等形式,通过排泄作用释放至养殖水体中^[25]。氨氮作为养殖生态系统中重要的环境因子^[26],由游离氨(NH_3)和铵盐(NH_4^+)的形式组成,两者在特定的条件下可以相互转化,且游离氨对水生动物有极大的危害作用^[27]。当氨氮渗透进入血液后,会抑制血液运输氧气的能力,在严重的情况下,这可能导致水产动物出现缺氧症状。此外,低浓度的游离氨能够穿透细胞膜,入侵水产动物神经、胰腺和鳃等多个组织,不仅会削弱其免疫能力,导致病原微生物的入侵,而且还能直接毒害水产动物造成大量死亡^[28,29]。因此,提高水产动物对饲料中蛋白质的利用效率,促进蛋白质的沉积,从而减少

氨氮的排放量,对于保障水产动物健康生长及水体生态环境的改善具有重要意义。本研究发现,凡纳滨对虾在摄食后的第 1 h 排氮率达到峰值,随后逐渐降低。随着饲料中硫胺素水平的升高,对虾排氮率呈现先降低后上升的趋势,且在实验的第 5 h 后,硫胺素添加组排氮率显著低于对照组。排氮率的降低意味着饲料中的蛋白质或其他含氮物质在虾体内得到了更有效的利用,有效减少了氨氮等有害物质的排放。同时,蛋白沉积率的增加则表明饲料中的蛋白质更多地被对虾吸收并转化为体蛋白,而非以氨氮等形式排出体外。此外,Lied 等^[30]的先前研究指出,水体中氨氮浓度的增加可以作为蛋白质合成减少的一个指标。本研究的结果也发现,对虾的排氮率与蛋白质沉积率之间存在负相关关系,这进一步证实了饲料中硫胺素的添加促进了凡纳滨对虾体内蛋白质的沉积,减少了蛋白质作为能量的消耗,从而有效降低了养殖水体中的氨氮浓度。

4 结论

本研究结果表明,饲料蛋白质和硫胺素水平对凡纳滨对虾增重率有交互作用,适宜的硫胺素通过提升对虾消化酶活性和表观消化率、降低氮排泄来促进对虾生长性能的提升。饲料蛋白质含量为 42% 与饲料蛋白质水平为 37% 相比,对虾获得最佳生长所需的硫胺素添加量更低。在本研究中,饲料蛋白质水平为 42% 及硫胺素添加量为 45.14 mg/kg 时,凡纳滨对虾具有最优的生长性能;而蛋白质水平为 37% 和硫胺素添加量为 49.53 mg/kg 时,凡纳滨对虾表现出较低的氮排泄以及较高的蛋白质沉积率。

参考文献:

- [1] Wang Q C, Yu Y, Yuan J B, et al. Effects of marker density and population structure on the genomic prediction accuracy for growth trait in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. BMC Genetics, 2017, 18(1): Article No.45.
- [2] Guo X, Yao R F, Tan Y Q, et al. Effects of thiamine on rumen fermentation parameters and branched-chain fatty acid synthesis *in vitro*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(8): 5141-5151. [郭鑫,姚瑞芬,谭咏琪,等.硫胺素对体外瘤胃发酵参数及支链脂肪酸合成的影响[J].

- 动物营养学报, 2024, 36(8): 5141-5151.]
- [3] Edwards K A, Tu-Maung N, Cheng K, et al. Thiamine assays—Advances, challenges, and caveats[J]. *ChemistryOpen*, 2017, 6(2): 178-191.
- [4] Martin P R, Singleton C K, Hiller-Sturmhöfel S. The role of thiamine deficiency in alcoholic brain disease[J]. *Alcohol Research & Health*, 2003, 27(2): 134-142.
- [5] Wang R H, Xing L. Progress in the application of vitamin B₁ in feed[J]. *Animal Agriculture*, 2016(11): 60-61. [王仁华, 邢磊. 饲料中维生素 B₁ 的应用进展[J]. 饲料与畜牧, 2016(11): 60-61.]
- [6] Huang X L, Xia M H, Wang H L, et al. Dietary thiamin could improve growth performance, feed utilization and non-specific immune response for juvenile Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2015, 21(3): 364-372.
- [7] Udith W, Kyeong-Jun L. Dietary thiamine requirement and its effects on growth and innate immunity of Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*)[J]. *Aquaculture International*, 2024, 32(3): 2999-3016.
- [8] He Z J, Cao J M, Chen B, et al. A study on dietary vitamin B₁ requirement of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(4): 977-984. [何志交, 曹俊明, 陈冰, 等. 凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)维生素 B₁ 需要量的研究[J]. 动物营养学报, 2010, 22(4): 977-984.]
- [9] Xun P W, Lin H Z, Wang R X, et al. Effects of dietary vitamin B₁ on growth performance, intestinal digestion and absorption, intestinal microflora and immune response of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. *Aquaculture*, 2019, 506: 75-83.
- [10] Wang Y. Requirement of water-soluble vitamin B₁, B₂ and B₆ of juvenile Chinese mitten crab, *Eriocheir sinensis*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009. [王玥. 中华绒螯蟹幼蟹对水溶性维生素 B₁、B₂ 和 B₆ 适宜需求量研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.]
- [11] Niu J, Zhao W. Research advances in nutritional physiology and high-efficiency and environment-friendly feed of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(10): 1776-1800. [牛津, 赵伟. 凡纳滨对虾营养生理和高效环保饲料研究进展[J]. 水产学报, 2022, 46(10): 1776-1800.]
- [12] Huang W W, Zheng C Q, Huo Y W, et al. Protein requirement of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) during different growth stages[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2014, 26(9): 2675-2686. [黄文文, 郑昌区, 霍雅文, 等. 凡纳滨对虾不同生长阶段的蛋白质需要量[J]. 动物营养学报, 2014, 26(9): 2675-2686.]
- [13] Wang W J. Apparent digestibility of selected feed ingredients for *Epinephelus coioides*, *Rachycentron canadum* and *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012. [王文娟. 斜带石斑鱼、军曹鱼和凡纳滨对虾对常用饲料原料表观消化率的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.]
- [14] Cejas J R, Almansa E, Jérez S, et al. Changes in lipid class and fatty acid composition during development in White Seabream (*Diplodus sargus*) eggs and larvae[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2004, 139(2): 209-216.
- [15] Huang X X, Feng L F, Wen W, et al. The changes in lipid and fatty acid profiles of devil stinger *Inimicus japonicus* during the development of embryo and yolk-sac larvae[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(4): 526-535. [黄旭雄, 冯隆峰, 温文, 等. 日本鬼鲉胚胎及卵黄囊仔鱼发育过程中脂肪及脂肪酸特性变化[J]. 水产学报, 2013, 37(4): 526-535.]
- [16] Ma R, Liu X H, Meng Y Q, et al. Protein nutrition on sub-adult triploid rainbow trout (1): Dietary requirement and effect on anti-oxidative capacity, protein digestion and absorption[J]. *Aquaculture*, 2019, 507: 428-434.
- [17] Zhu X Z, Yao C F, Wang H, et al. Effects of dietary protein and starch levels on growth performance, body composition, physiological and biochemical indexes in hepatopancreas and hemolymph of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(12): 7969-7977. [朱学芝, 姚春风, 王昊, 等. 饲料中蛋白质和淀粉水平对凡纳滨对虾生长性能、体组成、肝胰腺和血淋巴生理生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(12): 7969-7977.]
- [18] Ren C, Wen H, Huang F, et al. Dietary thiamin requirement of GIFT *Oreochromis niloticus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(4): 539-546. [任春, 文华, 黄凤, 等. 吉富罗非鱼对饲料中维生素 B₁ 的需要量[J]. 水产学报, 2015, 39(4): 539-546.]
- [19] Zhao H X, Chen B, Huang Y H, et al. Effects of dietary vitamin B₁ on growth performance, blood metabolites, body composition, intestinal enzyme activities and morphometric parameters of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2020, 26(5): 1681-1690.
- [20] Zehra S, Khan M A. Dietary thiamin requirement of fingerling *Channa punctatus* (Bloch) based on growth, protein gain, liver thiamin storage, RNA/DNA ratio and biochemical composition[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, 24(3): 1015-1023.
- [21] Su P, Han Y, Jiang C, et al. Effects of chitosan-oligosaccharides on growth performance, digestive enzyme and intestinal bacterial flora of tiger puffer (*Takifugu rubripes* Temminck et Schlegel, 1850)[J]. *Journal of Applied Ichthyology*,

- 2017, 33(3): 458-467.
- [22] Xiang X, Zhou X Q, Chen G F, et al. Effect of graded levels of dietary thiamine on the growth performance, body composition and haemato - biochemical parameters of juvenile *Scizothorax prenanti*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2016, 22(3): 691-697.
- [23] Feng L, Huang H H, Liu Y, et al. Effect of dietary thiamin supplement on immune responses and intestinal microflora in juvenile Jian carp (*Cyprinus carpio* var. *Jian*)[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2011, 17(5): 557-569.
- [24] Xu Z C, Li A J. Studies on effect of vitamin B₁ on prawn's growth[J]. *Shandong Fisheries*, 1994, 11(3): 26-29. [徐志昌, 李爱杰. 维生素 B₁ 对中国对虾生长影响的研究[J]. 齐鲁渔业, 1994, 11(3): 26-29.]
- [25] Liu X W, Wang H L. Research progress on protein nutrition physiology of fish[J]. *Guangdong Feed*, 2011, 20(7): 27-31. [刘兴旺, 王华朗. 鱼类蛋白质营养生理研究进展[J]. 广东饲料, 2011, 20(7): 27-31.]
- [26] Zeng J, Yang L Y, Xiao L, et al. Biogeochemical cycling of nitrogen in lakes and the role of microorganisms in conversion of nitrogen compounds[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4): 382-389. [曾巾, 杨柳燕, 肖琳, 等. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 382-389.]
- [27] Zhang W Q, Zhu Y. Advances on the research of the hazard of ammonia nitrogen in aquaculture water and its determination method[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2012, 2(6): 324-327. [张卫强, 朱英. 养殖水体中氨氮的危害及其检测方法研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2012, 2(6): 324-327.]
- [28] Benli A Ç K, Köksal G, Özkul A. Sublethal ammonia exposure of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.): Effects on gill, liver and kidney histology[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(9): 1355-1358.
- [29] Cai J H, Shen Q Y, Zheng X Y, et al. Advancement in researches of ammonia pollution hazards on aquaculture and its treatment technology[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2010, 29(2): 167-172, 195. [蔡继晗, 沈奇宇, 郑向勇, 等. 氨氮污染对水产养殖的危害及处理技术研究进展[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 167-172, 195.]
- [30] Lied E, Braaten B. The effect of feeding and starving, and different ratios of protein energy to total energy in the feed on the excretion of ammonia in Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1984, 78(1): 49-52.

Effects of dietary thiamine and protein levels on the growth performance and protein utilization in the white shrimp, *Litopenaeus vannamei*

LU Jianchao¹, LI Dongyan¹, HE Zhicheng¹, WANG Weilong^{1, 2, 3}, YI Ganfeng^{1, 4}, HUANG Xuxiong^{1, 2, 3}

1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education; Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
2. China-ASEAN Belt and Road Joint Laboratory on Mariculture Technology(Shanghai), Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
3. Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;
4. Beijing Dabeinong Technology Group Co.,Ltd., Beijing 100008, China

Abstract: Thiamine is a water-soluble vitamin essential for the growth and development of organisms and usually functions as the coenzyme participating in the metabolic processes of nutrients in the body. Protein is a necessary nutrient for human growth and the main source of energy. Therefore, this study was carried out to investigate the relationship between nutrient levels and protein content in shrimps as well as optimize the nutrient ratio in diets to promote shrimp growth performance and improve the utilization rate of feed protein, while also paying attention to reducing pollutants such as ammonia nitrogen generated in the breeding process to effectively reduce the environmental burden on the aquatic environment. To investigate the growth performance and protein utilization of white shrimp diets with different combinations of dietary proteins and thiamine, eight isoenergetic experimental diets with two protein levels (37% and 42%) and four thiamine-supplemented levels (0 mg/kg, 20 mg/kg, 40 mg/kg, and 80 mg/kg) were designed and fed to juvenile shrimps with an initial weight of (0.44±0.05) g for

eight weeks under freshwater conditions. Two weeks before the end of the experiment, feces were collected for the detection and analysis of apparent digestibility of nutrients. Before the end of the experiment, the shrimps were subjected to 12-hour fasting, followed by weighing and counting after removal from the net cage to calculate the survival rate (SR), weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR), feed conversion ratio (FCR), protein efficiency ratio (PER), and protein deposition rate (PDR). Twelve whole shrimps and hepatopancreas were collected from each cage to assess the composition of whole shrimps and digestive enzymes (protease, lipase, and amylase). After the weighing was completed, the remaining shrimps were returned to the corresponding cages for continuous rearing. After a stabilization period of three days, an ammonia nitrogen excretion experiment was carried out to determine the variations in the ammonia excretion rate of shrimps eight hours after satiation. The results showed that dietary protein and thiamine levels affected the FBW, WGR, and crude protein content of whole shrimps. The growth performances of shrimps fed with high-protein diets were significantly better than those of shrimps fed with low-protein diets ($P<0.05$). With the increase of thiamine level in the diets of the same protein level, the FBW, WGR, and crude protein content in whole shrimps initially increased and then decreased. Compared with that of 0 mg/kg thiamine group, the shrimps of 40 mg/kg thiamine displayed significantly higher FBW, WGR, and crude protein content in whole shrimps ($P<0.05$). The shrimps fed with diets with thiamine displayed significantly higher SGR, PER, PDR, hepatopancreatic amylase, protease activities, and apparent dietary digestibility of protein and lipids ($P<0.05$). The PER, PDR, amylase activity, and the apparent digestibility of protein and lipids of the shrimps fed with low-protein diets were significantly higher than those of shrimps fed with high-protein diets ($P<0.05$). The ammonia excretion rate of the shrimps first decreased and then increased with the increase of dietary thiamine level. Regression analysis showed that the optimal dietary thiamine supplementation was 45.14 mg/kg with dietary protein content of 42% and 49.53 mg/kg with dietary protein content of 37%. In conclusion, appropriate levels of dietary protein and thiamine enhance shrimp growth performance by improving the digestive enzyme activities and apparent digestibility while reducing nitrogen excretion. Furthermore, the optimal dietary thiamine level required for maximum shrimp growth decreases as the dietary protein level increases.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; thiamine; protein; growth performance; protein utilization; nitrogen excretion

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