

水环境 $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ 比值对凡纳滨对虾幼虾生长和能量收支的影响

朱长波^{1,2}, 董双林², 王芳²

(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: 为探索内陆天然咸水的离子组成调控方法, 采用人工海水, 在盐度 30.2、pH 8.2 的条件下, 研究了水环境 $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ 比值对凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 幼虾生长和能量收支的影响。实验持续 45 d, 结果显示, 水环境 $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ 比值对凡纳滨对虾的生长、蜕皮、摄食、食物转化效率以及能量收支影响显著 ($P<0.05$)。凡纳滨对虾对低 $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ 比值的水环境耐受力很弱, 而对较高 $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ 比值水环境的耐受力略强。本研究表明, 在以对虾养殖为目的而进行内陆天然咸水的离子组成的调节时, 必须兼顾多种离子的浓度和比值, 这样才能提高养殖的成功率。[中国水产科学, 2009, 16 (6): 914–922]

关键词: $(\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})$ 比值; 凡纳滨对虾; 生长; 能量收支

中图分类号: Q178.1; S966.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737- (2009) 06-0914-09

自从 20 世纪 90 年代初期, 对虾的内陆养殖首先在泰国开展以来, 这种水产养殖模式已经在世界各国得到了空前的发展^[1]。利用内陆天然地下咸水养虾, 暴发流行性疾病的危险小, 而且对环境的影响容易控制, 故此, 对虾养殖在很短的时间内深入到了远离海岸的内陆, 甚至在干旱的荒漠地区兴起^[2]。

然而, 各地地下咸水的离子组成千差万别, 离子之间的比例相对于海水成分变化极大。“海水组成恒定原理”并不适用于内陆地下咸水, 而且不同地区的咸水在盐度和离子组成上也有较大差异, 很多地区的天然咸水资源都不能直接用于对虾养殖或养殖效果不理想^[1,3]。Boyd 等^[4]通过大量调查发现, 内陆地下咸水普遍缺少 K^{+} 、 Mg^{2+} 等离子; 而在中国黄河三角洲的一些盐碱地区, 地下咸水还缺少 Ca^{2+} ^[5]。对于离子比例失调的情况, 通常都采取人工往水体中添加相应的盐类的方式来调节。缺 K^{+} 水体通常添加钾盐, 如 KCl ^[5-7] 或 KOH ^[8]; 缺 Mg^{2+} 则添加镁盐, 如 MgCl_2 ^[1,4];

缺 Ca^{2+} 则添加钙盐, 如 CaCl_2 ^[5]。在调节水体离子含量时, 通常都是按照正常海水的离子比值来进行, 例如 K^{+} 含量低时调节 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值^[9-11], Mg^{2+} 或 Ca^{2+} 含量较低时通常调节 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值^[12-14]。就 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值而言, Forsberg 等^[9]发现用地下咸水养殖的美国红鱼 (*Sciaenops ocellatus*) 的存活率与地下咸水的 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值显著负相关; 而 Zhu 等^[11]经实验分析指出, 在盐度 30 的环境下, 凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 可以生长的 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值范围是 25.6 ~ 119.3 (mmol/mmol) (即 15.0 ~ 70.3, mg/mg), 而使其生长速度最快的水体 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值范围是 40 ~ 43 (mmol/mmol) (即 23.5 ~ 25.4, mg/mg)。从 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值的研究结果来看, 中华绒螯蟹和罗氏沼虾育苗用水的适宜 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值范围分别是 2.0 ~ 3.0 和 1.8 ~ 2.2 (mg/mg), 而水环境 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值对甲壳动物生长影响的研究尚未见报道。然而, 因为内陆天然咸水的成分的多样化, 有时水体可能同时缺少 2 种以上的离子, 或者某种离

收稿日期: 2009-06-03; 修订日期: 2009-08-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30800851); 国家农业跨越计划项目 (K2002-16); 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项目 (2008YD01)。

作者简介: 朱长波 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 从事水产养殖与水生生态系统建模研究. Tel: 020-84459440; E-mail: changbo@ecowin.org

通讯作者: 董双林. Tel: 0532-66782697; E-mail: dongsl@mail.ouc.edu.cn

子的含量过高,如果依然按照只调整 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值的方式来进行此类水体的改良,其效果将很难预料。

基于以上原因,本实验将在水体 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值均正常的情况下,研究($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值对凡纳滨对虾生长的影响与机制,为内陆天然咸水区域的对虾养殖提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 实验虾的来源和暂养

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,在盐度为 30 的自然海水中暂养 10 d。连续充气,每天投喂海马牌对虾颗粒饲料 2 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%,能量含量为 19.37 kJ/g(干重)。

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可能导致的干扰,实验用水以人工海盐加去离子水配制。人工海盐由青岛通用海大海水素有限公司专门设计和生产,其化学成分经过精密调配,在保证总含盐量和其他成分的含量基本恒定不变的前提下,保持 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值为 3.13 且 $\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$ 比值为 27.8,但是改变($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值。调配好的人工海水盐度为 30.2 左右, pH 8.2。在预实验基础上,本实验设置了 7 个处理, R1、R2、R3_c、R4、R5、R6 和 R7,其($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值分别为: 0.08、0.11、0.15、0.24、0.36、0.51 和 0.71。其中处理 R3_c 的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 含量和($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值为正常海水的值,作为对照。 Na^{+} 、 K^{+} 浓度用等离子发射光谱仪 CCD Simultaneous ICP-OES(VARIAN)测定, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 浓度用 EDTA 络合滴定法测定^[15]。各处理的主要离子含量和比值见表 1。

表 1 实验用人工海水的主要离子浓度及其比值
Tab. 1 Concentrations and ratios of major cations in the experimental artificial seawater

项目 Item	处理 Treatment						
	R1	R2	R3 _c	R4	R5	R6	R7
($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)	0.08	0.11	0.15	0.24	0.36	0.51	0.71
$\text{Mg}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	607	858	1109	1611	2113	2616	3118
$\text{Ca}^{2+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	194	274	354	514	675	835	995
$\text{Na}^{+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	9913	9707	9271	8330	7426	6505	5561
$\text{K}^{+}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	356	349	333	300	267	234	200
$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13
$\text{Na}^{+}/\text{K}^{+}$	27.84	27.81	27.84	27.76	27.81	27.79	27.80
盐度 Salinity	30.2	30.2	30.3	30.2	30.3	30.3	30.2

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。最终选定体质量为(1.135±0.002)g(平均值±标准误差)的实验虾 170 尾,其中 112 尾转入 28 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 45 d(2004 年 8 月 17 日—9 月 30 日)的生长实验。水族箱内分别装满盐度为 30.2 但($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值不同的人工海水。7 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,保持水体溶氧在 6.0 mg/L 以上,氨氮在 0.4 mg/L 以下。实验房间以空调控温,水温控制在(25.0±0.5)℃。光照周期为 14 L : 10 D。实验期间每天过量投喂海马牌对虾颗粒饲料 2 次(6 : 00 和 16 : 00)。另外 42 尾虾在 65℃下烘干至恒重,保存在 -20℃,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 ℃烘干至恒重后保存在 -20 ℃。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 ℃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 ℃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 ×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, MF),以湿重(Wet weight)计的特定生长率(Specific growth rate, SGR_w)和食物转化效率(Food conversion efficiency, FCE_w)分别按以下公式计算:

增重率 = (W₂-W₁) / W₁ × 100%,
MF (% · d⁻¹) = 100 × N_m / (N_s × T),
SGR_w (% · d⁻¹) = 100 × (lnW₂-lnW₁) / T ,
FCE_w (%) = 100 × (W₂-W₁) / C。

其中 W₂ 和 W₁ 分别表示虾最终和起始体质量(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, 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= 净摄食量 × 饲料能值,
生长能 G_e= 结束时虾体总能 - 初始虾体总能,
粪能 F_e= 粪便干重 × 粪便能值,
蜕皮能 E_e= 蜕皮干重 × 蜕皮能值,
排泄能 U_e=UN × 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 1g 氮(以氨的形态)损失的能量为 24.83 kJ^[16]。因为甲壳类的主要排泄产物为氨,尿素的量极少^[17],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 1 个样本值。数据的统计分析用 SPSS10.0^[18] 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's 多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 存活和蜕皮

实验虾存活率的观察结果见表 2。全部处理组的凡纳滨对虾在 45 d 生长实验期间的存活率均为 100%,无死亡现象。

表 2 实验期间凡纳滨对虾的体质量增长、摄食和存活率(45 d)
Tab. 2 Weight gain, feeding and survival of *L. vannamei* during the experiment (45 d) n=4; $\bar{x} \pm SE$

处理 Treatment	初始体质量 /g Initial weight	终体质量 /g Final weight	增重率 /% Weight gain	摄食量 / (g · ind ⁻¹) Food consumption	存活率 /% Survival
R1	1.135 ± 0.001	3.027 ± 0.134 ^a	166.72 ± 11.77 ^a	3.343 ± 0.065 ^a	100.00
R2	1.135 ± 0.001	3.376 ± 0.202 ^a	197.47 ± 17.76 ^a	3.744 ± 0.149 ^{ab}	100.00
R3 _C	1.135 ± 0.001	3.878 ± 0.055 ^b	241.78 ± 4.55 ^b	4.062 ± 0.060 ^b	100.00
R4	1.135 ± 0.001	3.499 ± 0.180 ^{ab}	208.30 ± 16.00 ^{ab}	3.666 ± 0.192 ^{ab}	100.00
R5	1.135 ± 0.001	3.441 ± 0.163 ^{ab}	203.20 ± 14.17 ^{ab}	3.635 ± 0.160 ^{ab}	100.00
R6	1.135 ± 0.002	3.362 ± 0.144 ^a	196.37 ± 12.77 ^a	3.442 ± 0.135 ^a	100.00
R7	1.135 ± 0.001	3.143 ± 0.128 ^a	176.91 ± 11.21 ^a	3.284 ± 0.163 ^a	100.00

注: 同一列数据右上角不同的字母表示数据间差异显著(P<0.05); R1-R7 设置见表 1。
Note: Data with different letters are significantly different from each other (P<0.05). The designing of treatments R1-R7 is shown in Tab. 1.

凡纳滨对虾的蜕皮频率(MF)如图1所示, MF受实验处理的影响很显著($P<0.05$)。对照组 R3_c 的平均 MF 最低, R2、R6 和 R7 的 MF 值都显著

高于 R3_c 的值($P<0.05$), R3_c 、R4 和 R5 组的 MF 之间无明显差异($P>0.05$), 而 R1 的 MF 值显著高于除 R7 外的其他所有处理组的值($P<0.05$)。

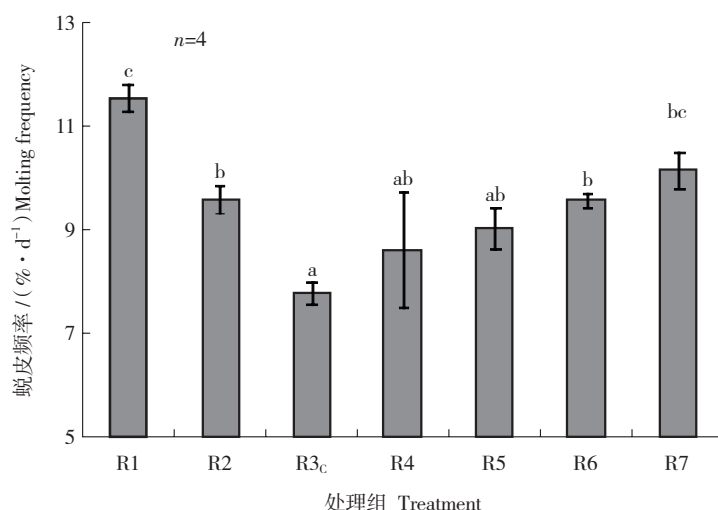


图1 凡纳滨对虾在实验期间的蜕皮频率

柱形图上不同的字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 1 The molting frequencies of *L. vannamei* during the feeding trial

Bars with different letters are significantly different from each other ($P<0.05$).

2.2 生长情况

在生长实验之初, 各组实验虾的体质量(湿)基本一致, 没有显著差异($P>0.05$), 详见表2。而在实验结束时, 受水体($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值变化的影响, 有些处理组对虾的终体质量产生了显著的差异($P<0.05$)。处理 R1、R2、R6 和 R7 组实验虾的平均终体质量显著小于对照组 R3_c 的值($P<0.05$), 而 R3_c 、R4 和 R5 组之间无明显差异($P>0.05$)。实验虾的增重率受水体($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值变化的影响也很显著($P<0.05$), 且各处理间的差异情况与对虾的终体质量的表现一致。由表2中可以看出, 对虾的终体质量和增重率都有以 R3_c 为中心向两端不断减小的趋势。

对虾的特定生长率(SGR)结果见图2。实验处理对凡纳滨对虾的 SGR 影响显著($P<0.05$)。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。处理 R1 和 R7 的 SGR_w 显著低于对照组 R3_c 的

值($P<0.05$), 而其余各处理组与对照组的 SGR_w 无显著差异($P>0.05$)。处理组 R1、R2、R4、R5、R6 和 R7 的 SGR_w 之间也无显著差异($P>0.05$)。各处理组对虾的 SGR_d 、 SGR_p 和 SGR_e 的差异情况完全相同, 只有 R1 组的 SGR 值与对照组 R3_c 有显著差异($P<0.05$), 其余各组间无明显差异($P>0.05$)。由图2还可以看出, 尽管水体($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值从 R3_c 到 R7 急剧增大, 但实验虾的 SGR 的降低幅度相对缓和; 而当($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值从 R3_c 到 R1 小幅度降低时, 对虾的 SGR 值却急剧减小。这表明凡纳滨对虾的生长速度对水体低($\text{Mg}^{2+}+\text{Ca}^{2+}$)/($\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$)比值比较敏感。

2.3 摄食与食物转化效率

实验期间不同处理对虾的平均摄食量影响显著($P<0.05$), 详见表2。R1、R6 和 R7 组实验虾的平均摄食量显著小于对照组 R3_c ($P<0.05$), 但是处理 R2、 R3_c 、R4 和 R5 之间以及 R1、R2、R4、R5、R6 和 R7 之间均无明显差异($P>0.05$)。

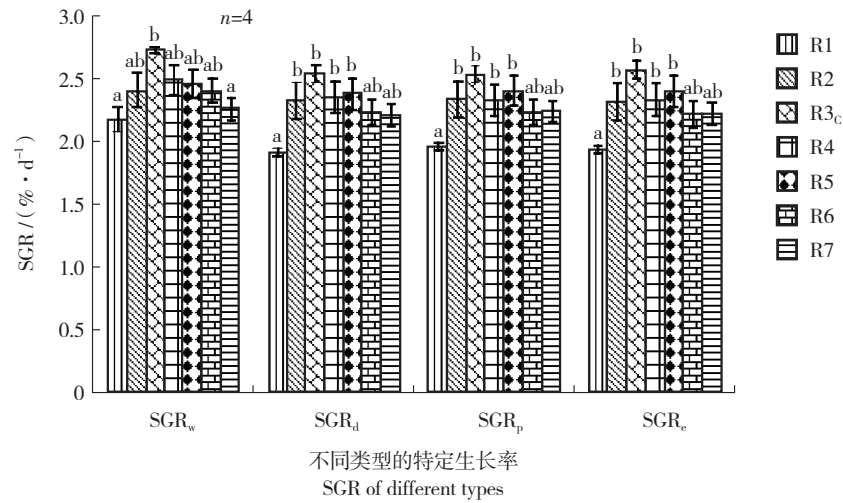


图2 凡纳滨对虾在实验期间的特定生长率(SGR)
柱形图上不同的字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 2 Specific growth rates (SGR) of *L. vannamei* during the experiment
Bars with different letters are significantly different from each other ($P<0.05$).

凡纳滨对虾的食物转化效率(FCE)如图3所示。分别以干重(FCE_d)、蛋白(FCE_p)和能量(FCE_e)表示的各种食物转化效率的变化趋势完全一致。实验处理对凡纳滨对虾的FCE影响显著($P<0.05$),且R1组实验虾的FCE显著低于其余6个处理组对虾的FCE值($P<0.05$),而后面这6个处理之间在FCE上

无明显差异($P>0.05$)。可以看出,水体($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值的升高并未影响凡纳滨对虾的FCE,而($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值的降低对其影响很明显。

2.4 摄食能的分配

生长实验期间对虾的能量收支情况如表3所示。对虾的摄食能受实验处理的影响显著($P<0.05$)。

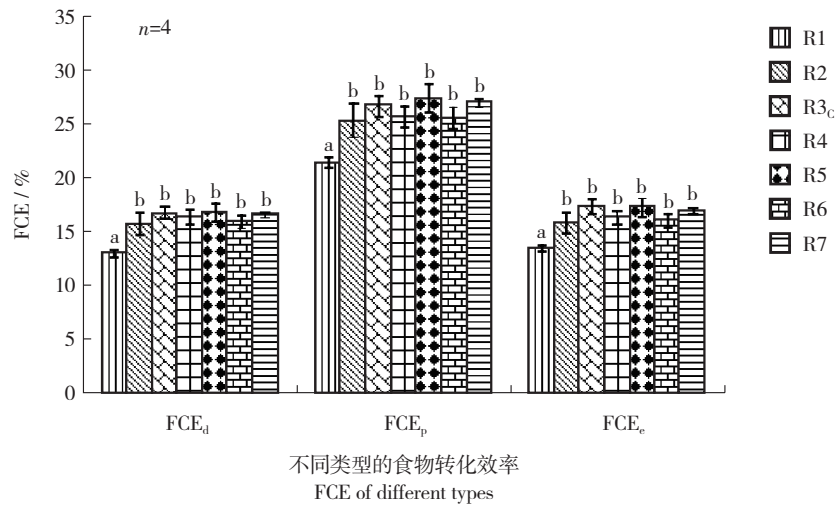


图3 凡纳滨对虾在生长实验期间的食物转化效率
柱形图上不同的字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 3 Different types of food conversion efficiencies (FCE) of *L. vannamei* during the experiment
Bars with different letters are significantly different from each other ($P<0.05$).

因为对虾的摄食能和摄食量直接相关,所以各处理下实验虾的摄食能之间的差异情况与摄食量的情形完全相同(表2、表3)。在摄食能的分配上,生长能和蜕皮能的分配比例受实验处理的影响显著($P<0.05$),而呼吸能、粪便能和排泄能的分配比例未受到实验处理的显著影响($P>0.05$)。凡纳滨对虾

在处理R1下的生长能分配比例显著小于其他6个处理($P<0.05$),而后面这6个处理组对虾的生长能分配比例之间无显著差异($P>0.05$)。相反,对虾在处理R1下的蜕皮能分配比例明显高于其他各处理($P<0.05$),其余6个处理对虾的蜕皮能分配比例之间无显著差异($P>0.05$)。

表3 凡纳滨对虾在实验期间的能量收支
Tab. 3 Energy budget of *L. vannamei* during the experiment n=4; $\bar{x}\pm SE$; %

处理 Treatment	指标 Index					
	C/kJ	G/C	R/C	F/C	U/C	E/C
R1	56.86±1.11 ^a	13.38±0.31 ^a	68.10±0.96	9.83±0.11	6.35±0.15	2.34±0.72 ^b
R2	63.67±2.54 ^{ab}	15.74±0.99 ^b	67.56±1.21	9.28±0.41	6.21±0.19	1.21±0.13 ^a
R3 _c	69.09±1.02 ^b	17.23±0.62 ^b	66.26±0.60	9.40±0.10	6.10±0.11	1.00±0.19 ^a
R4	62.36±3.26 ^{ab}	16.21±0.64 ^b	67.05±0.67	9.50±0.33	6.18±0.10	1.06±0.26 ^a
R5	61.82±2.73 ^{ab}	17.21±0.85 ^b	65.81±1.03	9.72±0.52	5.94±0.16	1.32±0.18 ^a
R6	58.55±2.30 ^a	15.96±0.63 ^b	67.90±0.56	9.07±0.46	6.26±0.09	0.81±0.12 ^a
R7	55.86±2.77 ^a	16.79±0.24 ^b	65.38±0.10	10.41±0.25	5.92±0.02	1.50±0.20 ^a

注: 1) 表中C为摄食能, 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; 2) 同一列数据右上角不同的字母表示数据间差异显著($P<0.05$)。
Note: 1) C 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, feces, excretion and molts, respectively. 2) Data with different letters are significantly different from each other ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 对虾蜕皮频率与摄食、能量收支的关系

从生长情况可以看出,凡纳滨对虾对水体低($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值的耐受力很弱,如对虾在($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值为0.11时其湿重增重率显著低于对照组(比值为0.15),而对较高($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值的耐受力较强,但在该比值达到0.5以上时对虾的生长开始明显滞后,这在对虾的蜕皮情况上也有体现。在本实验中,随着($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值从对照组向两极变化,对虾的蜕皮频率迅速升高,表明对虾由于($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值变化导致的生理胁迫越来越大。蜕皮频率是反映对虾生理状况的一个重要指标,较多的蜕皮次数不仅仅带来蜕皮能分配比例的升高,还会影响实验动物的能量分配策略。蜕皮频率的非正常升高对对虾的生长有极其负面的影响^[19-21],因为对虾在蜕皮期不能进食^[22],而且将大量的能量消耗于频繁的蜕皮过程。甲壳类蜕皮是一个大量耗氧和耗能的过程^[17,23-24],由

于用于代谢(呼吸能+排泄能)的能量增多,体内积存的用于生长的能量则相应减少。

3.2 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量的影响

由表1可知,随着($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值在0.05~0.71之间变动, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 总浓度的下限比正常值低59.4%,上限比正常值高181.2%;而 Na^{+} 和 K^{+} 总浓度的变动上限高出正常浓度不到40%,下限只比正常值低13.1%。所以, ($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值的变动主要是 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度的变化, Na^{+} 和 K^{+} 浓度的相对波动幅度要小得多。因而($Mg^{2+}+Ca^{2+}$)/($Na^{+}+K^{+}$)比值对于凡纳滨对虾的生理效应也主要来自于 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量的影响。 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 都是维持表皮膜的完整性必不可少的成分^[25],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^[26-29]。虽然水体的低 Mg^{2+} 浓度对凡纳滨对虾的成活影响不大^[30-31],但是 Ca^{2+} 浓度低会抑制其Na-K-ATP酶活性,妨碍对虾进行正常的水分和离子调节^[32-33]。对虾表皮的无机成分的99%

以上由 CaCO_3 组成^[34],且其血淋巴内的 Ca^{2+} 浓度总是要高于海水中的 Ca^{2+} 浓度^[35-36],但是对虾体内没有 Ca^{2+} 的贮存机制,因此对虾需要不断地从环境中吸收 Ca^{2+} ^[37-38]。在低 Ca^{2+} 的水体中凡纳滨对虾获取 Ca^{2+} 相对困难,蜕皮后表皮钙化缓慢,进而影响其摄食和生长。Hessen 等^[39] 的研究表明,因为低 Ca^{2+} 环境增加了主动吸收 Ca^{2+} 所需要的能量消耗,水体 Ca^{2+} 过低明显延缓大型溞 *Daphnia magna* 的生长。在本实验中, Ca^{2+} 浓度为 $194 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (同时 Mg^{2+} 浓度为 $607 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时凡纳滨对虾的生长已经受到明显抑制;而在相同盐度下进行的另一个实验中^[40],当 Ca^{2+} 浓度为 $94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (同时 Mg^{2+} 浓度为 $1110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时对虾还能存活和生长。显然,当环境 Ca^{2+} 浓度偏低时,较高浓度的 Mg^{2+} 对其有一定的补偿作用,而当二者的浓度同时偏低时,对虾对水体低 Ca^{2+} 浓度的耐受力急剧减弱,所以仅按照 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值调控水体二价阳离子含量不能完全满足对虾对水环境离子组成的需求。

Holiday^[41] 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 和 Smith^[42] 对 4 种对虾的研究发现了同样的规律。当外界 Mg^{2+} 浓度偏高时,对虾要将其体内 Mg^{2+} 调节到较低水平势必必要消耗大量的能量,而当外界 Mg^{2+} 浓度严重偏高时,就可能超过对虾的调节能力。尽管环境中较高的 Ca^{2+} 浓度有利于对虾从外界吸收 Ca^{2+} ^[38],但是水体 Ca^{2+} 浓度过高对甲壳动物有毒害作用^[43-44]。王慧等^[14] 发现水体高 Ca^{2+} 浓度和高 Mg^{2+} 浓度对中国明对虾 (*F. chinensis*) 的存活有拮抗作用可能就是这个原因。在本实验中, $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 比值最高的处理组的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度是正常值的 2.8 倍,对虾受到了严重的胁迫效应,生长缓慢。

3.3 K^+ 和 Na^+/K^+ 比值的影响

相对于其他离子成分而言, K^+ 在海水和淡水中所占的比例都很低,但它在无脊椎动物的代谢活动中担当重要角色。Robertson^[35] 认为 K^+ 对于维持甲壳动物的神经肌肉系统的效能起着非常重要的作用,而其他研究者认为 K^+ 在甲壳类代谢过程中的作

用更加突出^[42]。 K^+ 是甲壳动物 Na-K-ATP 酶正常行使功能必须的成分^[32],环境 K^+ 缺乏或浓度偏低将抑制 Na-K-ATP 酶的活性^[32-33],进而降低动物进行体内外离子交换转运的能力,导致其生理功能紊乱。实验研究表明,水体 K^+ 含量偏低, Na^+/K^+ 比值过高能导致凡纳滨对虾食欲不振、食物转化效率低下、生长停滞、活力减退甚至死亡^[11,40]。对于水体 K^+ 含量偏低的现象, Forsberg 等认为改良地下咸水用作养殖用水应考虑 Na^+/K^+ 比值^[9]; Zhu 等^[11] 认为在适宜的含盐量范围内,把 Na^+/K^+ 比值作为衡量缺 K^+ 氯化物型咸水区域养殖凡纳滨对虾适宜性和作为水质管理的指标是可行的。当水体二价阳离子含量严重偏高的情况下,尽管 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 和 Na^+/K^+ 比值都正常,但 K^+ 离子的绝对含量必然比正常海水值明显偏低,这也不利于对虾的生长^[11,31],这可能也是本实验中 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 比值偏高的 2 个处理条件下对虾生长较差的原因。

综上所述,尽管水体 Na^+/K^+ 比值和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值均正常,但 $(\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ 比值的变化也会影响凡纳滨对虾的生长。在调节内陆天然咸水的离子组成准备用于对虾养殖时,一定要兼顾多种必须离子的浓度和比值,这样才能提高养殖的成功率。

参考文献:

- [1] Boyd C E. Inland shrimp farming. World Aquaculture 2002: Book of Abstracts. Beijing, China, 2002: 83.
- [2] Jiang D, Gong H. Developing inland shrimp farming in arid regions [C]. World Aquaculture 2002: Book of Abstracts. Beijing, China, 2002: 330.
- [3] 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.
- [4] Boyd C E, Thunjai T. Concentrations of major ions in waters of inland shrimp farms in China, Ecuador, Thailand, and the United States [J]. J World Aqu Soc. 2003, 34: 524-532.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Allan G L, Fielder D S. Can aquaculture help address problems with rising salinity in Australia? [C]. World Aquaculture 2002: Book of Abstracts. Beijing, China, 2002: 32.
- [9] Forsberg J A, Dorsett P W, Neill, W H. Survival and growth of red drum *sciaenops ocellatus* in saline groundwaters of West Texas, USA [J]. J World Aqu Soc, 1996, 27 (4): 462–474.
- [10] 肖国强, 潘鲁青, 冉宪宝, 等. 低盐度地下水养殖南美白对虾的研究 [J]. 海洋科学, 2002, 26 (12): 36–40.
- [11] Zhu C, Dong S, Wang F, et al. Effects of Na/K ratio in seawater on growth and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei* [J]. Aquaculture, 2004, 234: 485–496.
- [12] 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.
- [13] 臧维玲, 江敏, 戴习林, 等. 中华绒螯蟹育苗用水中 Mg^{2+} 与 Ca^{2+} 含量及 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比值对出苗率的影响 [J]. 水产学报, 1998, 22 (2): 111–116.
- [14] 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.
- [15] Clesceri L S, Greenberg A E, Eaton A D. Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th edition [M]. American Public Health Association, Washington, D. C., 1998.
- [16] 崔弈波. 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.
- [17] Waterman, T. H., Editor. The Physiology of Crustacea, Vol. I. Metabolism and Growth [M]. London: Academic Press, 1960: 670.
- [18] SPSS Inc. SPSS for Windows, release 10.0.1 Standard Version [M]. SPSS Inc, Chicago, Illinois, USA, 1999.
- [19] Allan G L, Maguire G B. Effects of pH and salinity on survival, growth and osmoregulation in *Penaeus monodon* Fabricius [J]. Aquaculture. 1992, 107: 33–47.
- [20] Chen J, Kou Y. Effects of ammonia on growth and molting of *Penaeus japonicus* juveniles [J]. Aquaculture 1992, 104: 249–260.
- [21] Vijayan K K, Diwan A D. Influence of temperature, salinity, pH and light on molting and growth in the Indian white prawn *Penaeus indicus* (Crustacea: Decapoda: Penaeidae) under laboratory conditions [J]. Asian Fisheries Science, 1995, 8: 63–72.
- [22] 董双林, 堵南山, 赖伟. pH 值和 Ca^{2+} 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.
- [23] Penkoff S J, Thurberg F P. Changes in oxygen consumption of the American lobster *Homarus americanus* during the molt cycle [J]. Comp Biochem Physiol, 1982, 72: 621–622.
- [24] Cockcroft A C, Wooldridge T. The effects of mass, temperature and molting on the respiration of *Macropetasma africanus* Balss (Decapoda: Penaeoidea) [J]. Comp Biochem Physiol, 1985, 81A: 143–148.
- [25] 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]. Envir Toxic Chem, 1997, 16: 1996–2001.
- [26] Potts W T W, Fleming W R. The effect of environmental calcium and ovine prolactin on sodium balance in *Fundulus kansae* [J]. J Exper Biol, 1971, 54: 63–75.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Wendelaar Bonga S E, Löwik C J M, Van der Meij J C A. Effects of external Mg^{2+} and Ca^{2+} on branchial osmotic water permeability and prolactin secretion in the teleost fish *Sarotherodon mossambicus* [J]. Gen Comp Endocrinol, 1983, 52: 222–231.
- [30] Atwood H L, Young S P, Tomasso J R. Survival and growth of pacific shrimp *Litopenaeus vannamei* postlarvae in low-salinity and mixed-salt environments [J]. J World Aqu Soc, 2003, 34 (4): 518–523.
- [31] McGraw W J, Scarpa J. Minimum environmental potassium for survival of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) in freshwater [J]. J Shellfish Res, 2003, 22: 263–267.
- [32] Winkler A. Effects of inorganic sea water constituents on branchial Na-K-ATPase activity in the shore crab *Carcinus maenas* [J]. Mar Biol, 1986, 92: 537–544.
- [33] Lucu Č, Pavičić D. Role of seawater concentration and major ions in oxygen consumption rate of isolated gills of the shore crab *Carcinus mediterraneus* Csrn [J]. Comp Biochem Physiol, 1995, 112A: 565–572.
- [34] Richards A G. The integument of *Arthropods*. Minneapolis [M]. University of Minnesota Press, 1951: 411.
- [35] Robertson J. D. Osmotic and ionic regulation. In The physiology of Crustacea Vol. I. Metabolism and growth [M]. Waterman T H. New York & London: Academic Press, 1960a: 317–339.

- [36] Prosser C L (Editor). *Comparative animal physiology* [M]. Philadelphia, London, Toronto: W. B. Saunders Company, 1973: 966.
- [37] Robertson J D. Further studies on ionic regulation in marine invertebrates [J]. *J Exp Biol*, 1953, 30: 277–296.
- [38] 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.
- [39] Hessen D O, Alstad N E W, Skardal L. Calcium limitation in *Daphnia magna* [J]. *J Plankt Res*, 2000, 22 (3): 553–568.
- [40] 朱长波. 海水主要阳离子含量对凡纳滨对虾生长的影响及其机制 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [41] Holliday C W. Magnesium transport by the urinary bladder of the crab, *Cancer magister* [J]. *J Exp Biol*, 1980, 85: 187–201.
- [42] Dall W, Smith D M. Ionic regulation of four species of penaeid prawn [J]. *J Exp Mar Biol Ecol*, 1981, 55: 219–232.
- [43] Kline E R, Stekoll M S. The role of calcium and sodium in toxicity of an effluent to Mysid shrimp (*Mysidopsis bahia*) [J]. *Envir Toxicol Chem*. 2000, 19: 234–241.
- [44] Pillard D A, Dufresne D L, Caudle D D, et al. Predicting the toxicity of major ions in seawater to Mysid shrimp (*Mysidopsis bahia*), sheepshead minnow (*Cyprinodon variegatus*), and inland silverside minnow (*Menidia beryllina*) [J]. *Envir Toxicol Chem*, 2000, 19: 183–191.

Effects of ambient ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) / ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) ratio on growth and energy budget of juvenile *Litopenaeus vannamei*

ZHU Chang-bo^{1,2}, DONG Shuang-lin², WANG Fang²

(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 study the ionic composition regulation strategy of inland natural saline waters, a 45-day feeding experiment was carried out to investigate the effects of ambient ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) / ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) ratio on the growth and energy budget of juvenile *L. vannamei*, using artificial seawater of salinity 30.2 and pH 8.2. The experiment lasted 45 days, and the results showed that the growth, molting, feeding, food conversion and energy budget of the test shrimp were all significantly affected by the ambient ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) / ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) ratios ($P < 0.05$). It was found that *L. vannamei* was very vulnerable to low ambient ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) / ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) ratios, but it had better endurance while ambient ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) / ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) ratio is higher. The experiment results indicated that the concentrations and ratios of a few essential ions should be simultaneously concerned while regulating the ionic compositions of the natural saline water for inland shrimp farming. [Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16 (6): 914–922]

Key words: ($\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) / ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) ratio; *Litopenaeus vannamei*; growth; energy budget

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