

## 水环境 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 含量对凡纳滨对虾幼虾 生长和能量收支的影响及其机制

朱长波<sup>1,2</sup>, 董双林<sup>2\*</sup>, 王芳<sup>2</sup>

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;

2. 中国海洋大学教育部海水养殖重点实验室, 山东 青岛 266003)

**摘要:**采用人工海水,在保持海水盐度为30的条件下,设置了8个处理,R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7和R8,其 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 比值(mg/mg)和 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 实测含量(mg/L)分别为0.11(35,330),0.53(175,330),1.59(525,330),2.42(800,330),3.36(1110,330),4.78(1110,232),7.87(1110,141),11.81(1110,94),研究了水环境 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 含量对凡纳滨对虾幼虾生长和能量收支的影响及其机制。实验持续40 d(其中R8处理因为实验虾死亡率高而只进行了30 d)。实验结果:对虾的生长、蜕皮、食物转化效率和能量收支受水环境 $Mg^{2+}$ 和 $Ca^{2+}$ 含量的影响均很显著( $P < 0.05$ );其摄食量受水体 $Ca^{2+}$ 浓度的影响明显( $P < 0.05$ ),而受 $Mg^{2+}$ 含量的影响不显著( $P > 0.05$ )。本研究表明,凡纳滨对虾对水体低 $Mg^{2+}$ 含量的耐受能力较强,而对低 $Ca^{2+}$ 含量的耐受力很弱。在利用内陆低 $Mg^{2+}$ 或 $Ca^{2+}$ 含量的天然咸水进行对虾养殖中,通过添加Mg盐或Ca盐,只需将 $Mg^{2+}$ 浓度调节到该盐度下正常含量的15%以上,保证 $Ca^{2+}$ 浓度达到正常值的60%以上,对虾就能正常生长。

**关键词:**凡纳滨对虾; $Mg^{2+}$ ; $Ca^{2+}$ ;生长;能量收支

**中图分类号:** Q 178.1; S 966.1

**文献标识码:** A

对虾的内陆养殖在全球多个国家广泛开展<sup>[1-3]</sup>。在我国黄河三角洲地区,已经利用当地的天然地下卤水兑淡水成功地养殖凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)和中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)<sup>[4-6]</sup>,另外在美国南部的阿拉巴马、亚利桑那、佛罗里达、伊利诺斯、印地安那、密歇根、密西西比、南卡罗来纳和德克萨斯州等地,人们越来越多地采用内陆咸水养殖凡纳滨对虾<sup>[3,7]</sup>。然而,也有很多内陆虾场养殖失败的案例,其原因都与当地地下水的独特水质有关。

内陆地下咸水相对于海水在离子组成上已有很大变化,“海水组成恒定原理”并不适用于内陆咸水,而且不同地方的咸水之间在盐度和离子组成上也有较大差异。因此,很多地区的天然咸水资源都不能直接用于对虾养殖或者养殖效果不理

想<sup>[1,8]</sup>。海水主要离子的组成是地球形成以来逐渐形成的,各离子之间基本上有其恒定比值,不受盐度和空间变化的影响。海洋生物经过亿万年的进化,一般只能适应特定的海水组成。Boyd等<sup>[2]</sup>通过大量调查发现,内陆地下咸水普遍缺少 $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 等;而在我国黄河三角洲的一些盐碱地区,地下咸水还缺 $Ca^{2+}$ <sup>[9]</sup>。

鉴于 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 对于动物生理作用的相互关联性,许多研究者都在实验中将二者结合起来分析<sup>[10-14]</sup>。一些学者利用淡水<sup>[15-16]</sup>或者极低盐度的人工海水<sup>[17]</sup>,通过添加可溶性Mg盐和Ca盐,研究了水体 $Mg^{2+}$ 和 $Ca^{2+}$ 对凡纳滨对虾和中国明对虾存活和生长的效应,但是其实验方法普遍忽视了水中其它离子的缺乏和比例失调对对虾的影响,而且在对虾比较适宜生长的较高盐度范

收稿日期:2009-05-31 修回日期:2009-09-15

资助项目:国家自然科学基金项目(30800851);中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2008YD01);国家农业跨越计划项目(K2002-16)

通讯作者:董双林,E-mail: dongsl@mail.ouc.edu.cn

国内的关于水环境  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  效应的研究也极少。

本实验旨在最大限度地排除其它离子干扰的基础上,系统研究海水盐度下水环境  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  含量对凡纳滨对虾生长的影响及其生理机制,进一步丰富对  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  含量失调的内陆天然咸水进行改良用于对虾养殖的理论。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验虾的来源和暂养

实验于2004年6月至8月进行。凡纳滨对虾取自青岛胶州宝荣养虾场,均为健壮活泼个体。对虾运回实验室后,在两个装满盐度为30自然海水的玻璃钢水槽(0.6 m<sup>3</sup>)中暂养10 d。连续充气,每天投喂海马牌对虾颗粒饲料两次(8:00和18:00)。该饲料的生化组成和能量含量测定结果如下:水分8.74%,粗蛋白41.58%,粗脂肪8.36%,灰分10.75%。

### 1.2 实验设计和人工海水的配制

为了排除其他离子成分不平衡的干扰,实验用水以海水素和去离子水配制。海水素由青岛通

用海大海水素有限公司专门设计和生产,其中Mg和Ca成分经过精密调配,在保证其它成分含量和总含盐量基本恒定不变的前提下,分别降低Mg和Ca的含量,其差值部分由Na盐补充,因为Na盐在海水组成中含量最高,其少量变动对Na<sup>+</sup>在海水中的相对含量不会造成大的影响。调配好的人工海水盐度为30,pH 8.2。在预毒性实验结果(未发表)的基础上,本实验共设置了8个处理,R1、R2、R3、R4、R5、R6、R7和R8,其 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 比值(mg/mg)和 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 实测含量(mg/L)分别为0.11(35,330),0.53(175,330),1.59(525,330),2.42(800,330),3.36(1110,330),4.78(1110,232),7.87(1110,141),11.81(1110,94)。其中处理R5的 $Mg^{2+}$ 和 $Ca^{2+}$ 含量为正常海水的值,作为对照。Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>浓度用等离子发射光谱 CCD Simultaneous ICP-OES (VARIAN)测定, $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 浓度用EDTA络合滴定法测定, $SO_4^{2-}$ 用BaCl<sub>2</sub>比浊法测定,Cl<sup>-</sup>浓度用Hg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>滴定法测定<sup>[18]</sup>(表1)。

表1 实验各处理人工海水的 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 比值和主要离子成分浓度

Tab.1  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  ratio and concentrations of main cations and anions of the artificial seawater mg/L

$Mg^{2+}/Ca^{2+}$ 比值 $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ ratio	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
$Mg^{2+}$	35	175	525	800	1 110	1 110	1 110	1 110
$Ca^{2+}$	330	330	330	330	330	232	141	94
Na <sup>+</sup>	11 135	10 919	10 377	9 956	9 478	9 591	9 696	9 751
K <sup>+</sup>	350	350	350	350	350	350	350	350
Cl <sup>-</sup>	16 317	16 383	16 582	16 731	16 899	16 900	16 900	16 903
$SO_4^{2-}$	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400	2 400
总和 sum	30 567	30 557	30 564	30 567	30 567	30 583	30 597	30 608

暂养结束后,停食24 h,然后选取大小一致的虾逐尾称重。先用吸水纸擦干体表水分,然后用电子天平称量,精确至0.001 g。最终选定体重为(0.323 ± 0.002) g(平均值±标准误)的实验虾170尾,其中128尾转入32个玻璃水族箱(45 cm × 25 cm × 30 cm,30 L),每个水族箱放虾4尾,进行为期40 d的生长实验。水族箱内分别装满盐度为30但 $Mg^{2+}$ 和 $Ca^{2+}$ 含量不同的人工海水。共8个处理,每个处理4个重复,水族箱均随机放置。水族箱上用纱网盖住,防止虾跳出。实验采用静水连续充气系统,每两天换水1/2,保持水体溶氧浓度在6.0 mg/L以上,氨氮浓度在

0.4 mg/L以下。实验房间以空调控温,水温控制在(25.0 ± 0.5) °C。光照周期为14L:10D。实验期间每天过量投喂海马牌对虾颗粒饲料两次(6:00和16:00)。另外42尾虾在65 °C下烘干至恒重,保存在-20 °C,用于估算实验开始时虾体的成分。

### 1.3 样品的收集和测定

实验期间,每天投喂的饲料都精确称重。残饵和粪便在喂食后3 h内用虹吸法吸出,收集的残饵装入烧杯,在65 °C烘干至恒重后保存在-20 °C。及时收集虾的蜕皮,并记录蜕皮时间。实验期满后,先停食24 h,然后对每个水族箱内的虾分

别称量湿重,然后用烘箱在  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重。饲料和虾体的水分含量以烘干前后重量的减少量为准。所有冷冻的样品在分析前均在  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  重新烘干。所有样品的含氮量均用元素分析仪 Vario EL III CHNOS Elemental Analyzer (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany) 测定,然后换算成粗蛋白含量(凯氏氮  $\times 6.25$ )。样品的能值用 PARR1281 型氧弹热量仪测定。每个样品重复测定 3 次,取平均值。

#### 1.4 计算与数据分析

实验期间对虾的增重率(weight gain)、蜕皮频率(moulting frequency),以湿重(wet weight)计的特定生长率(specific growth rate, SGR)和食物转化效率(food conversion efficiency, FCE)分别按以下公式计算:

$$\text{增重率}(\%) = 100 \times (W_2 - W_1) / W_1,$$

$$\text{蜕皮频率}(\%/d) = 100 \times N_m / (N_s \times T),$$

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

$$\text{食物转化效率}(\%) = 100 \times (W_2 - W_1) / C$$

式中,  $W_2$  和  $W_1$  分别表示虾最终和起始体重(g),  $N_m$  表示蜕皮的数目,  $N_s$  表示虾的数目,  $T$  表示生长实验的天数,  $C$  表示对虾所摄食饲料的干物质重量(g)。

SGR 和 FCE 以干物质(dry matter)、蛋白质(protein)和能量(energy content)表示分别为  $SGR_d$ 、 $FCE_d$ 、 $SGR_p$ 、 $FCE_p$  和  $SGR_e$ 、 $FCE_e$ 。计算方法同上。

呼吸能( $R_e$ , kJ)依据对虾能量收支方程  $C_e = G_e + F_e + U_e + E_e + R_e$  中的各项按以下方法计算:

摄食能  $C_e = \text{净摄食量} \times \text{饲料能值}$ ,

生长能  $G_e = \text{结束时虾体总能} - \text{初始虾体总能}$ ,

粪能  $F_e = \text{粪便干重} \times \text{粪便能值}$ ,

蜕皮能  $E_e = \text{蜕皮干重} \times \text{蜕皮能值}$ ,

排泄能  $U_e = U_N \times 24.83$ ,

呼吸能  $R_e = C_e - G_e - F_e - U_e - E_e$ 。

$U_N$  为排泄氮,计算方法为:

$$U_N = C_N - G_N - F_N - E_N$$

式中,  $C_N$ 、 $G_N$ 、 $F_N$  和  $E_N$  分别表示摄食氮、生长氮、粪氮和蜕皮氮。常数 24.83 是对虾排泄 1 g 氮(以氨的形态)损失的能量为 24.83 kJ<sup>[19]</sup>。因为甲壳类的主要排泄产物为氨,尿素的量极少<sup>[20]</sup>,这里假定氨是唯一的氮排泄物。

同一水族箱的实验数据(平均值)作为一个样本值。数据的统计分析用 SPSS10.0<sup>[21]</sup> 软件进行。对所有数据均作单因子方差分析(ANOVA),如果差异显著( $P < 0.05$ )则进一步对各处理间进行 Duncan 氏多重比较分析。

## 2 结果

### 2.1 存活和蜕皮

在 40 d 的生长实验过程中,除 R8 处理外,其余所有处理组的实验虾存活率均为 100%,无死亡现象(表 2)。处理 R8 的对虾在实验开始一周后陆续有死亡发生,多为蜕皮后被同类残食。由于其蜕皮时间比其它组明显延长,新皮需要很长时间才能钙化变硬,残食现象得不到控制,所以该处理只进行了 30 d 便终止,因而该组的统计数据也不参与其余 7 个处理的比较。

表 2 凡纳滨对虾在实验期间的体重增长、存活率和摄食  
Tab.2 Weight gains, survival and feed consumption of *L. vannamei* during the experiment

处理 treatment	初始体重(g) initial weight		终体重(g) final weight		增重率(%) weight gain		摄食量(g/ind) feed consumption	存活率 (%) survival
	湿重 wet weight	干重 dry weight	湿重 wet weight	干重 dry weight	湿重 wet weight	干重 dry weight		
R1	0.321 ± 0.001	0.077 ± 0.000	2.110 ± 0.071 <sup>b</sup>	0.520 ± 0.024 <sup>b</sup>	556.43 ± 21.16 <sup>b</sup>	576.91 ± 29.61 <sup>b</sup>	2.306 ± 0.087 <sup>b</sup>	100.00
R2	0.322 ± 0.000	0.077 ± 0.000	2.421 ± 0.121 <sup>bc</sup>	0.599 ± 0.029 <sup>c</sup>	650.99 ± 37.16 <sup>bc</sup>	677.16 ± 38.20 <sup>c</sup>	2.388 ± 0.078 <sup>b</sup>	100.00
R3	0.324 ± 0.001	0.077 ± 0.000	2.514 ± 0.055 <sup>c</sup>	0.628 ± 0.023 <sup>c</sup>	677.18 ± 16.99 <sup>c</sup>	711.06 ± 30.35 <sup>c</sup>	2.530 ± 0.063 <sup>b</sup>	100.00
R4	0.322 ± 0.001	0.077 ± 0.000	2.542 ± 0.048 <sup>c</sup>	0.605 ± 0.022 <sup>c</sup>	690.46 ± 17.52 <sup>c</sup>	686.16 ± 30.62 <sup>c</sup>	2.504 ± 0.023 <sup>b</sup>	100.00
R5	0.324 ± 0.001	0.077 ± 0.000	2.621 ± 0.135 <sup>c</sup>	0.623 ± 0.024 <sup>c</sup>	710.46 ± 43.58 <sup>c</sup>	705.18 ± 32.64 <sup>c</sup>	2.497 ± 0.095 <sup>b</sup>	100.00
R6	0.324 ± 0.002	0.077 ± 0.000	2.581 ± 0.185 <sup>c</sup>	0.617 ± 0.030 <sup>c</sup>	695.50 ± 54.31 <sup>c</sup>	694.76 ± 48.11 <sup>c</sup>	2.408 ± 0.053 <sup>b</sup>	100.00
R7	0.325 ± 0.001	0.078 ± 0.000	1.462 ± 0.057 <sup>a</sup>	0.337 ± 0.011 <sup>a</sup>	349.49 ± 17.10 <sup>a</sup>	333.57 ± 13.92 <sup>a</sup>	1.470 ± 0.038 <sup>a</sup>	100.00
R8*	0.322 ± 0.001	0.077 ± 0.000	0.632 ± 0.079	0.131 ± 0.022	96.10 ± 24.09	69.83 ± 23.25	0.543 ± 0.057	43.75

注: \* 因处理 R8 只进行了 30 d, 所以其数据未参与 Duncan 氏多重比较分析。同列不同字母代表组间差异显著( $P < 0.05$ )

Notes: \* Since treatment R8 only lasted less (only 30 days) than the other treatments, data in this treatment was not included in the Duncan's analysis. Within the same column different letters indicates significant differences ( $P < 0.05$ )

对虾的蜕皮情况如图1所示。处理R1和R7的蜕皮频率都显著高于对照组R5的值( $P < 0.05$ )。处理R8的实验时间虽然较短,但对虾在该处理下的蜕皮频率却比其它任何一组都要高。

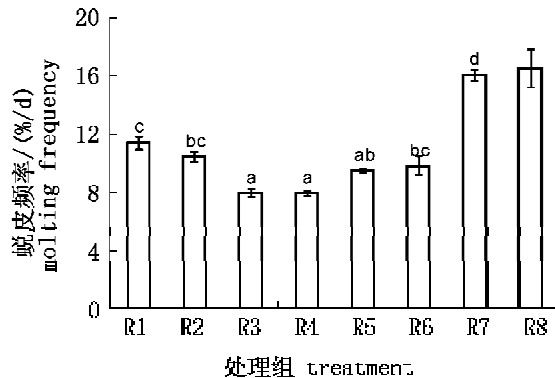


图1 凡纳滨对虾在实验期间的蜕皮频率  
柱形图上不同的字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ );处理R8的数据未参与比较

Fig.1 Molting frequency of *L. vannamei* during the experiment

Bars with different letters are significantly different from each other ( $P < 0.05$ ), but treatment R8 was not included in the comparison

## 2.2 生长

在生长实验之初,各组实验虾的身体湿重和干重都很一致,没有显著差异(表2)。而在实验结束时,受水体 $Mg^{2+}$ 或 $Ca^{2+}$ 含量变化的影响,各处理组实验虾的终体重产生了显著的差异( $P < 0.05$ )。从处理R5到R1,随着 $Mg^{2+}$ 含量的急剧降低,对虾的终体重也逐渐减小,但是只有 $Mg^{2+}$ 含量最低的R1组实验虾的平均终体重与对照组的值差异显著( $P < 0.05$ ),而R2、R3、R4和R5之间在对虾的养成体重上无显著差异( $P > 0.05$ )。从R5到R7,水体的 $Ca^{2+}$ 含量逐步降低,实验虾的平均终体重也随之减小,而且R7处理组实验虾的平均终体重显著小于R5和R6组的值( $P < 0.05$ ),而R5和R6组的平均值之间无显著差异( $P > 0.05$ )。

实验虾的增重率(weight gain, WG)也因水体 $Mg^{2+}$ 或 $Ca^{2+}$ 含量变化而各有差异(表2),处理R1和R7的平均WG均显著低于其它处理组的值( $P < 0.05$ ),而且R1和R7组之间在WG上的差异也达到了显著程度( $P < 0.05$ )。

对虾的特定生长率(SGR)计算结果见图2。分别以湿重( $SGR_w$ )、干重( $SGR_d$ )、蛋白( $SGR_p$ )和能量( $SGR_e$ )表示的各种特定生长率的变化趋

势基本一致。实验处理对实验虾的SGR影响显著( $P < 0.05$ )。水体 $Ca^{2+}$ 含量最低的R1组的SGR值最小,且R1和R7组的平均SGR都显著低于对照组R5的值( $P < 0.05$ ),而处理组R2、R3、R4、R5和R6之间在SGR上都没有显著差异( $P > 0.05$ )。可以看出,水体 $Mg^{2+}$ 含量虽然急剧降低,但实验虾的SGR的降低幅度相对缓和;水体 $Ca^{2+}$ 含量的降低幅度不大,但对虾的SGR急剧减小,亦即 $Ca^{2+}$ 浓度的影响远大于 $Mg^{2+}$ 。

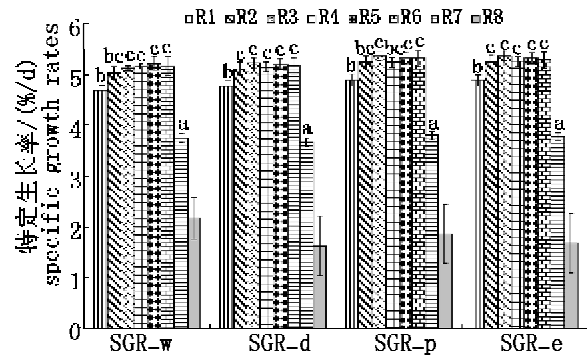


图2 凡纳滨对虾在实验期间的特定生长率SGR  
柱形图上不同的字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ );处理R8的数据未参与比较

Fig.2 Specific growth rates of *L. vannamei* during the experiment

Bars with different letters are significantly different from each other ( $P < 0.05$ ), but treatment R8 was not included in the comparison

## 2.3 摄食量与食物转化效率

实验期间对虾的摄食量见表2。尽管水体 $Mg^{2+}$ 含量的从R5到R1不断降低,各组实验虾的平均摄食量略有变化,但各处理间无显著差异( $P > 0.05$ )。与此相反,对虾的平均摄食量受到了 $Ca^{2+}$ 含量变化的显著影响( $P < 0.05$ ),R7组对虾的平均摄食量比对照组R5的值少41%。

图3显示了分别以干重、蛋白质和能量表示的食物转化效率(FCE)的变化情况。由图示可见,各处理组对虾 $FCE_d$ 、 $FCE_p$ 和 $FCE_e$ 的变化趋势一致。R1和R7组对虾的FCE值均显著小于对照组( $P < 0.05$ ),R2、R3、R4、R5和R6组的FCE值之间无明显差别( $P > 0.05$ )。水体 $Ca^{2+}$ 含量严重偏低的R8组实验虾的FCE值更是不足对照组的一半。

## 2.4 能量收支

生长实验期间对虾的能量收支情况如表3所示。对虾的摄食能中,R7处理的平均摄食能显著

小于其余各处理组(除 R8 外)( $P < 0.05$ ),而 R1、R2、R3、R4、R5 和 R6 组的平均摄食能之间无明显差异( $P > 0.05$ )。在摄食能的分配方面,生长能和蜕皮能分配受实验处理的影响显著( $P < 0.05$ ),而呼吸能、粪便能和排泄能没有受到显著影响( $P > 0.05$ )。处理 R7 的生长能分配比例最低(除 R8 外),且 R1 和 R7 的生长能占摄食能的比例均显著低于对照组 R5 ( $P < 0.05$ ),而 R2、R3、R4、R5 和 R6 组的生长能分配比例之间无明显差异( $P > 0.05$ )。

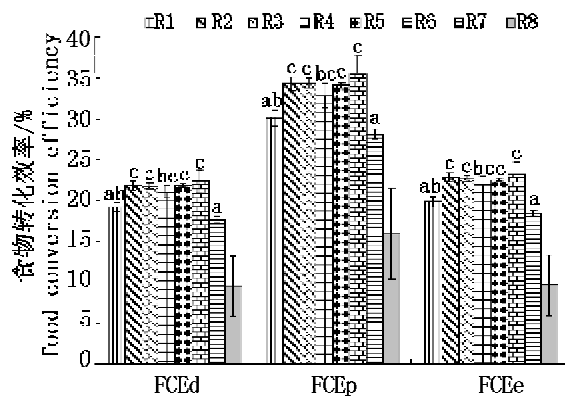


图3 凡纳滨对虾在实验期间的食物转化效率 FCE 柱形图上不同的字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ );处理 R8 的数据未参与比较

Fig. 3 Food conversion efficiencies of *L. vannamei* during the experiment

Bars with different letters are significantly different from each other ( $P < 0.05$ ), but treatment R8 was not included in the comparison

R7 组的蜕皮能分配比例显著大于 R1、R2、R3、R4、R5 和 R6 组( $P < 0.05$ ), R1 组的蜕皮能

分配比例也较高,与 R4 组间差异显著( $P < 0.05$ ),但与对照组的差异不显著( $P > 0.05$ ),R2、R3、R4、R5 和 R6 组的蜕皮能分配比例之间无明显差异( $P > 0.05$ )。虽然实验虾呼吸能的分配比例受实验处理的影响没有达到显著程度,但是可以看出 R1 和 R7 处理的呼吸能比例有比其它处理(除 R8 外)高的趋势。在处理 R8 条件下,对虾的生长能分配比例为 9.63%,只相当于水体  $Ca^{2+}$  含量略高的 R7 处理的生长能分配比例的一半,而呼吸能、排泄能和蜕皮能所占摄食能的比例比其它组高得多。

### 3 讨论

从实验结果可以看出,凡纳滨对虾对水体低  $Ca^{2+}$  浓度的忍耐力很弱,在盐度 30 条件下, $Ca^{2+}$  浓度 100 mg/L 可以看成是对虾能忍受的最低限度。而其对低  $Mg^{2+}$  浓度的耐受力很强,对虾可以在  $Mg^{2+}$  浓度几乎只有正常值 1/10 的海水中正常成活和生长。Mcgraw 等<sup>[21]</sup>也认为水体  $Mg^{2+}$  含量低对凡纳滨对虾的短期存活不会造成大的影响。陈昌生等<sup>[16]</sup>认为凡纳滨对虾对水环境中低  $Ca^{2+}$  (100 mg/L)有极大的耐受力,此结论与本实验结果相反,这可能是他们采用的实验盐度极低(只有 3),而其  $Ca^{2+}$  的浓度(100 mg/L)相对于该盐度而言并不低的缘故。王慧等<sup>[17]</sup>通过对中国明对虾的实验研究,认为对虾对于水体低  $Mg^{2+}$  浓度有极大耐受力,而对低  $Ca^{2+}$  浓度耐受力极弱,其结论与本实验一致。

表3 凡纳滨对虾在生长实验期间的能量收支

Tab. 3 Energy budget of *L. vannamei* during the experiment

处理 treatment	C (kJ)	G/C (%)	R/C (%)	F/C (%)	U/C (%)	E/C (%)
R1	43.72 ± 1.63 <sup>b</sup>	19.85 ± 0.61 <sup>ab</sup>	62.44 ± 0.51	10.80 ± 0.22	5.78 ± 0.09	1.13 ± 0.28 <sup>b</sup>
R2	45.26 ± 1.47 <sup>b</sup>	22.80 ± 0.56 <sup>c</sup>	60.67 ± 0.65	10.25 ± 0.33	5.46 ± 0.10	0.81 ± 0.12 <sup>bc</sup>
R3	47.95 ± 1.20 <sup>b</sup>	22.71 ± 0.40 <sup>c</sup>	61.20 ± 0.44	9.89 ± 0.35	5.55 ± 0.07	0.65 ± 0.09 <sup>bc</sup>
R4	47.08 ± 0.53 <sup>b</sup>	21.95 ± 0.98 <sup>bc</sup>	61.50 ± 0.45	10.43 ± 0.30	5.64 ± 0.11	0.49 ± 0.16 <sup>c</sup>
R5	47.32 ± 1.79 <sup>b</sup>	22.54 ± 0.20 <sup>c</sup>	61.88 ± 0.55	9.13 ± 0.34	5.58 ± 0.07	0.87 ± 0.15 <sup>bc</sup>
R6	45.62 ± 1.02 <sup>b</sup>	23.20 ± 1.45 <sup>c</sup>	61.01 ± 1.78	9.67 ± 0.62	5.40 ± 0.27	0.72 ± 0.13 <sup>bc</sup>
R7	27.87 ± 0.73 <sup>a</sup>	18.40 ± 0.38 <sup>a</sup>	63.78 ± 0.33	9.70 ± 0.21	5.93 ± 0.06	2.18 ± 0.07 <sup>a</sup>
R8 <sup>**</sup>	10.44 ± 0.55	9.63 ± 3.67	69.54 ± 2.86	10.48 ± 0.43	7.27 ± 0.56	3.08 ± 0.24

注: C 为摄食能(单位:kJ), G/C、R/C、F/C、U/C 和 E/C 分别表示生长能、呼吸能、粪能、排泄能和蜕皮能占摄食能的比例(%). \*\* 因处理 R8 只进行了 30 d, 所以其数据未参与 Duncan 氏多重比较分析

Notes: Letter C in the table indicates total energy consumed, and G/C, R/C, F/C, U/C and E/C mean the percentage of consumed energy used in growth, respiration, faeces, excretion and molts. \*\* Since Treatment R8 only lasted less (only 30 days) than the other treatments, data in this treatment was not included in the Duncan's analysis

研究表明,  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  都是维持表皮膜的完整性必不可少的成分<sup>[23]</sup>, 水体  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  浓度直接影响到动物的渗透调节表皮对水和离子的通透性<sup>[24-26]</sup>。Holliday<sup>[27]</sup> 发现大多数甲壳类总是将血淋巴  $Mg^{2+}$  的浓度调节到低于外界的水平, Dall 等<sup>[28]</sup> 对 4 种对虾的研究发现了同样的规律。可能正是因为这个原因, 在水环境  $Mg^{2+}$  浓度较低的情况下, 凡纳滨对虾仍能正常生长, 如本实验中的 R2、R3 和 R4 处理的情形。然而,  $Mg^{2+}$  是甲壳动物鳃 Na-K-ATP 酶正常行使功能不可缺少的成分<sup>[11]</sup>。水环境中的  $Mg^{2+}$  浓度过低, 有可能造成动物体内  $Mg^{2+}$  的被动流失, 抑制 Na-K-ATP 酶的活性, 进而降低动物进行体内外离子交换转运的能力, 引起生理功能紊乱。在本实验 R1 处理的  $Mg^{2+}$  浓度不到正常海水值的 1/30, 对虾的生长明显受阻, 可能就是这个问题。

在蜕皮间期, 十足目甲壳类血淋巴内的  $Ca^{2+}$  浓度总是要高于海水中的  $Ca^{2+}$  浓度<sup>[29-30]</sup>, 但在蜕皮期几乎有占其体内 90% 的  $Ca^{2+}$  会丢失, 所以新皮的钙化主要依靠从海水中吸收  $Ca^{2+}$ <sup>[31-32]</sup>, 且在外界  $Ca^{2+}$  浓度较低时主要依靠 ATP 酶系统的主动转运来补充体内  $Ca^{2+}$  的不足<sup>[11]</sup>, 而这是一个消耗能量的过程。Hessen 等<sup>[33]</sup> 的研究表明, 水体  $Ca^{2+}$  过低明显延缓大型溞 *Daphnia magna* 的生长, 因为低  $Ca^{2+}$  环境增加了主动吸收  $Ca^{2+}$  所需要的能量消耗。凡纳滨对虾体内没有  $Ca^{2+}$  的贮存机制, 因而对虾需要不断地从环境中吸收  $Ca^{2+}$ <sup>[34-35]</sup>。在低  $Ca^{2+}$  的水环境中凡纳滨对虾获取  $Ca^{2+}$  相对困难, 蜕皮后表皮钙化缓慢。而在蜕皮期对虾不能进食, 由此导致其能量消耗得不到及时补充, 从而生长缓慢, 同时增加了被同类残食的机会。另外, 水环境中低  $Ca^{2+}$  浓度还会抑制甲壳动物鳃 Na-K-ATP 酶的活性<sup>[10]</sup>。所以, 凡纳滨对虾对水环境中低  $Ca^{2+}$  浓度的反应非常敏感, 当水中  $Ca^{2+}$  浓度降低到正常值的 1/3 时, 其生长就明显受到抑制, 如本实验中 R7 和 R8 处理的结果。

本研究表明, 水环境中的  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  的含量都对凡纳滨对虾的生长有显著影响, 但是凡纳滨对虾对水体低  $Mg^{2+}$  含量的耐受能力较强, 而对低  $Ca^{2+}$  含量的耐受力很弱。有些研究者将  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  比值作为衡量水体进行养殖利用的可行性<sup>[15-17]</sup>, 从本实验可以看出, 该指标对凡纳滨

对虾养殖意义不大。在利用内陆低  $Mg^{2+}$  或  $Ca^{2+}$  的天然咸水进行对虾养殖中, 通过添加 Mg 盐或 Ca 盐, 只需将  $Mg^{2+}$  浓度调节到该盐度下正常含量的 15% 以上, 保证  $Ca^{2+}$  浓度达到正常值的 60% 以上, 对虾就能正常生长。

#### 参考文献:

- [1] Boyd C E. Inland shrimp farming [C]. Beijing: World Aquaculture 2002: Book of Abstracts, 2002:83.
- [2] Boyd C E, Thunjai T. Concentrations of major ions in waters of inland shrimp farms in China, Ecuador, Thailand, and the United States [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2003, 34:524-532.
- [3] Davis D A, Saoud I P, McGraw W J, et al. Considerations for *Litopenaeus vannamei* reared in inland low salinity waters [C]// Cruz-Suárez L E, Richque-Marie D, Tapia-Salazar M, Eds. Advances en Nutrición Acuicola VI. Memorias del VI Simposium Internacional de Nutrición Acuicola. 3 al 6 de Setiembre del, 2002. Cancún, Quintana Roo, México.
- [4] 刘金明. 提高盐碱地渗水养殖中国对虾成活率试验[J]. 齐鲁渔业, 2001, 18(1):13-14.
- [5] 李鲁晶, 王春生, 朱丰锡, 等. 盐碱地渗水调配养殖南美白对虾技术[J]. 齐鲁渔业, 2002, 19(11):6-8.
- [6] 王慧, 来琦芳, 房文红. 沧州运东地区盐碱水资源对开展渔业的影响[J]. 河北渔业, 2003, (5):16-18.
- [7] Samocha T M, Hamper L, Emberson C R, et al. Review of some recent developments in sustainable shrimp farming practices in Texas, Arizona and Florida [J]. Journal of Applied Aquaculture, 2002, 12(1):1-30.
- [8] Saoud I P, Davis D A, Rouse D B. Suitability studies of inland well waters for *Litopenaeus vannamei* culture [J]. Aquaculture, 2003, 217:373-383.
- [9] 孙同秋. 盐碱地地表水养殖南美白对虾池塘底质与水质的改善[J]. 齐鲁渔业, 2002, 19(12):5-6.
- [10] Winkler A. Effects of inorganic sea water constituents on branchial Na-K-ATPase activity in the shore crab *Carcinus maenas* [J]. Marine Biology, 1986, 92:537-544.
- [11] 臧维玲, 戴习林, 张建达, 等. 罗氏沼虾育苗用水

- 中  $Mg^{2+}$  与  $Ca^{2+}$  含量及  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  比值对出苗率的影响[J]. 海洋与湖沼,1995,26(5):552-557.
- [12] Perschbacher P D, Wurts W A. Effects of calcium and magnesium hardness on acute copper toxicity to juvenile channel catfish, *Ictalurus punctatus* [J]. Aquaculture, 1999, 172:275-280.
- [13] 王广军,谢骏,潘德博. 海水中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  的含量及  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  比值对日本鳗鲡受精卵孵化率的影响[J]. 海洋科学,2002,26(2):69-71.
- [14] Silva L V F, Golombieski J I, Baldisserotto B. Incubation of silver catfish, *Rhamdia quelen* (Pimelodidae), eggs at different calcium and magnesium concentrations [J]. Aquaculture, 2003, 228:279-287.
- [15] 朱春华,徐志标. 淡化养殖水体中  $Ca^{2+}$  与  $Mg^{2+}$  含量对南美白对虾生长的影响[J]. 淡水渔业, 2002,32(6):46-48.
- [16] 陈昌生,纪德华,王兴标,等.  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  对凡纳滨对虾存活及生长的影响[J]. 水产学报,2004,28(4):413-418.
- [17] 王慧,房文红,来琦芳. 水环境中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  对中国对虾生存及生长的影响[J]. 中国水产科学, 2000,7(1):82-86.
- [18] Clesceri L S, Greenberg A E, Eaton A D. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 20<sup>th</sup> edition. Washington, D. C.: American Public Health Association, 1998.
- [19] 崔奔波. 鱼类生物能量学的理论与方法[J]. 水生生物学报,1989,13(4):369-381.
- [20] Waterman T H. The physiology of crustacea [M]. London:Academic Press, 1960: 670.
- [21] SPSS Inc. SPSS for Windows, release 10. 0. 1 Standard Version [M]. Chicago: SPSS Inc, 1999.
- [22] Mcgraw W J, Scarpa J. Minimum environmental potassium for survival of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) in freshwater [J]. Journal of Shellfish Research, 2003, 22: 263-267.
- [23] Douglas W S, Horne M T. The interactive effects of essential ions and salinity on the survival of *Mysidopsis bahia* in 96-H acute toxicity tests of effluents discharged to marine and estuarine receiving waters [J]. Environmental Toxicity and Chemistry, 1997, 16:1996-2001.
- [24] Potts W T W, Fleming W R. The effect of environmental calcium and ovine prolactin on sodium balance in *Fundulus kansae* [J]. Journal of Experimental Biology, 1971, 54:63-75.
- [25] Dharmamba M, Maetz J. Effects of hypophysectomy and prolactin on the sodium balance of *Tilapia mossambica* in fresh water [J]. Gen Comp Endocrinol, 1972, 19: 175-183.
- [26] Ogawa M. The effects of ovine prolactin sea water and environmental calcium on water influx in isolated gills of the euryhaline teleosts *Anguilla japonica* and *Salmo gairdneri* [J]. Comp Biochem Physiol, 1974, 49A:545-553.
- [27] Holliday C W. Magnesium transport by the urinary bladder of the crab, *Cancer magister* [J]. Journal of Experimental Biology, 1980, 85:187-201.
- [28] Dall W, Smith D M. Ionic regulation of four species of penaeid prawn [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1981, 55: 219-232.
- [29] Robertson J D. Osmotic and ionic regulation[M]// Waterman T H. The physiology of Crustacea, Vol. I. Metabolism and growth, New York & London: Academic Press, 1960:317-339.
- [30] Prosser C L. Comparative animal physiology [M]. 3<sup>rd</sup> W. B. Saunders Company, Philadelphia, London, Toronto, edition, 1973:966.
- [31] Robertson J D. Ionic regulation in the crab *Carcinus maenas* (L.) in relation to the moulting cycle [J]. Comp Biochem Physiol, 1960, 1:183-212.
- [32] Graf F. Les sources de calcium pour les Crustaces venant de mer [J]. Arch Zool Exp Gen, 1978, 119:143-161.
- [33] Hessen D O, Alstad N E W, Skardal L. Calcium limitation in *Daphnia magna* [J]. Journal of Plankton Research, 2000, 22 (3):553-568.
- [34] Robertson J D. Further studies on ionic regulation in marine invertebrates [J]. J Exp Biol, 1953, 30: 277-296.
- [35] Greenaway P. Uptake of calcium at the postmoult stage by the marine crabs *Callinectes sapidus* and *Carcinus maenas* [J]. Comp Biochem Physiol, 1983, 75A (2):181-184.

## Effects and mechanism of ambient $Mg^{2+}$ and $Ca^{2+}$ concentrations on growth and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei*

ZHU Chang-bo<sup>1, 2</sup>, DONG Shuang-lin<sup>2\*</sup>, WANG Fang<sup>2</sup>

(1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** In order to clarify the ionic regulation methodology for shrimp farming with inland saline waters, a feeding trial was conducted to investigate the effects and mechanism of ambient  $Mg^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  concentrations on the growth and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei* using artificial seawater at salinity 30. Eight treatments were set: R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 and R8, and the  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  ratios and  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  concentrations (mg/L) were 0.11(35, 330), 0.53(175, 330), 1.59(525, 330), 2.42(800, 330), 3.36(1110, 330), 4.78(1110, 232), 7.87(1110, 141) and 11.81(1110, 94), respectively. The experiment lasted 40 days, but Treatment R8 just continued for 30 days because of shrimp mortality. During the experiment, the growth, molting, food conversion efficiency and energy budget of *L. vannamei* were all significantly affected by both  $Mg^{2+}$  and  $Ca^{2+}$  concentrations in the water ( $P < 0.05$ ). However, shrimp food consumption was just significantly influenced by  $Ca^{2+}$  concentration ( $P < 0.05$ ), not by  $Mg^{2+}$ . It indicated that *L. vannamei* had powerful ability to endure very low ambient  $Mg^{2+}$  concentration, but it was vulnerable to low  $Ca^{2+}$  concentration. In conclusion, if using  $Mg^{2+}$  or  $Ca^{2+}$  deficient saline groundwater for shrimp farming, we only need to complement the  $Mg^{2+}$  concentration to at least 15% of its normal level or  $Ca^{2+}$  concentration to 60% of its normal level in seawater by adding magnesium or calcium salt, and the shrimp growth could be normal.

**Key words:** *Litopenaeus vannamei*;  $Mg^{2+}$ ;  $Ca^{2+}$ ; growth; energy budget

**Corresponding author:** DONG Shuang-lin. E-mail: dongsl@mail.ouc.edu.cn