

盐度和营养对凡纳滨对虾蜕壳和生长的影响

申玉春*, 陈作洲, 刘丽, 李再亮, 吴灶和

(广东海洋大学水产学院,南海水产经济动物增殖广东省普通高校重点实验室,广东 湛江 524025)

摘要: 采用实验生态学方法以初始体质量为 (2.01 ± 0.02) g的凡纳滨对虾为研究对象,投喂不同蛋白水平饲料,实验周期30 d,研究了盐度和饲料蛋白水平对凡纳滨对虾蜕壳和生长的影响。实验采用 5×3 析因设计,盐度梯度设置为6、12、18、24、30五个水平,饲料蛋白水平梯度设置为30%、36%、42%三个水平。结果表明:(1)对虾蜕壳相对增重率呈现出随盐度上升而降低的变化趋势,以盐度为6时蜕壳相对增重率为最高。盐度和饲料蛋白水平及其交互作用对实验对虾蜕壳相对增重率影响差异显著($P < 0.05$);对虾的特定生长率随盐度升高而上升,盐度和饲料蛋白水平对特定生长率影响差异显著($P < 0.05$),其交互作用对特定生长率影响差异不显著。(2)实验对虾的蜕壳频率,在低盐度水平下随盐度的增加而显著增加($P < 0.05$),盐度18时蜕壳频率达到最高,之后随盐度的升高蜕壳频率下降,差异不显著。各盐度水平下,以中等蛋白质水平饲料组(36%)对虾蜕壳频率较高。方差分析表明,盐度和饲料蛋白水平对蜕壳频率影响差异显著($P < 0.05$),其交互作用对蜕壳频率影响差异不显著。(3)对虾蜕壳间期随盐度升高呈先延长后缩短的变化趋势。盐度对对虾蜕壳间期影响差异显著($P < 0.05$),饲料蛋白水平单因子以及它和盐度的交互作用对对虾蜕壳间期影响不显著。

关键词: 凡纳滨对虾; 盐度; 营养; 蜕壳; 生长

中图分类号: S 966.1

文献标志码: A

甲壳动物的生长必须经过蜕壳才能进行。对虾一生要经过多次蜕壳,而使躯体增大。一般认为对虾生长是通过蜕壳来实现其阶梯式体长体质量增长的,即在蜕壳时体长快速增加,而蜕壳后到下次蜕壳前体长增加很少^[1]。蜕壳一方面受体内蜕壳激素的调控,另一方面与盐度、温度、光照、营养水平等外界生态因子密切相关。由于甲壳动物的组织生长是在蜕壳后进行的,每次蜕壳后的吸水膨胀是体积增大的主要过程,随后是组织生长的过程。因此为加快生长和变态的速率,缩短养殖周期,在实验研究和生产中常采用改变外界环境条件或调节体内激素水平提高甲壳动物的蜕皮频率。研究表明,斑节对虾、罗氏沼虾在低盐度条件下蜕壳周期较短^[2-3]。中国明对虾在较低幅度盐度波动水平下养殖会缩短蜕壳周期^[4]。凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)在较低盐

度环境条件下生长较快,高盐度水体则会抑制其生长^[5]。饲料的营养水平对中国对虾蜕壳和生长有显著的影响^[6]。在营养不良或蜕壳周期太短的情况下,甲壳动物蜕壳后的体质量和个体规格会变小,甚至出现负增长,或体质量和头胸甲的每次蜕壳增长量下降^[7-11]。有关不同盐度下,饲料蛋白质含量对凡纳滨对虾的影响仅限于对虾生长成活、饲料转化率及极低盐度下饲料蛋白水平对对虾生长和免疫力的影响^[12-14],而对于盐度和营养,及其交互作用对凡纳滨对虾蜕壳的影响研究未见报道。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验在湛江市东海岛对虾良种养殖基地进行,该养殖基地所在自然海区盐度为30~32。实验用

收稿日期:2011-09-16 修回日期:2011-11-12

资助项目:广东省自然科学基金项目(10152408801000005);广东省科技计划项目(2011B031100012,2008B020800009,2010B020308004,2007A032600004)

通讯作者:申玉春,E-mail:shenyuchun@163.com

凡纳滨对虾初始体质量(湿重)为(2.01 ± 0.02) g。实验对虾在 5 个玻璃钢纤维水槽(200 cm × 80 cm × 65 cm)中暂养 3 d,暂养盐度为 24,水温为(28.0 ± 1.0) °C。在暂养盐度基础上,以每天降低或升高 6 个盐度的速率使 5 个暂养水槽水体的盐度最终分别为 6、12、18、24、30 五个水平,驯养 7 d。

1.2 实验饲料

实验饲料以鱼粉、豆粕、花生粕为蛋白源,鱼油和磷脂为脂肪源,设计低蛋白水平(30%,以 A 表示)、中等蛋白水平(36%,以 B 表示)、高蛋白水平三组(42%,以 C 表示),其蛋白质水平实测值分别为 29.78%、36.31%、42.84% (表 1)。饲料原料经粉碎过 80 目筛,用双螺杆压条机制成直径 1.6 mm 的颗粒,65 °C 烘干,4 °C 冷藏备用。

表 1 实验饲料配方及营养组成(干物质)

Tab. 1 Formulation and proximate composition of experimental diets(dry matter)

饲料组成/% dietary composition	A	B	C
鱼粉 fish meal	22	33	44
豆粕 soybean meal	18	16	14
花生粕 peanut meal	0	2	4
玉米粉 corn meal	20	10	0
面粉 wheat flour	28	27	26
鱿鱼内脏粉 squid viscera powder	2	2	2
鱼油 fish oil	3.5	3.0	2.5
卵磷脂 lecithin	2	2	2
胆固醇 cholesterol	0.25	0.25	0.25
褐藻酸钠 sodium alginate	1.5	1.5	1.5
复合矿物质 ⁽¹⁾ grandidierite	1	1	1
复合维生素 ⁽²⁾ vitamin complex	1.75	1.75	1.75
营养组成 nutritional composition			
粗蛋白/% crude protein	29.78	36.31	42.84
脂肪/% crude lipid	9.43	9.79	10.02
能量/(kJ/g) energy	16.92	17.88	18.26

注:(1)复合矿物质(g/100 g 预混料):CoCl₂,0.001;CuSO₄·5H₂O,0.062 5;FeSO₄,1.0;MgSO₄·7H₂O,7.099 5;MnSO₄·H₂O,0.162 5;KI,0.016 7;Na₂SeO₃,0.002 5;ZnSO₄·7H₂O,3.298;载体,83.357 3。(2)复合维生素(g/kg 预混料):VB₁,0.5;VB₂,3.0;VB₆,1.0;泛酸钙,5.0;烟碱酸,5.0;生物素,0.05;叶酸,0.18;VB₁₂,0.002;氯化胆碱,100.0;肌醇,5.0;VK,2.0;VA,5.0;VD₃,0.002;VE,8.0;a-纤维素,865.266。

Notes:(1)Grandidierite(g/100 g premix):CoCl₂,0.001;CuSO₄·5H₂O,0.062 5;FeSO₄,1.0;MgSO₄·7H₂O,7.099 5;MnSO₄·H₂O,0.162 5;KI,0.016 7;Na₂SeO₃,0.002 5;ZnSO₄·7H₂O,3.298;Vector,83.357 3。(2)Vitamin complex(g/kg premix):VB₁,0.5;VB₂,3.0;VB₆,1.0;Calcium pantothenate,5.0;Antipellagra vitamin,5.0;Biotin,0.05;Folic acid,0.18;VB₁₂,0.002;Choline chloride,100.0;Inositol,5.0;VK,2.0;VA,5.0;VD₃,0.002;VE,8.0;a-micro-cellulose,865.266。

1.3 实验方法

对虾蜕壳生长实验采用 5 × 3 析因设计,每个水族箱(容积 200 L,养殖水体 150 L)放养试验对虾 20 尾,每个处理设 3 个重复,共 45 组。水族箱的排列采用完全随机化区组设计。实验期间 5 个盐度水平均分别投喂 A、B、C 三种饲料,日投喂 3 次(7:00,12:00,18:00),过量投喂,投饵 2 h 后吸污。日换水量 1/3,低盐度海水用过滤海水加地下水配制,高盐度海水用过滤海水加海水晶配制。所用海水经砂滤、沉淀、曝气。养殖水体溶氧维持在 6.0 mg/L 以上,氨氮控制在 0.24 mg/L 以下,pH 7.7 ~ 8.2。光周期 14 L:10 D,水温(28.0 ± 1.0) °C。实验周期 30 d,每天记录对虾死亡数量。吸污的同时收集对虾的蜕壳。由于对虾有摄食蜕壳的行为,且足部和腹部最容易先被摄食,而头胸甲,尤其是额剑部分,以及尾扇则较难摄食。因此,对虾蜕壳的收集与数目的确定,以头胸甲和尾扇的数目为标准,以 24 h 作为一个记录周期。实验分组和实验结束前 24 h 停止投喂。实验开始前与结束时分别用电子天平称量对虾体重,精确至 0.01 g,称重时用滤纸吸去实验虾体表水分。实验初始,另外称取 45 尾对虾在 65 °C 条件下烘干至恒重,用于测定实验对虾的初始干重、全虾的蛋白含量以及能值(干重)。实验结束后将各处理组的对虾称取湿重后在 65 °C 条件下烘干至恒重,用于测定实验对虾的终末干重、全虾的蛋白含量以及能值(干重)。蛋白质用凯氏定氮法测定,能量用 5E-1C 型电脑量热仪测定。

1.4 数据分析

存活率(SU,%)、蜕壳频率(MT,%)和蜕壳间期(IP,d)、蜕壳相对增重率(%)、特定增长率(%/d)、摄食量(FI_d,%,每日体质量百分数)和饲料转化效率(FCE_d,%)分别按下列公式计算:

$$\text{存活率}(SU, \%) = 100 \times (N_0 - N_t) / N_0$$

$$\text{蜕壳频率}(MT, \%) = 100 \times (N_m / N_s)$$

$$\text{蜕壳间期}(IP, d) = \sum T / N_m$$

$$\text{蜕壳体重相对增重率}(\%) = 100 \times [(W_t - W_0) / MT] / W_0$$

$$\text{蜕壳体长相对增长率}(\%) = 100 \times [(L_t - L_0) / MT] / L_0$$

$$\text{特定增长率}(\%/d) = 100 \times (\ln W_2 - \ln W_1) / T$$

$$\text{摄食量}(FI_d, \%, \text{每日体质量百分数}) = 100 \times$$

$$F/[T \times (W_2 + W_1)/2]$$

$$\text{饲料转化效率}(FCE_d, \%) = 100 \times (W_2 - W_1)/F$$

其中,对虾体质量为湿重和干重(W, g), W_0 、 W_1 分别为实验开始及结束时对虾的湿重, W_1 、 W_2 分别为实验开始及结束时对虾的干重; L_0 、 L_1 分别为实验开始及结束时对虾的体长; N_0 、 N_1 分别为实验初始及结束时对虾的数量, N_m 为每个水族箱的蜕壳总次数, N_s 为每个水族箱的初始虾尾数; F 为摄食量(干重); T 为实验持续时间(d)。同时以蛋白质和能量的形式计算特定生长率、摄食量和饲料转化效率 3 个指标, 分别以 SGR_p , FI_p , FCE_p 和 SGR_e , FI_e , FCE_e 表示。

采用 SPSS 11.5 对实验数据进行单因素以及双因素方差分析, Duncan 氏多重比较, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平, 描述性统计值采用平均值 \pm 标准误 (mean \pm SE) 表示。采用 SigmaPlot 3.5 对实验数据进行回归拟合。

2 结果

2.1 盐度和饲料蛋白水平对对虾蜕壳的影响

实验对虾的蜕壳频率在低盐度水平下随着盐度的增加而显著增加 ($P < 0.05$), 盐度 18 实验组拥有最高的蜕壳频率; 而后随盐度的升高蜕壳频率下降, 差异不显著 (表 2)。在不同的盐度水平下实验对虾蜕壳间期呈单谷模型, 在 6 ~ 18 盐度范围内, 蜕壳间期随盐度的升高而缩短, 在盐度 18 实验组蜕壳间期最短, 之后随盐度上升而延长, 盐度 6 和其它盐度实验组差异显著 ($P < 0.05$)。在 A、B、C 三种饲料水平下, 仅盐度为 12、18、30 的 B 饲料组以及盐度 18 的 C 饲料组拥有较高的蜕壳频率, 且差异不显著 ($P \geq 0.05$), 其它实验组不同的营养水平间蜕壳频率亦没有显著差异。在 A、B、C 三种饲料水平下, 盐度 6 实验组蜕壳间期分别与其它盐度组差异显著 ($P < 0.05$)。方差分析表明, 盐度对实验对虾蜕壳频

表 2 盐度和饲料蛋白水平对凡纳滨对虾蜕壳和生长的影响

Tab. 2 The effects of salinity and dietary protein levels on molt and growth of *L. vannamei*

盐度 salinity	饲料 diet	存活率/% survival rate	蜕壳频率/% molting frequency	蜕壳间期/d intermolt period	蜕壳体质量相对 增重率/% relative weight gain of molting	蜕壳体长相对 增长率/% relative length gain of molting
6	A	83.33 \pm 1.67 ^a	90.00 \pm 2.89 ^a	27.84 \pm 1.08 ^d	200.61 \pm 9.30 ^c	63.62 \pm 4.5 ^{ef}
	B	88.33 \pm 7.64 ^{abc}	95.00 \pm 5.00 ^a	28.18 \pm 2.81 ^d	189.83 \pm 7.33 ^{bc}	55.78 \pm 5.7 ^{cde}
	C	86.67 \pm 4.41 ^{ab}	85.00 \pm 2.89 ^a	30.73 \pm 2.45 ^d	256.20 \pm 17.66 ^d	69.25 \pm 5.14 ^f
12	A	88.33 \pm 4.41 ^{abc}	125.00 \pm 5.00 ^b	21.25 \pm 1.25 ^{abc}	171.23 \pm 8.44 ^{bc}	53.92 \pm 0.23 ^{cde}
	B	93.33 \pm 1.67 ^{bcd}	175.00 \pm 8.66 ^{ef}	16.10 \pm 1.04 ^a	121.89 \pm 1.64 ^a	35.99 \pm 2.91 ^a
	C	91.67 \pm 4.41 ^{abcd}	130.00 \pm 5.77 ^{bc}	21.20 \pm 1.09 ^{abc}	204.22 \pm 18.70 ^c	57.76 \pm 4.22 ^{de}
18	A	93.33 \pm 1.67 ^{bcd}	155.00 \pm 5.77 ^{def}	18.09 \pm 0.42 ^{abc}	169.70 \pm 4.21 ^{bc}	47.51 \pm 1.17 ^{abcd}
	B	96.67 \pm 1.67 ^{cd}	180.00 \pm 8.66 ^f	16.16 \pm 0.57 ^a	156.28 \pm 5.57 ^{abc}	45.42 \pm 2.14 ^{abc}
	C	95.00 \pm 0.00 ^{bcd}	170.00 \pm 12.58 ^{def}	16.94 \pm 1.17 ^{ab}	164.50 \pm 4.11 ^{abc}	41.92 \pm 0.2 ^{ab}
24	A	95.00 \pm 2.89 ^{bcd}	130.00 \pm 10.41 ^{bc}	22.20 \pm 1.87 ^{bc}	186.57 \pm 12.31 ^{bc}	47.33 \pm 2.73 ^{abcd}
	B	96.67 \pm 1.67 ^{cd}	130.00 \pm 12.58 ^{bc}	22.73 \pm 2.21 ^c	203.64 \pm 21.48 ^c	56.37 \pm 4.95 ^{def}
	C	96.67 \pm 3.33 ^{cd}	145.00 \pm 5.00 ^{bcd}	20.00 \pm 0.00 ^{abc}	182.27 \pm 5.46 ^{bc}	47.79 \pm 1.68 ^{bcd}
30	A	96.67 \pm 3.33 ^{cd}	140.00 \pm 5.77 ^{bc}	20.79 \pm 1.16 ^{abc}	174.55 \pm 5.61 ^{bc}	49.6 \pm 0.89 ^{bcd}
	B	98.33 \pm 1.37 ^d	170.00 \pm 12.58 ^{def}	17.59 \pm 1.59 ^{abc}	149.15 \pm 15.54 ^{ab}	41.73 \pm 3.95 ^{ab}
	C	98.33 \pm 1.67 ^d	150.00 \pm 16.07 ^{bcd}	20.18 \pm 2.44 ^{abc}	184.47 \pm 34.49 ^{bc}	50.17 \pm 5.24 ^{bcd}
方差分析 variance analysis (P 值)	盐度 salinity	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	饲料 diet	0.197	0.002	0.149	0.003	0.019
	盐度 \times 饲料 salinity \times diet	0.999	0.082	0.364	0.033	0.005

注: 上述数据为 3 个平行组的平均值 ($n=3$)。同列数据右上角标有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。方差分析 (P 值) 为单因素方差分析与双因素方差分析。

Notes: Values (expressed as mean \pm S. E., $n=3$) with different superscripts in the same column are significantly different from each other ($P < 0.05$). Variance analysis were One-Way anova and Two Way Anova.

率和蜕壳间期影响差异显著($P < 0.05$),饲料蛋白水平对蜕壳频率影响差异显著($P < 0.05$),对蜕壳间期影响差异不显著($P \geq 0.05$)。盐度和蛋白水平双因子交互作用对对虾蜕壳频率影响差异不显著($P \geq 0.05$),对蜕壳间期影响差异显著($P < 0.05$)。

2.2 盐度和饲料蛋白水平对对虾存活和生长的影响

在实验盐度范围内,随着盐度的升高,对虾蜕壳存活率逐渐上升(表 2)。在 A、B、C 三种饲料水平下,同一盐度下,对虾蜕壳存活率差异不显著($P \geq 0.05$)。方差分析结果显示,盐度对对虾蜕壳存活率影响差异显著($P < 0.05$),饲料蛋白水平对对虾蜕壳存活率影响差异不显著($P \geq 0.05$)。盐度和蛋白水平双因子交互作用对对虾蜕壳存活率影响差异不显著($P \geq 0.05$)。

蜕壳体质量相对增重率呈现出随盐度上升而降低的变化趋势,盐度 6 实验组拥有最高的蜕壳相对增重率。在 A、B、C 三种饲料水平下,盐度为 12、30 的 B 饲料对虾蜕壳相对增重率最低,且差异不显著($P \geq 0.05$),其它实验组不同的营养水平间蜕壳相对增重率没有显著差异。方差分析结

果显示,盐度对对虾蜕壳相对增重率有显著影响($P < 0.05$),饲料蛋白水平对对虾蜕壳相对增重率影响差异也显著($P < 0.05$)。盐度和蛋白水平双因子交互作用对对虾蜕壳相对增重率影响差异不显著($P < 0.05$)。

蜕壳体长相对增长率变化趋势同体重相对增重率,也呈现出随盐度上升而降低的变化趋势,盐度 6 实验组拥有最高的蜕壳体长相对增长率。方差分析结果显示,盐度对对虾蜕壳体长相对增长率有显著影响($P < 0.05$),饲料蛋白水平对对虾蜕壳体长相对增长率影响差异也显著($P < 0.05$)。盐度和蛋白水平双因子交互作用对对虾蜕壳体长相对增长率影响差异显著($P < 0.05$)。

不同盐度和饲料蛋白水平对实验对虾特定生长率的影响见表 3。随盐度和饲料蛋白水平的升高,特定生长率呈上升趋势,盐度 18 的 B 饲料组拥有最高的特定生长率。方差分析结果显示,盐度对对虾特定生长率有显著影响($P < 0.05$),饲料蛋白水平对对虾特定生长率影响差异也显著($P < 0.05$)。盐度和蛋白水平双因子交互作用对对虾蜕壳相对增重率影响差异不显著($P \geq 0.05$)。用蛋白质和能量表示的特定生长率亦呈相似的结果。

表 3 盐度和饲料蛋白水平对凡纳滨对虾特定生长率的影响

Tab. 3 The effects of salinity and dietary protein levels on specific growth rate of *L. vannamei*

盐度 salinity	饲料 diet	特定生长率/(%/d) SGR_d specific growth rate	特定生长率/(%/d) SGR_p specific growth rate	特定生长率/(%/d) SGR_e specific growth rate
6	A	3.43 ± 0.03 ^a	3.54 ± 0.03 ^a	3.51 ± 0.03 ^a
	B	3.43 ± 0.11 ^a	3.53 ± 0.11 ^a	3.51 ± 0.11 ^a
	C	3.84 ± 0.08 ^b	3.94 ± 0.08 ^b	3.92 ± 0.08 ^b
12	A	3.81 ± 0.04 ^b	3.91 ± 0.04 ^b	3.89 ± 0.04 ^b
	B	3.80 ± 0.11 ^b	3.90 ± 0.11 ^b	3.88 ± 0.11 ^b
	C	4.30 ± 0.21 ^{cd}	4.40 ± 0.21 ^{cd}	4.38 ± 0.21 ^{cd}
18	A	4.29 ± 0.04 ^{cd}	4.40 ± 0.04 ^{cd}	4.38 ± 0.04 ^{cd}
	B	4.45 ± 0.08 ^d	4.55 ± 0.08 ^d	4.54 ± 0.08 ^d
	C	4.43 ± 0.13 ^d	4.53 ± 0.13 ^d	4.52 ± 0.13 ^d
24	A	4.08 ± 0.04 ^{bc}	4.18 ± 0.04 ^{bc}	4.16 ± 0.04 ^{bc}
	B	4.26 ± 0.09 ^{cd}	4.36 ± 0.09 ^{cd}	4.35 ± 0.09 ^{cd}
	C	4.31 ± 0.11 ^{cd}	4.40 ± 0.11 ^{cd}	4.39 ± 0.11 ^{cd}
30	A	4.12 ± 0.04 ^{bcd}	4.21 ± 0.04 ^{bcd}	4.20 ± 0.04 ^{bcd}
	B	4.17 ± 0.07 ^{cd}	4.27 ± 0.07 ^{cd}	4.25 ± 0.07 ^{cd}
	C	4.32 ± 0.17 ^{cd}	4.41 ± 0.17 ^{cd}	4.40 ± 0.17 ^{cd}
方差分析 variance analysis (P 值)	盐度 salinity	0.000	0.000	0.000
	饲料 diet	0.000	0.000	0.000
	盐度 × 饲料 salinity × diet	0.289	0.291	0.289

采用 SigmaPlot 3.5 拟合实验对虾特定生长率 (SGR) 与盐度 (S) 的回归关系如下: 29.78% 蛋白水平 $SGR = -0.0027S^2 + 0.1254S + 2.766$ ($R^2 = 0.9003$), 36.31% 蛋白水平 $SGR = -0.0035S^2 + 0.158S + 2.56$ ($R^2 = 0.9035$), 42.84% 蛋白水平 $SGR = -0.0023S^2 + 0.0983S + 3.374$ ($R^2 = 0.8936$)。在 3 个蛋白质水平, 凡纳滨对虾生长的最适盐度分别为 23.22, 22.57 和 21.37。采用 SigmaPlot 3.5 拟合实验对虾特定生长率 (SGR) 与盐度 (S) 和蛋白水平 (P) 的复合关系如下: $SGR = 2.796 + 0.0253S + 0.0225P$ ($R^2 = 0.584$)。

2.3 盐度和饲料蛋白水平对对虾摄食量和饲料转化效率的影响

不同盐度和饲料蛋白水平对实验对虾摄食量的影响见表 4。随盐度的升高, 实验对虾的摄食量总体呈降低趋势, 盐度 24 的 B 饲料组实验对虾摄食量最低, 盐度 6 的 C 饲料组实验对虾摄食量最高。方差分析结果显示, 盐度对对虾摄食量有显著影响 ($P < 0.05$), 饲料蛋白水平对对虾摄食量影响差异也显著 ($P < 0.05$)。盐度和蛋白水平双因子交互作用对对虾摄食量影响差异不显著 ($P \geq 0.05$)。用蛋白质和能量表示的摄食量亦呈相似的结果。

表 4 盐度和饲料蛋白水平对凡纳滨对虾摄食量的影响
Tab. 4 The effects of salinity and dietary protein levels on food intake of *L. vannamei* %

盐度 salinity	饲料 diet	摄食量 FI_d food intake	摄食量 FI_p food intake	摄食量 FI_e food intake
6	A	10.56 ± 1.30 ^{de}	6.71 ± 0.85 ^{bcd}	8.80 ± 1.08 ^{def}
	B	10.65 ± 0.44 ^{de}	7.94 ± 0.33 ^d	9.38 ± 0.39 ^{ef}
	C	11.48 ± 0.33 ^e	9.68 ± 0.29 ^e	10.33 ± 0.29 ^f
12	A	8.99 ± 0.39 ^{abcd}	5.65 ± 0.26 ^{abc}	7.47 ± 0.32 ^{abcd}
	B	8.97 ± 0.57 ^{abcd}	6.61 ± 0.43 ^{bcd}	7.88 ± 0.50 ^{abcde}
	C	9.54 ± 0.95 ^{cde}	7.95 ± 0.78 ^d	8.57 ± 0.86 ^{cde}
18	A	9.09 ± 0.26 ^{abcd}	5.64 ± 0.16 ^{abc}	7.54 ± 0.21 ^{abcde}
	B	7.36 ± 0.38 ^{ab}	5.34 ± 0.29 ^{ab}	6.45 ± 0.33 ^a
	C	9.54 ± 0.62 ^{cde}	7.86 ± 0.51 ^d	8.56 ± 0.55 ^{cde}
24	A	9.42 ± 0.78 ^{bcde}	5.60 ± 0.48 ^{abc}	7.77 ± 0.65 ^{abcde}
	B	7.02 ± 0.54 ^a	4.89 ± 0.39 ^a	6.12 ± 0.47 ^a
	C	9.47 ± 0.82 ^{bcde}	7.51 ± 0.65 ^d	8.46 ± 0.74 ^{bcde}
30	A	8.24 ± 0.38 ^{abc}	4.73 ± 0.22 ^a	6.77 ± 0.31 ^{abc}
	B	7.68 ± 0.26 ^{abc}	5.25 ± 0.17 ^{ab}	6.69 ± 0.22 ^{ab}
	C	8.86 ± 0.55 ^{abcd}	6.88 ± 0.40 ^{cd}	7.93 ± 0.49 ^{abcde}
方差分析 variance analysis (P 值)	盐度 salinity	0.000	0.000	0.000
	饲料 diet	0.004	0.000	0.001
	盐度 × 饲料 salinity × diet	0.588	0.526	0.563

不同盐度和饲料蛋白水平对实验对虾饲料转化效率的影响见表 5。随盐度和饲料蛋白水平的升高, 实验对虾饲料转化效率呈上升趋势, 盐度 30 的 B 饲料组拥有最高的饲料转化效率。方差分析结果显示, 盐度对对虾饲料转化效率有显著影响 ($P < 0.05$), 饲料蛋白水平对对虾饲料转化效率影响差异也显著 ($P < 0.05$)。盐度和蛋白水平双因子交互作用对对虾饲料转化效率影响差异

不显著 ($P \geq 0.05$)。用蛋白质和能量表示的饲料转化效率亦呈相似的结果。

2.4 蜕壳间期和蜕壳相对增重率的关系

对虾蜕壳后相对增重率随着蜕壳间期的延长而增加。回归分析表明, 对虾蜕壳间期和蜕壳相对增重率间呈正相关关系, 关系式为 $y = 5.9146x + 54.839$ ($R^2 = 0.6632$) (图 1)。

表 5 盐度和饲料蛋白水平对凡纳滨对虾饲料转化效率的影响
 Tab. 5 The effects of salinity and dietary protein levels on feed conversion rate of *L. vannamei* %

盐度 salinity	饲料 diet	饲料转化效率	饲料转化效率	饲料转化效率
		FCE_d feed conversion rate	FCE_p feed conversion rate	FCE_c feed conversion rate
6	A	26.08 ± 3.48 ^a	42.50 ± 5.77 ^{abc}	32.13 ± 4.28 ^a
	B	26.53 ± 1.02 ^{ab}	36.67 ± 1.40 ^{ab}	30.86 ± 1.19 ^a
	C	26.98 ± 1.47 ^{ab}	32.78 ± 1.80 ^a	30.58 ± 1.60 ^a
12	A	34.93 ± 3.09 ^{abc}	57.01 ± 5.04 ^{cdef}	42.85 ± 3.71 ^{ab}
	B	36.75 ± 2.75 ^{abcd}	51.04 ± 3.84 ^{bcd}	42.61 ± 3.21 ^{ab}
	C	38.68 ± 6.62 ^{cd}	47.24 ± 7.90 ^{abc}	43.75 ± 7.43 ^{ab}
18	A	39.95 ± 1.81 ^{cd}	65.65 ± 2.88 ^{efg}	48.92 ± 2.16 ^{bc}
	B	52.07 ± 2.56 ^c	73.06 ± 3.88 ^g	60.24 ± 2.90 ^{cd}
	C	39.92 ± 3.70 ^{cd}	49.31 ± 4.55 ^{bcd}	45.14 ± 4.10 ^b
24	A	37.76 ± 3.17 ^{bcd}	64.92 ± 5.65 ^{defg}	46.60 ± 3.95 ^b
	B	53.16 ± 4.56 ^c	77.70 ± 6.80 ^g	61.94 ± 5.26 ^d
	C	39.96 ± 4.72 ^{cd}	51.22 ± 5.95 ^{bcd}	45.39 ± 5.31 ^b
30	A	43.69 ± 3.13 ^{cde}	77.61 ± 5.57 ^g	54.06 ± 3.86 ^{bcd}
	B	47.83 ± 2.58 ^{de}	71.17 ± 3.59 ^{fg}	55.68 ± 2.86 ^{bcd}
	C	42.86 ± 4.12 ^{cde}	56.08 ± 5.12 ^{cdef}	48.60 ± 4.62 ^{bc}
方差分析 variance analysis (P 值)	盐度 salinity	0.000	0.000	0.000
	饲料 diet	0.011	0.000	0.018
	盐度 × 饲料 salinity × diet	0.290	0.200	0.280

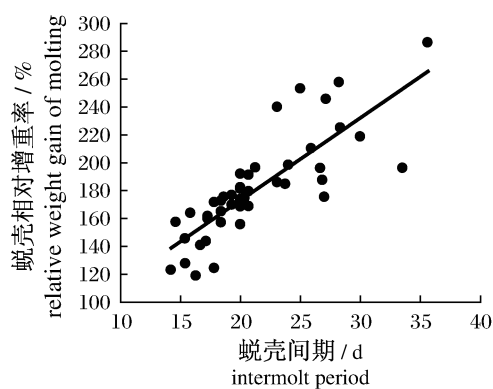


图 1 蜕壳间期和蜕壳相对增重率的关系
 Fig. 1 The relationship between intermolt period and relative weight gain

3 讨论

3.1 凡纳滨对虾蜕壳与生长的关系

一般认为甲壳动物每次蜕壳后的增长是按照相同的体长百分数增加,这在日本对虾^[15]和白对虾^[16]的研究结果中得到证实。蜕壳是对虾生活史中的必然过程,每次蜕壳只为对虾的生长提供机会,但对虾频繁蜕壳并不一定可使生长加

快^[17]。饵料、盐度、温度等环境因子对甲壳类蜕壳后的增长有显著的影响^[15,18-19]。本实验在饱食状态下,凡纳滨对虾摄食不同蛋白水平的饲料后每次蜕壳的体质量体长增长差异显著(表 2)。表明足够的饲料摄入量和一定水平的营养条件才能保证对虾顺利蜕壳,实现其体长体质量的增长。迅速降低盐度、升高温度可刺激对虾加快蜕壳,但蜕壳频率的增加并未导致其生长加快^[20]。一些甲壳类的幼体即使在饥饿状态下也可以蜕壳,但蜕壳后的干重和能量明显比摄食组小^[8-9,11]。进一步说明甲壳类动物的蜕壳过程对外源性营养需求较少,而蜕壳后动物体的增长则依赖外源饲料供给。蜕壳与生长存在一定的关系,但不一定总呈正相关。这与本实验结果短的蜕壳间期下生长并不是最快的一致。Freeman^[21]认为甲壳类幼体的生长和蜕壳步调一致,但两种生理活动的调节方式是各自独立的。尽管蜕壳和生长是结合进行的,但蜕壳是一种节律性极强的活动,主要受体内蜕壳激素调控,而生长则受环境中饲料的质量与数量等因素的影响,只有当各种因素都适合时对对虾才能加快生长,从而引起蜕壳,否则对虾即使蜕壳也不生长,甚至出现负生长,不正常的蜕壳往往

也是造成对虾死亡的一个重要因素。

3.2 盐度和饲料蛋白水平与凡纳滨对虾蜕壳频率的关系

在甲壳动物中对虾类的蜕壳较为频繁,其生长是通过蜕壳来完成的,体长体质量的增长呈阶梯式变化,每次蜕壳后表皮钙化需要大量的钙质。有研究认为对虾没有钙贮存能力,蜕壳后早期表皮钙化对钙的需求量突然增加,必需从生活的水环境中获得^[22]。在低盐度水体中, Ca^{2+} 的含量相对较低,根据渗透调节原理对虾从水中获取 Ca^{2+} 较为困难,蜕壳后表皮钙化较慢,因此低盐度组蜕壳频率较低。这与董双林等^[23]对日本沼虾的研究结果一致。部分甲壳动物可利用胆固醇合成蜕皮酮^[24],但对虾不能自行合成胆固醇^[25],只能从食物中获取。实验对虾摄食3种不同饲料后,蜕壳频率显示一定的差异,摄食B组饲料的实验对虾蜕壳频率明显较高。虽然3种饲料中单独添加的胆固醇含量均等,但其蛋白水平存在差异,蛋白质与胆固醇的吸收密切相关,这可能是造成摄食不同饲料实验对虾蜕壳频率产生差异的主要原因之一^[26]。

3.3 盐度和饲料蛋白水平与凡纳滨对虾蜕壳存活率的关系

低盐度下实验对虾蜕壳存活率低于中高盐度组,饲料蛋白水平对各盐度下对虾成活率影响不显著,虽然可以通过提高饲料蛋白质含量来提高各盐度下凡纳滨对虾的生长速率,但在低盐度下,并不能提高凡纳滨对虾的成活率。这与Sheenan等^[27]、Staples等^[28]、Chen等^[29]和Cawthorne等^[30]分别报道的墨吉对虾、短沟对虾、中国对虾和斑节对虾在低盐度时成活率较低结果一致。对虾对长时间的低盐度适应能力较差。试验中发现低盐度条件下,实验对虾死亡的主要原因是蜕壳不遂所致,属于蜕壳综合症(molt death syndrome, MDS)。在低盐度条件下,实验对虾蜕皮间期延长,由于不正常的蜕壳对其存活率影响较大。盐度对对虾蜕壳成活率的影响主要归因于盐度对渗透压调节的影响。凡纳滨对虾等广盐性虾类可通过血淋巴的渗透调节和离子调节来适应外界环境盐度的变化,具有双重性^[31]。在高盐度条件下虾类需将体内多余的盐分排出体外,保持体内的正常水分;在低盐度条件下需要摄取足够的盐分,排掉多余的水分,这种渗透压的主动调节过程,虾类

要消耗体内储存的大量能量,以适应外界的盐度变化,因而代谢率升高,生长效能降低,虾体抗性降低,存活率也随之降低。对于实验对虾,过高或过低的盐度对于蜕壳可能需花费更多的时间及更多的能量才能恢复正常的血液渗透压水平,这种蜕壳时间的延长增加了被敌害攻击和自相残杀的机会,并延缓了觅食能力的恢复,导致存活率降低。

3.4 盐度和饲料蛋白水平与凡纳滨对虾蜕壳生长的关系

盐度和饲料蛋白质含量均显著影响对虾的生长。盐度对虾体生长的影响主要体现在影响虾体的渗透压调节和摄食方面。盐度变化可促使对虾进行渗透调节,导致其代谢能量消耗,由于代谢能在多数甲壳动物的能量分配中占较大的比例,因此代谢能的变化决定了生长能的积累^[31-33]。Dalla^[34]研究认为,盐度变化造成代谢耗能增加可使日本囊对虾损失体质量33%以上,这也说明盐度变动与对虾的生长关系密切。实验凡纳滨对虾在低盐度水体中蜕壳相对增重率最高,这与穆迎春等^[4]报道的在盐度为30的条件下,有节律的降低盐度能够提高中国明对虾的蜕壳频率,加快其生长的研究结果一致。研究认为凡纳滨对虾在接近等渗点(24.7)^[14]或略低于等渗点^[6]的盐度环境中生长较快,在接近等渗点状态下对虾无需额外消耗能量调节渗透压,节约的能量也用于蜕壳生长,所以略低于等渗状态下对虾生长最快。本实验在3个蛋白质水平下盐度对特定生长率的回归拟合表明,凡纳滨对虾生长的最适盐度分别为23.22, 22.57和21.37,中盐度组对虾的各生长指标均优于投喂相同蛋白饲料的处理组,这与Li等^[35]、Huang^[36]报道的凡纳滨对虾的最适生长盐度为20左右结论一致。

一般认为,盐度是影响对虾摄食的主要因素之一。Vijayan等^[17]研究指出印度明对虾在盐度为15时,摄食率最大。褐对虾摄取营养物的程度随盐度的变化而变化^[37]。当盐度增加到40时,凡纳滨对虾对食物的消化能力显著下降^[1]。本实验结果低盐度组摄食量最大(表4),也说明实验对虾在低于等渗点时需额外消耗能量进行渗透调节。低盐度组实验对虾饲料转化效率也最低(表5),也表明盐度显著的影响对虾的摄食和消化。不同蛋白水平的饲料对虾体生长存在一定的

影响,饲料蛋白质是对虾氨基酸的主要来源,且很多氨基酸被大量用于调节渗透压提供能量^[38]及组织生长^[39]。对虾在适应盐度变化的过程中需要消耗自身的有机物,虽然这些有机物源于组织细胞内的合成,但这些物质归根到底仍需由外源饲料供给^[39]。对虾的生长发生在蜕壳过程中,蜕壳时快速增长,壳硬化后生长缓慢,对虾蜕壳之前必须储备足够的物质与能量。饵料的质量和数量对日本对虾蜕壳有重要作用^[26],充足的饵料供应和优良的营养条件能促进中国对虾稚虾的蜕壳生长^[5]。

参考文献:

- [1] Coelho S R. Effects of environmental salinity and dietary levels on digestibility in four species of penaeid shrimp[M]. Texas A & M University, 1981: 66.
- [2] 杨其彬,叶乐,温为庚,等. 盐度对斑节对虾蜕壳、存活、生长和饲料转化率的影响[J]. 南方水产, 2008,4(2):16-21.
- [3] 徐桂荣,朱正国,臧维玲,等. 盐度对罗氏沼虾幼虾生长的影响[J]. 上海水产大学学报,1997,6(2): 124-127.
- [4] 穆迎春,王芳,董双林,等. 不同盐度波动幅度对中国明对虾稚虾蜕皮和生长的影响[J]. 海洋学报, 2005,27(2):122-126.
- [5] Bray W A, Lawrence A L, Leung-turjillo J R. The effect of salinity on growth and survival of *Penaeus vannamei*, with observations on the interaction of HHN virus and salinity[J]. Aquaculture, 1994, 122: 133-146.
- [6] 黄国强,董双林,王芳,等. 饵料种类和摄食水平对中国对虾蜕皮的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2004,34(6):942-948.
- [7] Nakatani I, Ostu T. Relation between the growth and molt interval in the eyestalkless crayfish, *Procambarus clarki* [J]. Comparative Biochemistry and Physiology(A), 1981,68(4):549-553.
- [8] Anger K. The DO threshold: a critical point in the larval development of decapod crustaceans [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1987,108:15-30.
- [9] Anger K, Spindler K D. Energetics, molt cycle, and ecdysteroid titers in spider crab (*Hyas araneus*) larvae starved after DO threshold [J]. Marine Biology, 1987,94:367-375.
- [10] Juinio M A R, Cobb J S, Bengtson, et al. Changes in nucleic acids over the molt cycle in relation to food availability and temperature in *Homarus americanus* postlarvae [J]. Marine Biology, 1992, 114(1): 1-10.
- [11] 朱小明,李少菁. 甲壳动物幼体蜕皮的调控[J]. 水产学报,2001,25(4):379-384.
- [12] 黄凯,王武,卢洁,等. 盐度对凡纳滨对虾的生长及生化成分的影响[J]. 海洋科学,2004,28(9): 20-25.
- [13] 刘栋辉,何建国,刘永坚,等. 极低盐度下饲料蛋白质质量分数对凡纳对虾生长表现和免疫状况的影响[J]. 中山大学学报,2005,44(增刊2):217-223.
- [14] 王兴强,马甦,董双林. 盐度和蛋白质水平对凡纳滨对虾存活、生长和能量转换的影响[J]. 中国海洋大学学报,2005,35(1):33-37.
- [15] Choe S. Body increases during molt and molting cycle of the oriental brown shrimp *Penaeus japonicus* [J]. Marine Biology, 1971,9:31-37.
- [16] Linder M J, Anderson W W. Growth, migrations, spawning and size distribution of *Penaeus setiferus* [J]. Fishery Bulletin, US Fish and Wildlife Service, 1956,56:555-645.
- [17] Vijayan K K, Diwan A D. Influence of temperature, salinity, pH and light on molting and growth in the Indian white prawn *Penaeus indicus* (Crustean: Decapoda: Penaeidae) under laboratory conditions [J]. Asian Fisheries Science, 1995,8(1):63-72.
- [18] Verhoef G D, Austin C M, Jones P L, et al. Effect of temperature on molt increment and intermolt period of a juvenile Australian freshwater crayfish, *Cherax destructor* [J]. Journal of Crustacean Biology, 1998, 18(4):673-679.
- [19] Zein-Eldin Z P, Griffith G W. Growth, tolerances, and metabolism of estuarine organisms [J]. United States Fish and Wildlife Service Circular, 1965,230: 77-81.
- [20] Geoff L Allan, Greg B Maguire. Effect of pH and salinity on survival, growth and osmoregulation in *Penaeus monodon* Fabricius [J]. Aquaculture, 1992, 107:33-47.
- [21] Freeman J A. Molt increment, molt cycle duration, and tissue growth in *Palamonetes pugio* Holthuis larvae [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1990,143(1-2):47-61.
- [22] Dall W, Smith D. M. Ionic regulation of four species of *Penaeid* prawn [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1981,55:219-232.
- [23] 董双林,堵南山,赖伟. pH值和Ca²⁺浓度对日本沼

- 虾生长和能量收支的影响[J]. 水产学报, 1994, 18(2): 118-123.
- [24] Teshima S, Kanazawa A. Turnover of dietary cholesterol and β -sitosterol in the prawn[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1987, 53: 601-607.
- [25] Teshima S, Kanazawa A. Bioconversion of progesterone by the ovaries of crab, *Portunus trituberculatus* [J]. General and Comparative Endocrinology, 1971, 17: 52-57.
- [26] 黄加琪, 林琼武. 影响日本对虾蜕壳因素的探讨[J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 30-31.
- [27] Sheenan H, Karolus L. Effect of salinity on growth and survival of juvenile *Penaeus semisulcatus* in the laboratory[J]. The Israeli Journal of Aquaculture, 1991, 43(4): 156-163.
- [28] Staples D J, Heales D S. Temperature and salinity optima for growth and survival of juvenile banana prawns *Penaeus merguensis* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1991, 154: 251-274.
- [29] Chen J C, Lin J N, Chen C T. Survival, growth and intermoult period of juvenile *Penaeus chinensis* (Osbeck) reared at different combinations of salinity and temperature[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1996, 204: 169-178.
- [30] Cawthorne D F, Beard T, Davenport J, et al. Responses of juvenile *Penaeus monodon* Fabricius to natural and artificial seawaters of low salinity[J]. Aquaculture, 1983, 32(1/2): 165-174.
- [31] Panikkar N K. Osmotic behavior of shrimps and prawns in relation to their biology and culture[R]. FAO Fisheries Reports, 1968, FR-BCSP/67/E/25: 527-538.
- [32] 董双林, 堵南山, 赖伟. 日本沼虾生理生态学研究: II. 温度和体重对能量收支的影响[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(3): 238-242.
- [33] Paul A J, Akira F. Bioenergetics of the Alaskan crab *Chionoecetes bairdi* (Decapoda: majidae) [J]. Journal of Crustacean Biology, 1989, 9(1): 25-36.
- [34] Dalla Via G J. Salinity responses of the juvenile penaeid shrimp *Marsupenaeus japonicus*: I. Oxygen consumption and estimation of productivity [J]. Aquaculture, 1986, 55: 297-306.
- [35] Li E C, Chen L Q, Zeng C, et al. Growth, body composition, respiration and ambient ammonia nitrogen tolerance of the juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, at different salinities [J]. Aquaculture, 2007, 265: 385-390.
- [36] Huang H J. Factors affecting the successful culture of *Penaeus stylirostris* and *Penaeus vannamei* at an estuarine power plant site: temperature, salinity, inherent growth variability, damselfly nymph predation, population density and distribution, and polyculture [D]. PhD dissertation. Texas A&M University, College Station, TX, USA, 221.
- [37] Venkataramiah A, Lakshmi G J, Gunter G. The effect of salinity and feeding levels on the growth rate and food conversion efficiency of the shrimp *Penaeus aztecus* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1972, 3: 267-283.
- [38] Marangos C, Brogren C H, Alliot E, et al. The influence of water salinity on the free amino acid concentration in muscle and hepatopancreas of adult shrimps, *Penaeus japonicus* [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 1989, 17: 589-594.
- [39] Cuzon G, Lawrence A, Gaxiola G, et al. Nutrition of *Litopenaeus vannamei* reared in tanks or in ponds [J]. Aquaculture, 2004, 234: 513-551.

The effects of salinity and nutrition on molt and growth of *Litopenaeus vannamei*

SHEN Yu-chun^{*}, CHEN Zuo-zhou, LIU Li, LI Zai-liang, WU Zao-he

(Key Laboratory of Aquaculture in South China Sea for Aquatic Economic Animal of Guangdong Higher Education Institutes, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524025, China)

Abstract: By the methods of experimental ecology, a 5×3 factorial experiment was conducted to determine the effects of salinity and dietary protein levels on molt and growth of *Litopenaeus vannamei*. The experiment lasted 30 days. *L. vannamei* at an initial average weight of (2.01 ± 0.02) g were divided into triplicate groups and were observed at salinities of 6, 12, 18, 24, 30 and protein levels of 30%, 36%, 42%. The results showed that the relative weight gain of molting decreased with increasing salinity, being the highest at salinity of 6. The relative weight gain of molting was affected significantly by different salinities and dietary protein levels, and the interactions of them ($P < 0.05$). The specific growth rate increased with increasing salinity, it was affected significantly by the different salinity and dietary protein levels ($P < 0.05$), but it was not affected significantly by the interactions of them. The molting frequency increased with increasing salinity low salinity levels ($P < 0.05$), being the highest at salinity of 18, then it decreased with further increasing salinity. At the different dietary protein levels, the higher molting frequency was obtained in experimental group with feed to the medium dietary protein levels diet (36%). The molting frequency was affected significantly by the different salinity and dietary protein levels ($P < 0.05$), it was not affected significantly by the interactions of them. The intermolt period was first prolonged, then shortened with the increase of salinity. The intermolt period was affected significantly by the difference salinities ($P < 0.05$), but not affected significantly by the dietary protein levels and the interaction of them.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; salinity; nutrition; molt; growth

Corresponding author: SHEN Yu-chun. E-mail: shenyuchun@163.com