

## 高密度养殖凡纳滨对虾的蛋白质生态营养需要量

李勇<sup>1,2</sup>, 夏苏东<sup>1,2</sup>, 于学权<sup>3</sup>, 唐士桥<sup>1</sup>, 王华<sup>1,2</sup>, 王美琴<sup>1</sup>, 孙国祥<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 天津海发珍品实业有限公司, 天津 3004503)

**摘要:** 在高密度养殖条件(平均养殖密度  $3.1 \text{ kg/m}^3$ )下, 用5种蛋白质水平(31%、35%、39%、43%、47%, 分别以A~E组表示)的饲料, 投喂体质量( $6.2 \pm 0.2$ )g的凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*), 每个处理组设3个重复, 每个重复30尾虾, 实验期60d, 探讨蛋白质营养对生长、环境因子、排泄与饲料消化特征的影响。结果表明:(1)饲料蛋白水平>39%时具有显著促进对虾生长的效果。随着蛋白水平的提高, 增重率先增加后降低, 饲料系数则相反。(2)养殖水体中氨氮、亚硝酸盐和磷酸盐浓度随饲料蛋白质水平增加而显著升高, E组与其他各组差异显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ )。(3)随着饲料蛋白质含量增加, 饲料总消化率显著下降, 而蛋白质消化率显著升高。(4)创新建立的对虾日粮蛋白质水平与日增氮、日排有害氮的定量动态变化关系, 使蛋白质生态营养需要量得以量化确定。高密度养殖凡纳滨对虾获得最大增重的蛋白质需要量为43.73%, 获得最佳生长和氮减排的蛋白质需要量为40.42%。[中国水产科学, 2010, 17(1): 78-87]

**关键词:** 凡纳滨对虾; 生态营养需要量; 高密度养殖; 水环境; 消化率

**中图分类号:** S96

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-8737-(2010)01-0078-10

随着集约化养殖技术的应用, 中国水产养殖业迅猛发展, 然而病害、种质和养殖环境三大问题已经成为严重制约水产养殖健康发展的瓶颈, 其中病害问题尤为突出。疾病的发生主要由水质恶化引起, 同时又导致水质的进一步恶化, 两者之间形成明显的恶性循环<sup>[1]</sup>。水产养殖中的自污染主要由饲料污染引起, 水生动物摄食饲料后, 污染环境的营养物质代谢和排泄产物主要是氮和磷酸盐, 养殖水体的污染程度与所摄取饲料中氮和磷的含量有密切关系<sup>[2]</sup>。因此从源头做起, 通过生态营养调控, 确定饲料中适宜的蛋白质等营养水平, 对降低水质污染、提高养殖动物的免疫力、保证对虾健康生长等, 显得尤为重要而迫切<sup>[3-4]</sup>。

养殖过程中饲料营养水平与水环境的关系已逐渐引起人们的重视, 国内外一些学者对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)<sup>[5]</sup>、澳洲红螯虾(*Panulirus homarus*)<sup>[6]</sup>、日本对虾(*Penaeus japonicus*)<sup>[7]</sup>、斑节对虾(*Penaeus*

*monodon*)<sup>[8]</sup>等甲壳类的蛋白质水平与耗氧、氨氮排泄之间的关系进行了研究; Martinez-Gordova等<sup>[9]</sup>和Gomez-Jimenez<sup>[10]</sup>分别报道了凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)幼虾在室外池塘、封闭式循环水条件下养殖水体的水质情况; 但是, 关于凡纳滨对虾蛋白质营养与水质和消化之间关系的研究尚未见报道, 高密度养殖条件下的生态营养需要量研究尚属空白。

本研究探讨了我国北方凡纳滨对虾高密度养殖中后期蛋白质营养对生长、水质和消化的影响特征, 并确定蛋白质的生态营养需要量, 为降低高密度养殖中的水环境自污染、减少病害发生等提供科学参考和借鉴。

### 1 材料与方法

#### 1.1 实验设计与动物分组

采用单因素随机试验设计, 按5个蛋白质水平

收稿日期: 2009-05-31; 修订日期: 2009-09-23.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)重点项目(2006AA100305); 国家农业科技成果转化资金项目(2008GB2C100109).

作者简介: 李勇(1960-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为水产动物营养与饲料科学. Tel: 0532-82898724; E-mail: lyzhy678@hotmail.com

(31%、35%、39%、43%、47%, 分别以 A ~ E 组表示) 进行投喂, 每个处理组设 3 重复, 每重复 30 尾虾。实验用凡纳滨对虾购于天津立达水产有限公司, 选取健康的对虾, 经消毒处理, 在 40 m<sup>2</sup> 矩形水泥池中驯化 2 周, 挑选平均质量 (6.2 ± 0.2) g 的对虾 450 尾, 随机分配到各实验组中。

## 1.2 试验饲料

根据实验设计和同质优化方法, 确定 5 种蛋白质梯度水平的试验饲料配方 (表 1)。按照饲料配方将原料混匀、超微粉碎后, 经双螺杆压条机挤压出直径为 2 mm 的颗粒配合饲料, 60 °C 烘干至恒重。破碎过筛后, 选取颗粒长度为 1.2 ~ 1.6 mm 的做为对虾的配合饲料。

表 1 凡纳滨对虾试验饲料组成及主要营养成分含量  
Tab. 1 Ingredients and chemical composition of the trial pellet diets for white shrimp *Litopenaeus vannamei* %

组成 Ingredient	实验组 Group				
	A	B	C	D	E
秘鲁鱼粉 Peru fish meal	9.00	13.00	17.00	21.00	26.00
面粉 Floor	47.21	39.56	31.88	24.60	19.50
花生粕 Peanut meal	8.00	8.00	8.00	8.00	6.00
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	4.00	6.00	8.00	10.40	11.10
棉籽蛋白粉 Cottonseed gluten meal	9.17	11.33	13.53	14.00	14.40
美国肉骨粉 American meat and bone meal	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
虾壳粉 Shrimp carapace powder	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
羽毛粉 Feather powder	3.00	3.00	3.00	3.50	4.00
卵磷脂 Lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
血球蛋白粉 Blood corpuscle powder	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50
精炼鱼油 Fish oil	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
磷酸二氢钙 CaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.12	0.61	0.09	0.00	0.00
复合维生素 Vitamin premix	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
复合矿物质 Mineral premix	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
三氧化二铬 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
合计 Total	100	100	100	100	100
干物质 Dry matter	91.20	91.80	91.30	91.60	92.10
粗蛋白 Crude protein	30.90	35.01	39.24	42.88	46.92
钙 Ca	2.06	2.14	2.22	2.31	2.35
总磷 P	1.25	1.25	1.25	1.34	1.48
粗脂肪 Crude lipid	4.70	4.80	4.90	5.20	5.20
粗灰分 Crude ash	5.80	5.70	5.60	5.90	6.10
碳水化合物 * Carbohydrate	49.74	46.29	41.56	37.82	33.88

注: \* 为计算值, 其余营养成分为实测值。

Note: \* donates calculated value, while others are measured values.

## 1.3 生长实验

**1.3.1 饲养管理** 实验于 7 ~ 9 月在天津海发珍品实业有限公司进行, 实验期 60 d。对虾养殖在 80 L 圆桶中, 配备气石充气, 盖塑料网防逃。水温 (25 ± 2) °C, 盐度 (35 ± 2), pH 7.5 ~ 8.6, 溶解氧 (DO) > 5 mg/L。实验始末养殖密度分别为 2.3 kg/m<sup>3</sup> 和 3.9 kg/m<sup>3</sup> (对

虾集约化精养密度一般为 1 ~ 2 kg/m<sup>3</sup>)。养殖前期每天换水 1 次, 后期每天换水 2 次, 每次换水量约 30%。日投饲量为虾体质量的 3% ~ 6%, 投喂时间为 06:00、11:30、17:30 和 21:30。根据对虾摄食变化情况, 及时调整投喂量。发现死虾及时称重, 记录。实验开始和结束时各组虾空腹称体质量。

**1.3.2 样品采集与测定** 实验结束后饥饿 12 h, 选取蜕皮间期对虾, 每平行组取 12 尾虾, 每处理共取 36 尾虾, 用滤纸轻轻吸干体表水分, 测量体长和体质量, 置冰盘上解剖, 腹部称重, 去壳后肌肉称重, 65 °C 烘干至恒重。

饲料及粪便成分的测定参照文献 [11]: 干物质于 105 °C 烘干至恒重; 粗蛋白质采用微量凯氏定氮法; 粗脂肪采用索氏抽提法; 粗灰分采用 550 °C 灼烧法; 总磷采用磷钼蓝分光光度法。

### 1.3.3 对虾生长性能参数计算

存活率 (%) =  $100 \times \text{实验结束时虾体数} / \text{实验开始时虾体数}$

日增重 = 净增重 / 养殖天数

肌肉水分含量 (%) =  $100 \times (1 - \text{肌肉风干质量} / \text{肌肉鲜质量})$

净增重 = 末均质量 - 初均质量

日增氮 = 日增重  $\times (1 - \text{肌肉水分含量}) \times \text{风干肌肉蛋白含量} / 6.25$

饲料系数 = 摄食量 / (末总质量 - 初总质量)

## 1.4 水质测定

**1.4.1 指标与方法** 水质测定于 9 月初, 养殖第 8 周进行, 17:00 投喂饲料 (日摄食量的 30%), 分别于 20:00 (投喂后 3 h)、次日 2:00 (投喂后 9 h)、8:00 (投喂后 15 h) 在每个实验桶采集均匀水样 300 mL, 置于 -20 °C 冷冻保存, 测定氨氮、亚硝氮、SS (悬浮物)、COD (化学需氧量) 和磷酸盐, 24 h 内完成检测。水生态因子测定采用文献 [12] 的方法: 氨氮采用靛酚蓝分光光度法; 亚硝氮采用萘乙二胺分光光度法; SS 采用重量法; COD 采用碱性高锰酸钾法; 磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法。总有害氮浓度为氨氮浓度和亚硝氮浓度之和。

**1.4.2 氮磷排泄量** 以 20:00 测定值作为空白值, 分别计算 20:00 到次日 2:00 (3 ~ 9 h), 20:00 到次日 8:00 (3 ~ 15 h), 次日 2:00 到次日 8:00 (9 ~ 15 h), 每克虾体质量排泄的氨氮、亚硝氮和磷酸盐量。

3 ~ 15 h 氨氮排泄量 =  $(15 \text{ h 氨氮浓度} - 3 \text{ h 氨氮浓度}) \times \text{水体积} / \text{虾总体质量}$

总有害氮排泄量 = 氨氮排泄量 + 亚硝氮排泄量  
日氮排泄 (mg/d · ind) =  $[(15 \text{ h 总有害氮浓度} - 3 \text{ h 总有害氮浓度}) \times \text{水体积} / 30\%] / \text{对虾数量}$

## 1.5 消化实验

采用 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 指示剂间接方法进行消化试验<sup>[11]</sup>。实验全程收集粪便, 换水时用虹吸法将粪便吸至筛绢中, 滤去水分, 挑选外表带有包膜的完整粪便置于铝制小盒中, -20 °C 保存。饲料及粪便中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的测定采用分光光度计法<sup>[11]</sup>。指标计算公式如下:

饲料总消化率 (%) =  $100 \times (1 - \text{饲料 Cr}_2\text{O}_3 \text{ 含量} / \text{粪便 Cr}_2\text{O}_3 \text{ 含量})$

饲料蛋白质消化率 (%) =  $100 \times [1 - (1 - \text{饲料 Cr}_2\text{O}_3 \text{ 含量} / \text{粪便 Cr}_2\text{O}_3 \text{ 含量}) \times (\text{粪便粗蛋白含量} / \text{饲料粗蛋白含量})]$

蛋白质消化量 = 日摄食量  $\times \text{饲料蛋白质含量} \times \text{蛋白质消化率}$

## 1.6 蛋白质生态营养需要量确定方法

**1.6.1 蛋白质常规营养需要量** 根据本实验结果模拟出饲料蛋白质水平与对虾日增重之间的关系, 计算达到最大增重时的饲料蛋白质水平, 确定其为高密度养殖凡纳滨对虾的最适蛋白质营养需要量。

**1.6.2 蛋白质生态营养需要量** 模拟出饲料蛋白质水平与对虾日有害氮排放以及与对虾日增氮之间的关系, 计算二者斜率相等时的蛋白质水平, 确定其为高密度养殖凡纳滨对虾的蛋白质生态营养需要量。

## 1.7 统计分析

实验数据用 SPSS11.5 统计软件进行单因素方差分析, 多重比较采用 LSD 和 Duncan's 进行; 回归分析采用 Advanced Grapher v 2.1 建立多项式曲线模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长性能

由表 2 可见, 凡纳滨对虾摄食不同蛋白质水平饲料后, 各组生长表现出显著差异 ( $P < 0.05$ ), 但存活率差异不显著 ( $P > 0.05$ )。净增重、日增重和增重率随着蛋白质水平升高先增加后降低, C、D 和 E 组显著高于 A 和 B 组 ( $P < 0.05$ ), C、D、E 组之间没有显著差

表 2 饲料蛋白质水平对凡纳滨对虾生长性能的影响  
 Tab. 2 Effect of dietary protein levels on growth performance of white shrimp

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

指标 Indicator	实验组 Group				
	A	B	C	D	E
存活率 /% Survival rate	88.49 ± 2.21 <sup>a</sup>	89.53 ± 2.27 <sup>a</sup>	91.99 ± 0.10 <sup>a</sup>	92.93 ± 0.17 <sup>a</sup>	92.35 ± 2.41 <sup>a</sup>
末均重 /g Final average body weight	11.14 ± 0.17 <sup>a</sup>	11.71 ± 0.49 <sup>a</sup>	12.85 ± 0.27 <sup>b</sup>	13.08 ± 0.49 <sup>b</sup>	12.88 ± 0.44 <sup>b</sup>
净增重 /g Total weight gain	4.94 ± 0.17 <sup>a</sup>	5.50 ± 0.49 <sup>a</sup>	6.65 ± 0.26 <sup>b</sup>	6.88 ± 0.49 <sup>b</sup>	6.68 ± 0.04 <sup>b</sup>
日增重 / (mg · d <sup>-1</sup> · ind <sup>-1</sup> ) Daily weight gain	82.35 ± 2.83 <sup>a</sup>	91.77 ± 8.27 <sup>a</sup>	110.8 ± 4.44 <sup>b</sup>	114.7 ± 8.28 <sup>b</sup>	111.5 ± 0.73 <sup>b</sup>
增重率 /% Weight gain rate	79.70 ± 2.75 <sup>a</sup>	88.81 ± 8.01 <sup>a</sup>	107.30 ± 4.3 <sup>b</sup>	110.98 ± 8.0 <sup>b</sup>	107.89 ± 0.7 <sup>b</sup>
饵料系数 Feed conversion ratio	3.1 ± 0.24 <sup>b</sup>	2.90 ± 0.02 <sup>b</sup>	2.59 ± 0.18 <sup>a</sup>	2.54 ± 0.26 <sup>a</sup>	2.66 ± 0.08 <sup>b</sup>
肌肉水分 /% Moisture content of muscle	73.71 ± 0.30 <sup>b</sup>	73.22 ± 0.27 <sup>b</sup>	72.66 ± 0.27 <sup>a</sup>	72.43 ± 0.29 <sup>a</sup>	72.80 ± 0.25 <sup>a</sup>
风干肌肉蛋白 /% Crude protein of muscle	82.36	81.99	81.13	80.90	80.65
日增氮 / (mg · d <sup>-1</sup> · ind <sup>-1</sup> ) Nitrogen gain	2.85	3.22	3.91	4.09	3.94

注: A-E 分别表示 31%、35%、39%、43%、47% 5 个不同的蛋白质水平; 同一行数据右上角的相同字母表示差异不显著 ( $P>0.05$ ), 相邻字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ); 相间字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: A, B, C, D, E represent the protein levels of 31%, 35%, 39%, 43% and 47%, respectively, Values in the same row with same superscript letters are not significantly different ( $P>0.05$ ). Adjacent superscript letters mean significant difference ( $P<0.05$ ), and secluded superscript letters mean extremely significant difference ( $P<0.01$ ).

异 ( $P>0.05$ )。饲料系数随着蛋白质水平升高先降低后增加, C 和 D 组显著低于 A、B 和 E 组 ( $P<0.05$ )。

## 2.2 水质指标

**2.2.1 生态因子** 由表 3 可知, 投食后 3 h、9 h 和 15 h 养殖水体中总有害氮、氨氮、亚硝氮和磷酸盐浓度总体上随着蛋白质水平的升高而增加。在投喂后 15 h 总有害氮浓度各组间差异显著或极显著 ( $P<0.05$ ), B、C、D 和 E 组分别比 A 组高 17.1%、37.5%、48.3% 和 92.4%; 氨氮浓度 A、D、E 3 组之间差异显著 ( $P<0.05$ ), B、C、D 和 E 组分别比 A 组高 24.7%、45.4%、42.8% 和 78.4%; 亚硝氮浓度 A、D、E 3 组之间差异极显著 ( $P<0.01$ ), B、C、D 和 E 组分别比 A 组高 9.1%、29.4%、54% 和 106.9%; 磷酸盐浓度 A、C、E 之间差异极显著 ( $P<0.01$ ), C、D 和 E 组分别比 A 组高 35.9%、32.7% 和 73.4%。

悬浮物浓度随着饲料蛋白水平的提高而显著升高, A、B、E 组之间差异显著 ( $P<0.05$ ) 或极显著 ( $P<0.01$ ), B、C、D 和 E 组分别比 A 组高 6.7%、8.5%、10.1% 和 13.8%; COD 随饲料蛋白水平的增加呈现先增加后降低的趋势, 但各组差异不显著 ( $P>0.05$ )。

**2.2.2 氮磷排泄随时间的变化** 凡纳滨对虾摄食后氨氮、亚硝氮和总有害氮排放量在投食后 3 ~ 9 h 较高; 磷酸盐排放量在投食后 9 ~ 15 h 较高。投食

后 3 ~ 9 h 氨氮、亚硝氮和总有害氮排放量分别是 9 ~ 15 h 排放量的 2.7 ~ 4.5 倍、7.3 ~ 8.8 倍、1.5 ~ 2.7 倍; 投食后 9 ~ 15 h 磷酸盐排放量是投食后 3 ~ 9 h 排放量的 1.8 ~ 5.5 倍。

## 2.3 消化水平

由表 4 可见, 随着饲料蛋白质含量的增加, 饲料总消化率显著下降 ( $P<0.05$ )。A、B、C 和 D 组分别比 E 组高 11.9%、7.4%、5.0% 和 2.8%。随着饲料蛋白质水平的增加, 蛋白质消化率显著升高 ( $P<0.05$ )。B、C、D 和 E 组分别比 A 组高 0.8%、3.6%、4.6% 和 5.2%。蛋白质日消化量随着饲料蛋白质水平升高而显著增加 ( $P<0.05$ )。

## 2.4 菱形特征与蛋白质需要量计算

**2.4.1 对虾日增重与氮磷排泄** 从本实验结果看 (表 5 和图 1), 对虾氮排泄、磷酸盐排泄与日增重的关系基本符合蛋白质生态营养的菱形变化特征<sup>[13]</sup>。随蛋白质水平升高, 日增重、总有害氮和磷酸盐排泄均表现出升高趋势, 但二者变化特征和幅度不同且正好相对应。蛋白质水平从 31% 升高至 39% 时, 对虾日增重升高迅速 (28.4 mg/d · ind), 而氮、磷排泄虽有显著升高, 但增幅相对较小 (每 g 虾体质量总有害氮升高 17.3 μg, 磷酸盐升高 2 μg; 蛋白质水平从 39% 升高至 47% 时, 对虾日增重变化不显著 ( $P>0.05$ ), 而氮磷排泄升高迅速 ( $P<0.01$ ) (每 g 虾

表3 蛋白质水平对凡纳滨对虾水质指标的影响  
**Tab. 3 Effect of dietary protein levels on water quality of white shrimp aquaculture**  $n=3; \bar{x} \pm SE$

水质指标 Parameter of water quality	投喂后时间 Time after feeding	实验组 Group				
		A	B	C	D	E
氨氮浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> ) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	3 h	0.145 ± 0.026 <sup>b</sup>	0.181 ± 0.007 <sup>ab</sup>	0.195 ± 0.015 <sup>a</sup>	0.177 ± 0.053 <sup>ab</sup>	0.204 ± 0.086 <sup>a</sup>
	9 h	0.184 ± 0.028 <sup>c</sup>	0.233 ± 0.015 <sup>bc</sup>	0.270 ± 0.020 <sup>ab</sup>	0.265 ± 0.011 <sup>b</sup>	0.328 ± 0.018 <sup>a</sup>
	15 h	0.194 ± 0.032 <sup>d</sup>	0.242 ± 0.014 <sup>cd</sup>	0.282 ± 0.025 <sup>abc</sup>	0.277 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.346 ± 0.014 <sup>a</sup>
亚硝氮浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> ) NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	3 h	0.165 ± 0.013 <sup>d</sup>	0.17 ± 0.007 <sup>cd</sup>	0.192 ± 0.008 <sup>bcd</sup>	0.219 ± 0.012 <sup>ab</sup>	0.241 ± 0.013 <sup>a</sup>
	9 h	0.178 ± 0.012 <sup>f</sup>	0.190 ± 0.011 <sup>ef</sup>	0.225 ± 0.008 <sup>ce</sup>	0.269 ± 0.018 <sup>bc</sup>	0.329 ± 0.019 <sup>a</sup>
	15 h	0.187 ± 0.015 <sup>f</sup>	0.204 ± 0.008 <sup>ef</sup>	0.242 ± 0.010 <sup>ce</sup>	0.288 ± 0.018 <sup>c</sup>	0.387 ± 0.021 <sup>a</sup>
总有害氮浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> ) NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N + NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	3 h	0.310 ± 0.0124 <sup>e</sup>	0.351 ± 0.003 <sup>d</sup>	0.387 ± 0.007 <sup>e</sup>	0.397 ± 0.016 <sup>c</sup>	0.446 ± 0.005 <sup>a</sup>
	9 h	0.361 ± 0.017 <sup>g</sup>	0.423 ± 0.010 <sup>e</sup>	0.495 ± 0.015 <sup>e</sup>	0.534 ± 0.017 <sup>c</sup>	0.658 ± 0.006 <sup>a</sup>
	15 h	0.381 ± 0.018 <sup>g</sup>	0.446 ± 0.009 <sup>e</sup>	0.524 ± 0.0149 <sup>e</sup>	0.565 ± 0.018 <sup>c</sup>	0.733 ± 0.008 <sup>a</sup>
磷酸盐浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> ) PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	3 h	0.0311 ± 0.001 <sup>bcd</sup>	0.026 ± 0.000 <sup>d</sup>	0.0382 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.0365 ± 0.002 <sup>ab</sup>	0.029 ± 0.001 <sup>cd</sup>
	9 h	0.037 ± 0.001 <sup>c</sup>	0.031 ± 0.001 <sup>c</sup>	0.046 ± 0.003 <sup>a</sup>	0.045 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.049 ± 0.002 <sup>a</sup>
	15 h	0.0538 ± 0.001 <sup>d</sup>	0.0534 ± 0.001 <sup>d</sup>	0.0731 ± 0.008 <sup>bc</sup>	0.0714 ± 0.003 <sup>c</sup>	0.0933 ± 0.005 <sup>a</sup>
悬浮物浓度 / (mg · L <sup>-1</sup> ) SS	15 h	130.4 ± 3.61 <sup>c</sup>	139.16 ± 4.23 <sup>bc</sup>	141.5 ± 1.96 <sup>ab</sup>	143.6 ± 1.77 <sup>ab</sup>	148.4 ± 3.72 <sup>a</sup>
COD / (mg · L <sup>-1</sup> )	15 h	2.81 ± 0.083 <sup>a</sup>	2.86 ± 0.054 <sup>a</sup>	2.96 ± 0.097 <sup>a</sup>	3.02 ± 0.058 <sup>a</sup>	2.96 ± 0.064 <sup>a</sup>

注: A-E 分别表示 31%、35%、39%、43%、47% 5 个不同的蛋白质水平; 同一行数据右上角的相同字母表示差异不显著 ( $P>0.05$ ), 相邻字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ); 相间字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: A, B, C, D, E represent the protein levels of 31%, 35%, 39%, 43% and 47%, respectively. Values in the same row with same superscript letters are not significantly different ( $P>0.05$ ). Adjacent superscript letters mean significant difference ( $P<0.05$ ), and secluded superscript letters mean extremely significant difference ( $P<0.01$ ).

表4 凡纳滨对虾消化试验结果  
**Tab. 4 Digestive test results of *Litopenaeus vannamei***  $n=3; \bar{x} \pm SE$

指标 Indicator		实验组 Group				
		A	B	C	D	E
饲料消化率 / %	Total digestion rate	73.94 ± 1.55 <sup>a</sup>	70.98 ± 0.28 <sup>abc</sup>	69.42 ± 1.26 <sup>bcd</sup>	67.93 ± 0.31 <sup>cd</sup>	66.10 ± 1.49 <sup>d</sup>
蛋白消化率 / %	Protein digestion rate	71.94 ± 1.54 <sup>b</sup>	72.58 ± 0.35 <sup>bc</sup>	74.53 ± 1.14 <sup>abc</sup>	75.27 ± 0.15 <sup>ac</sup>	75.71 ± 0.99 <sup>a</sup>
蛋白质日消化量 / (mg · d <sup>-1</sup> · ind <sup>-1</sup> )	Daily protein digest amount	55.08 ± 2.62 <sup>e</sup>	71.25 ± 5.93 <sup>d</sup>	87.02 ± 4.36 <sup>bc</sup>	94.58 ± 6.72 <sup>ab</sup>	105.78 ± 2.84 <sup>a</sup>

注: A-E 分别表示 31%、35%、39%、43%、47% 5 个不同的蛋白质水平; 同一行数据右上角的相同字母表示差异不显著 ( $P>0.05$ ), 相邻字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ); 相间字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: A, B, C, D, E represent the protein levels of 31%, 35%, 39%, 43% and 47%, respectively. Values in the same row with same superscript letters are not significantly different ( $P>0.05$ ). Adjacent superscript letters mean significant difference ( $P<0.05$ ), and secluded superscript letters mean extremely significant difference ( $P<0.01$ ).

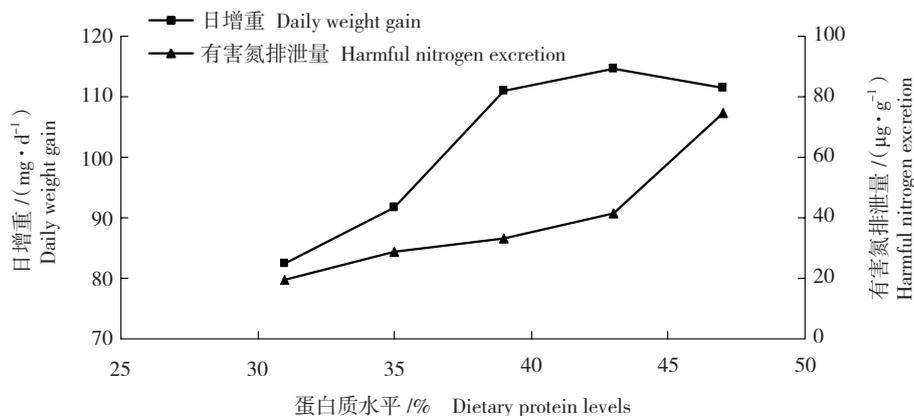


图1 饲料蛋白质水平对凡纳滨对虾日增重与有害氮排泄的影响

Fig. 1 Daily weight gain and harmful nitrogen excretion of *Litopenaeus vannamei* under different dietary protein level

体质量总有害氮升高 41.6 μg,磷酸盐升高 6.15 μg)。

**2.4.2 蛋白质常规营养需要量的计算** 根据对虾日增重与饲料蛋白质水平进行 3 次曲线回归模拟,绘出日增重与饲料蛋白水平的关系图(图 2),得到对虾日增重与饲料蛋白质水平关系的回归方程为:

$$y=-0.0259739x^3 + 2.8577784x^2-100.9307016x+1237.8036749 \quad R^2=0.9824 \quad (1)$$

根据方程(1)当斜率为零时,确定对虾日增重最大时饲料蛋白质营养需要量为 43.73%

**2.4.3 蛋白质生态营养需要量的计算** 将日增重折算为日增氮量,将水中氨氮和亚硝氮含量折算为单位体质量对虾的日有害氮排泄量,通过 3 次曲线

回归模拟,绘出日增氮量、日有害氮排泄量与饲料蛋白水平的关系图(图 3),得到对虾日增氮与饲料蛋白质水平的关系回归方程为:

$$y=-0.0010061x^3+0.1107745x^2-3.9181186x+47.8017531 \quad R^2 = 0.9896 \quad (2)$$

对虾日有害氮排泄与饲料蛋白质水平的关系回归方程为:

$$y=0.00151x^3-0.16687x^2+6.19462x-76.005725 \quad R^2 = 0.9687 \quad (3)$$

当方程(2)、(3)斜率相等时,确定对虾日增氮与日有害氮排泄均达到最佳值时饲料蛋白质的生态营养需要量为 40.42%。

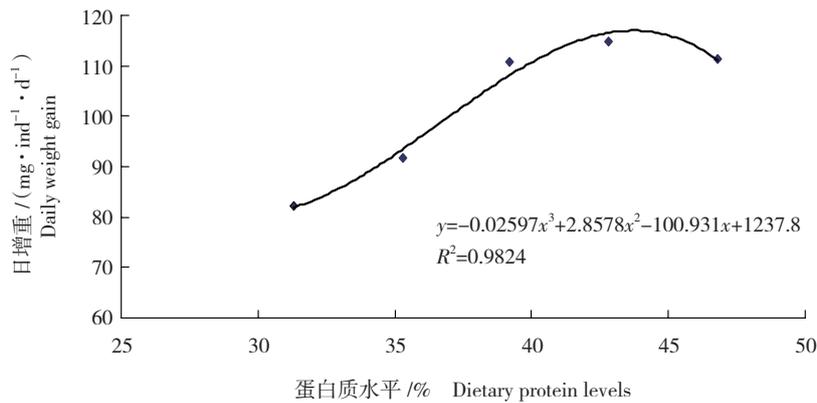


图 2 蛋白质水平与凡纳滨对虾日增重的关系

Fig. 2 The relationship between diet protein levels and daily weight gain of *Litopenaeus vannamei*

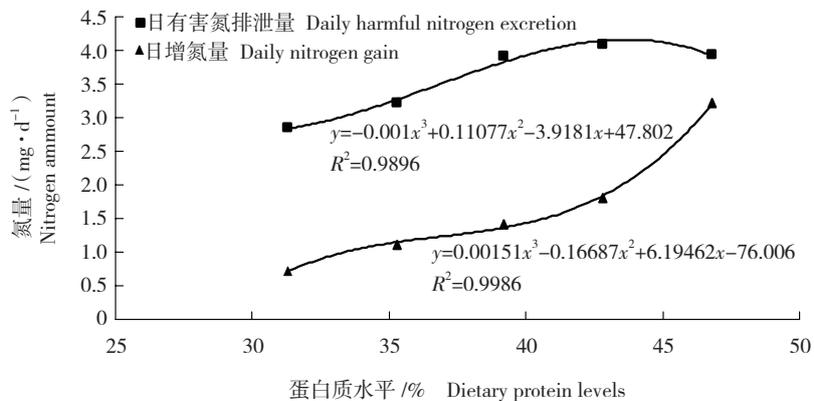


图 3 蛋白质水平与凡纳滨对虾沉积氮与有害氮排泄的关系

Fig. 3 The relationships between dietary protein levels and daily nitrogen gain or daily ammonia excretion of *Litopenaeus vannamei*

表5 蛋白质水平对凡纳滨对虾饲喂后氮、磷排泄的影响  
 Tab. 5 Effect of dietary protein level on nitrogen and phosphorus excretion of *Litopenaeus vannamei*

*n*=3;  $\bar{x} \pm SE$

指标 Indicator		实验组 Group				
		A	B	C	D	E
氨氮 / ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 虾体质量) $\text{NH}_4^+-\text{N}$	3 ~ 9 h	10.51 ± 0.30 <sup>e</sup>	15.75 ± 1.87 <sup>de</sup>	18.05 ± 1.20 <sup>cd</sup>	21.26 ± 2.45 <sup>c</sup>	32.10 ± 1.73 <sup>a</sup>
	9 ~ 15 h	2.61 ± 1.55 <sup>a</sup>	2.77 ± 0.65 <sup>a</sup>	2.85 ± 1.29 <sup>a</sup>	3.18 ± 0.84 <sup>a</sup>	4.75 ± 1.43 <sup>a</sup>
	3 ~ 15 h	13.12 ± 1.62 <sup>f</sup>	18.51 ± 1.80 <sup>cd</sup>	20.90 ± 1.72 <sup>cd</sup>	24.43 ± 1.71 <sup>c</sup>	36.85 ± 1.40 <sup>a</sup>
亚硝氮 / ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 虾体质量) $\text{NO}_2^--\text{N}$	3 ~ 9 h	3.38 ± 0.32 <sup>e</sup>	6.03 ± 1.70 <sup>de</sup>	7.99 ± 0.59 <sup>cd</sup>	12.29 ± 2.19 <sup>c</sup>	22.85 ± 2.04 <sup>a</sup>
	9 ~ 15 h	2.81 ± 1.12 <sup>e</sup>	4.13 ± 0.93 <sup>e</sup>	4.14 ± 1.60 <sup>e</sup>	4.59 ± 0.25 <sup>e</sup>	14.99 ± 0.66 <sup>a</sup>
	3 ~ 15 h	6.19 ± 0.94 <sup>e</sup>	10.16 ± 0.78 <sup>de</sup>	12.13 ± 1.27 <sup>cd</sup>	16.89 ± 2.00 <sup>c</sup>	37.84 ± 2.67 <sup>a</sup>
总有害氮 / ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 虾体质量) $\text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N}$	3 ~ 9 h	13.89 ± 0.19 <sup>b</sup>	21.77 ± 1.35 <sup>f</sup>	26.04 ± 1.75 <sup>e</sup>	33.55 ± 0.92 <sup>c</sup>	54.95 ± 0.33 <sup>a</sup>
	9 ~ 15 h	5.42 ± 0.88 <sup>e</sup>	6.90 ± 1.38 <sup>e</sup>	6.99 ± 1.65 <sup>e</sup>	7.77 ± 0.66 <sup>e</sup>	19.74 ± 1.70 <sup>a</sup>
	3 ~ 15 h	19.31 ± 0.86 <sup>b</sup>	28.67 ± 1.03 <sup>f</sup>	33.03 ± 0.47 <sup>e</sup>	41.32 ± 0.97 <sup>c</sup>	74.69 ± 1.94 <sup>a</sup>
磷酸盐 / ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 虾体质量) $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	3 ~ 9 h	1.83 ± 0.64 <sup>e</sup>	1.32 ± 0.26 <sup>e</sup>	1.90 ± 0.54 <sup>e</sup>	2.12 ± 0.53 <sup>e</sup>	5.18 ± 0.33 <sup>a</sup>
	9 ~ 15 h	4.51 ± 0.42 <sup>e</sup>	6.71 ± 0.62 <sup>a</sup>	6.42 ± 0.80 <sup>a</sup>	6.41 ± 0.97 <sup>a</sup>	9.28 ± 1.57 <sup>a</sup>
	3 ~ 15 h	6.33 ± 1.06 <sup>e</sup>	8.03 ± 0.54 <sup>e</sup>	8.31 ± 0.90 <sup>e</sup>	8.54 ± 0.89 <sup>e</sup>	14.46 ± 1.24 <sup>a</sup>
日氮排泄 / ( $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{ind}^{-1}$ ) Daily nitrogen excretion		0.717	1.119	1.415	1.802	3.209

注: A-E 分别表示 31%、35%、39%、43%、47% 5 个不同的蛋白质水平; 同一行数据右上角的相同字母表示差异不显著 ( $P>0.05$ ), 相邻字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ); 相间字母表示差异极显著 ( $P<0.01$ )。

Note: A, B, C, D, E represent the protein levels of 31%, 35%, 39%, 43% and 47%, respectively. Values in the same row with same superscript letters are not significantly different ( $P>0.05$ ). Adjacent superscript letters mean significant difference ( $P<0.05$ ), and secluded superscript letters mean extremely significant difference ( $P<0.01$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 蛋白质营养与水质变化特征

**3.1.1 有害氮浓度变化特征** 甲壳动物摄食含有过量蛋白质或氨基酸组成不平衡的饲料时,会导致外源氮的排泄量增加<sup>[14]</sup>。高蛋白饲料在对凡纳滨对虾造成负面影响的同时,也会增加水中氨氮和亚硝氮等有害物质的积累<sup>[15]</sup>。Martin 等<sup>[16]</sup>报道凡纳滨对虾摄食蛋白含量为 25%、30%、35% 和 40% 的饲料时,第 3 周养殖水体氨氮含量分别为 2.9 mg/L、4.9 mg/L、5.4 mg/L 和 6.7 mg/L,亚硝氮浓度为 0.062 mg/L、0.107 mg/L、0.294 mg/L 和 0.606 mg/L; Burford 等<sup>[8]</sup>报道,斑节对虾养殖水体中氮积累随饲料蛋白水平增加而升高,8 周后养殖水体总氮含量,40% 蛋白组比 30% 组高 79%。Koshlo<sup>[7]</sup>的研究表明,日本对虾摄食后 5 h 内的氨氮排泄量,50.3% 蛋白水平组比 21% 蛋白水平组高 193%。中华绒螯蟹摄食后 24 h 内,40.5% 蛋白组比 36% 蛋白组氨氮排泄率高 50%<sup>[5]</sup>。本研究中表现的趋势与上述研究

结果基本一致,饲喂后 3 ~ 15 h,随蛋白含量增加,水中氨氮、亚硝氮含量显著升高。当蛋白质水平在 39% 以下时,水体中氨氮、亚硝氮含量升高缓慢;超过 39% 以后,氨氮、亚硝氮含量升高迅速。这说明饲料蛋白质含量超过适宜水平后,虽然蛋白质消化量增加迅速(表 4),但是用于生长的比例减少,表现为增重率下降(表 2),大量蛋白质被用于代谢,氨氮排泄迅速升高。因此,在凡纳滨对虾养殖中,把水中有害氮作为确定适宜饲料蛋白含量的参数之一是非常重要的,但是,在本研究之前的国内外凡纳滨对虾蛋白质需要量研究中,都没有考虑饲料对水环境的具体影响。

**3.1.2 磷酸盐浓度变化特征** 虾、蟹等甲壳类动物吸收的磷大部分用于构成甲壳,此外还构成磷脂、肌酸、核酸等参与机体重要生理活动的物质。由于需要不断蜕皮,损失较多的磷,故磷的代谢旺盛且需求量较大<sup>[14]</sup>。林仕梅等<sup>[5]</sup>的研究表明,饲料中含 1.78% ~ 2.49% 磷时,中华绒螯蟹总磷和磷酸盐排泄率与饲料磷水平呈显著的线性正相关( $R>0.98$ ,

$P < 0.05$ ), 饲料总磷含量为 2.49% 和 2.21% 的组, 其磷酸盐排泄率分别比饲料磷含量为 1.78% 组高出 97.1% 和 39.8%。类似的结果在金鱼的研究中也有报道<sup>[17]</sup>。本实验与上述结果基本一致, 饲喂后 3 ~ 15 h, 磷酸盐排泄随着饲料总磷含量的增加而升高, E 组显著高于其他组。但是, 本实验中磷不是主要研究对象, 磷的增加是由于饲料中鱼粉含量增加造成的, 表现出磷含量随着蛋白质含量的升高而升高。因此, 饲料中蛋白质含量间接影响磷含量, 从而对磷排泄产生影响。关于凡纳滨对虾饲料适宜磷水平的研究报道不多, 尚待深入研究。

### 3.2 蛋白质营养与消化特征

本研究表明, 随着蛋白质含量(31% ~ 47%) 的增加, 凡纳滨对虾对蛋白质的消化率逐渐升高。与部分研究基本一致<sup>[18-20]</sup>。但是 Koshlo<sup>[7]</sup> 研究发现, 日本对虾饲料蛋白质的消化率随饲料蛋白含量(21% ~ 61%) 的增加, 表现为先上升后下降的曲线。从本研究配方看出, 饲料总消化率随着饲料蛋白质含量的增加, 碳水化合物含量的减少而显著下降。Guo 等<sup>[20]</sup> 研究表明, 凡纳滨对虾饲料总消化率随着饲料中碳水化合物的增加而升高。郭冉等<sup>[21]</sup> 在凡纳滨对虾研究中发现, 当饲料中蛋白含量一定时, 20% 玉米淀粉饲料组的总消化率高于 15% 含量组。Catacutan 等<sup>[22]</sup> 用 5% ~ 35% 糊化淀粉作为糖源添加到饲料中, 发现斑节对虾的饲料总消化率由 75.7% 上升到 86.9%。其原因在于: 一方面, 凡纳滨对虾消化道短, 饲料在体内的滞留时间受饲料成分的影响很大, 在一定范围内, 饲料中淀粉含量升高时, 可以延长饲料在对虾体内滞留时间, 有利于饲料与对虾消化酶充分混合, 促进饲料消化吸收<sup>[22]</sup>; 另一方面, 凡纳滨对虾是杂食性动物, 体内淀粉酶含量相对较高, 并且淀粉酶活力在一定范围内随着饲料碳水化合物的增加而升高<sup>[23]</sup>。

### 3.3 创新建立“蛋白质生态营养需要量”定量方法

目前国内外关于凡纳滨对虾蛋白质营养与氮磷排泄关系的研究未见报道。本研究蛋白质营养与凡纳滨对虾生长率、氮磷排泄的关系表明, 当蛋白质水平由 31% 升高到 43% 时, 氮、磷酸盐排泄增加相对

缓慢, 但是超过 43% 以后迅速升高; 蛋白质水平由 31% 增加到 39% 时, 增重率显著升高, 超过 39% 后变化不显著。这一结果基本符合蛋白质生态营养的菱形变化特征<sup>[13]</sup>, 即随饲料蛋白质水平增加, 鱼体增重与水体氨氮之间的增幅变化呈反向对应的菱形特征。蒋克勇等<sup>[2]</sup> 的研究表明, 大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 幼鱼的氨氮排泄在 45% ~ 50% 饲料蛋白水平范围内没有明显差异, 而在 50% ~ 54% 饲料蛋白水平范围内却随蛋白含量增加而显著增加; 相反, 体质量在 45% ~ 50% 蛋白组间增加显著, 而在 50% ~ 54% 蛋白组间增加不明显。Martin 等<sup>[16]</sup> 的实验表明, 35 盐度下凡纳滨对虾氨氮排泄随饲料蛋白质含量升高而显著上升, 其增重率随饲料蛋白含量升高先上升后下降, 在蛋白含量为 30% 时达到最大值, 但各组差异不显著。Burford 等<sup>[8]</sup> 的研究表明, 水中氮的积累随着饲料蛋白水平的增加而升高, 但是增重率变化不显著。可见, 这些对不同物种的研究所得到的基本趋势是相似的, 曲线的平缓与陡峭的差异可能是由动物种类、实验环境(有些在露天)以及养殖密度等不同造成的。

本研究首次把日增重与所测有害氮排泄量 2 个指标都换算成对虾个体日增氮与日排有害氮(表 2、5), 并经数学回归分析获得其与蛋白质水平的量化关系, 既统一了单位( $\text{mg/d} \cdot \text{ind}$ ), 又增加了可比性。图 3 表明, 随着饲料蛋白含量增加, 当蛋白在较低水平时, 饲料氮用于体内氮沉积的量增加迅速; 当蛋白质含量在较高水平时, 饲料氮经代谢后排泄量增加迅速。显然, 饲料蛋白质含量有一个最适宜水平, 低于此水平, 随蛋白质水平的增加, 体内沉积氮的相对比例增加, 而体外排泄氮的相对比例减少; 高于此水平, 随蛋白质水平的增加, 体内沉积氮相对比例减少, 而体外排泄氮相对比例增加。这一最适宜蛋白质水平在图 3 中的 2 条数学回归曲线上表现为斜率相等, 由此推算出蛋白质生态营养需要量为 40.42%。本研究创新构建了凡纳滨对虾日粮蛋白质水平与日增氮、日排有害氮的定量动态变化关系, 使对虾蛋白质生态营养需要量得以量化确定, 补充和完善了“菱形特征”, 进一步丰富了动物生态营养学的理论与实践。

## 参考文献:

- [1] 黄灿华,石正丽,张建红,等. 原位杂交研究对虾白斑杆状病毒在虾体内感染过程[J]. 病毒学报,2000,16(3): 242-246.
- [2] 蒋克勇,李勇,李军,等. 大菱鲂幼鱼蛋白质的生态营养需要量探寻[J]. 海洋科学,2005,29(9): 65-70.
- [3] 李勇,王雷,蒋克勇,等. 水产动物营养的生态适宜与环保饲料[J]. 海洋科学,2004,3: 76-78.
- [4] 袁春营,崔青曼. 通过营养调控降低养殖水体污染[J]. 饲料研究,2003,5: 25-27.
- [5] 林仕梅,罗莉,叶元土,等. 饲料蛋白能量比、非植酸磷水平对中华绒螯蟹氮、磷排泄和转氨酶活性的影响[J]. 中国水产科学,2001,8(4): 62-66.
- [6] Kemp J O G, Britz P J, Cockcroft A C. Ammonia excretion dynamics in the east coast rock lobster *Panulirus homarus rubellus* [J]. Aquaculture, 2009,286: 296-300.
- [7] Koshlo S. Effect of dietary protein levels on growth, feed utilization and nitrogen excretion of juvenile *Penaeus japonicus* [J]. Aquaculture, 1993, 113(1): 101-114.
- [8] Burford M A, Smith D M, Tabrett S J, et al. The effect of dietary protein on the growth and survival of the shrimp, *Penaeus monodon* in outdoor tanks [J]. Aquac Nutr, 2004, 10: 15-23.
- [9] Martinez-Cordova L, Campana Torres A, Porchas-Cornejo M. Dietary protein level and natural food management in the culture of blue (*Litopenaeus stylirostris*) and white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in microcosms [J]. Aquac Nutr, 2003, 9(3): 155-160.
- [10] Gomez-Jimenez S. Effect of dietary protein level on growth, survival and ammonia efflux rate of *Litopenaeus vannamei* (Boone) raised in a zero water exchange culture system [J]. Aquac Res, 2005, 36: 834-840.
- [11] 杨诗兴. 饲料营养价值评定方法[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 1982: 166-205.
- [12] 中华人民共和国标准局. GB 17378.4-1998 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [13] 李勇,蒋克勇,王美琴,等. 循环水养殖大菱鲂的生态营养需要与菱形特征[C]// 封闭循环水养殖-新理念·新技术·新方法. 北京: 中国教育文化出版社, 2009.
- [14] 李松青,林小涛,李卓佳,等. 摄食对凡纳滨对虾耗氧率和氮、磷排泄率的影响[J]. 热带海洋学报,2006,25(2): 44-48.
- [15] Schmitt A S, Santos E A. Ammonia-N efflux rate and nutritional state of juvenile pink shrimp, *Penaeus paulensis* (Perez-Farfante), in relation to food type [J]. Aquac Res, 1998, 29: 495-502.
- [16] Martin P V, Mayra L G, Fernando J B, et al. Investigation of the effects of salinity and dietary protein level on growth and survival of Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. J World Aquac Soc, 2007, 38(4): 475-485.
- [17] 崔奕波,剂建康,华俐. 摄食水平和食物种类对金鱼生长及氨、磷排泄的影响[J]. 水生生物学报,1991,15(3): 200-206.
- [18] 邓利,谢小军. 南方鲇的营养学研究: 人工饵料的消化率[J]. 水生生物学报,2000,24(4): 347-355.
- [19] 刘晓民,刘永发,唐瑞英. 异育银鲫的蛋白质消化率研究[J]. 水产学报,1995,19(1): 52-57.
- [20] Guo R, Liu Y J, Tian L X, Huang J W. Effect of dietary cornstarch levels on growth performance, digestibility and microscopic structure in the white shrimp, *Litopenaeus vannamei* reared in brackish water [J]. Aquac Nutr, 2006, 12: 83-88.
- [21] 郭冉,梁桂英,刘永坚,等. 糖和蛋白质水平对饲养于咸淡水中的凡纳滨对虾生长、体营养成分组成和消化率的影响[J]. 水产学报, 2007, 31(3): 355-360.
- [22] Catacutan M R, Coloso R M. Effect of dietary protein to energy ratios on growth, survival and body composition of juvenile *Asian Seabass* (lates calarifer) [J]. Aquaculture, 1995, 208: 113-123.
- [23] Gaxiola G, Cuzon G, Garcia T, et al. Factorial effects of salinity, dietary carbohydrate and moult cycle on digestive carbohydrases and hexokinases in *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) [J]. Biochem Physiol, 2005, 140A: 29-39.

## Eco-nutrition requirement of protein in high density *Litopenaeus vannamei* culture system

LI Yong<sup>1,2</sup>, XIA Sudong<sup>1,2</sup>, YU Xuequan<sup>3</sup>, TANG Shiqiao<sup>1</sup>, WANG Hua<sup>1,2</sup>, WANG Meiqin<sup>1</sup>, SUN Guoxiang<sup>1,2</sup>

( 1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Tianjin Seafood Industrial Development Co. Ltd., Tianjin 300450, China )

**Abstract:** An experiment was conducted for 60 days to determine the relationship between different dietary protein levels and growth performance, environment factors and digestive characteristics of white shrimp *Litopenaeus vannamei* in high density culture system. Four hundred and fifty white shrimps with average initial weight of  $(6.2 \pm 0.2)$  g were assigned randomly to five treatments groups with three replicates and were fed diets with 5 different protein levels which were 31%, 35%, 39%, 43% and 47%, respectively in average stock density of 3.1 kg/m<sup>3</sup>. The results were as follows: ( 1 ) As the protein levels increased, the weight gain rate rose at first and then decreased, while the feed conversion ratio had the opposite tendency. Shrimps fed with 43% dietary protein got the best growth performance. ( 2 ) Seawater factors such as  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  and suspended substance (SS) were affected significantly by dietary protein levels ( $P < 0.05$ ), and all of them increased with protein levels increasing. The environmental factors of the group fed with 47% dietary protein were different from those of other groups significantly ( $P < 0.05$ ). ( 3 ) Total apparent digestion rate decreased with the increase of protein level, while the protein digestion rate increased significantly ( $P < 0.05$ ). ( 4 ) We have innovatively qualified the dynamic relationship between nitrogen excretion or nitrogen gain and the increasing dietary protein levels, so that the exact requirement of protein can be calculated. Based on the growth performance, 43.73% may be recommended as the conventional requirement of protein with the biggest growth rate for adult white shrimps in high density culture system. However, 40.42% may be recommended as the eco-nutrition requirement of protein with the optimum growth and nitrogen excretion. [Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17 ( 2 ) : 78–87]

**Key words:** *Litopenaeus vannamei*; eco-nutrition requirement; high density; environment factors; digestibility