

文章编号: 1674-5566(2017)02-0189-08

DOI:10.12024/jsou.20160401733

## 罗氏沼虾生长性状的种内杂交优势及遗传力与遗传相关分析

江宗冰<sup>1</sup>, 戴习林<sup>1</sup>, 明磊<sup>1</sup>, 蒋飞<sup>2</sup>, 王海洋<sup>1</sup>, 袁新程<sup>1</sup>, 李玉锋<sup>1</sup>, 丁福江<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学 农业部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306; 2. 上海申漕特种水产开发公司, 上海 201516)

**摘要:** 为加快罗氏沼虾生长速度, 以 5 个罗氏沼虾专门化品系选择系(A、B、C、D、E 系)子四代为亲本, 运用完全双列杂交方法建立了 25 个交配组合, 90 d 后对这些交配组合的子一代生长性状(体长、头胸甲宽、第一腹节宽、第一腹节高、体质量)进行种内杂交优势及遗传力与遗传相关分析。结果表明, 除 D×C 组合外, 其他杂交组合生长性状表型值均优于自交组合; 所有杂交子一代均表现出平均杂种优势与超亲杂种优势, 其中 A×E 组合杂交优势最大, 可使体长增加 17.22%, 体质量增加 71.08%; 体长、头胸甲宽、第一腹节宽、第一腹节高及体质量的遗传力估计值依次为 0.549、0.548、0.527、0.516 和 0.580, 均达到了高度遗传力的标准; 体长与体质量的遗传相关与表型相关均最大, 分别为 0.752 2 和 0.980 0; 头胸甲宽与第一腹节高的遗传相关最小为 0.667 5, 体长与第一腹节高的表型相关最小为 0.924 0。本研究可对罗氏沼虾进一步提高生长速度的杂交选育工作提供科学依据。

**关键词:** 罗氏沼虾; 生长性状; 杂种优势; 遗传力; 遗传相关

**中图分类号:** S 917      **文献标志码:** A

罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)是目前中国主要的淡水养殖虾类, 广泛分布于江浙沪及两广地区<sup>[1]</sup>。但是, 21 世纪以来罗氏沼虾经过多代的人工选育, 虽然育苗及养殖技术有了很大的突破, 但是由于用于罗氏沼虾繁殖的种虾大多来自自繁虾苗的养成群体, 不断的种内近交导致种质退化严重, 从而产生了一系列的问题<sup>[2-3]</sup>。尤其是 2010 年以来, 由于其个体小、生长慢而造成抵抗力下降、病害严重, “蝎子虾”、性早熟及肠孢子虫感染等现象, 严重影响了罗氏沼虾产业的发展。在水产生物的其他领域, 学者们通过杂交选育的方式达到了解决物种生长变慢, 种质退化问题。因此, 通过杂交育种的方法加快罗氏沼虾的生长速度不失为一种良好的解决方式。通过找到优势的交配组合, 进而选育出优良的罗氏沼虾品种, 可以从根本上解决罗氏沼虾种质问题, 从而找到解决以上一系列问题的办法。杂种优势是指两个或者两个以上不同遗传类型(不同基

因型)的物种、品种、或品系杂交产生的杂种一代, 在生长势、抗病性、生活力、产量及品质等方面比其双亲有优势的现象<sup>[4]</sup>。杂种优势现象在自然界是普遍存在的, 并且在水产生物<sup>[5-6]</sup>中得到广泛应用。在罗氏沼虾方面, 范忠刚<sup>[7]</sup>发现孟加拉与越南野生种群杂交后代繁殖力及对氨氮的耐受能力超过亲代; 罗坤等<sup>[8]</sup>利用广西群体、缅甸群体、浙江群体杂交发现 5 月龄杂交子一代生长性状均表现出一定的杂种优势; 周劲松等<sup>[9]</sup>发现浙江群体与缅甸群体杂交后代遗传多样性高于浙江本地品种。

在水产动物育种过程中, 各生长性状之间存在紧密的相关性。通过对不同性状之间遗传力与遗传相关分析, 可以对某些不易选择的性状进行相关性状的间接选择, 从而达到选育目的。目前在我国水产领域, 已经对中国对虾、凡纳滨对虾、大菱鲆、虹鳟等品种进行了生长性状的遗传力与遗传相关分析<sup>[10-13]</sup>。

收稿日期: 2016-04-12

修回日期: 2016-10-22

基金项目: 上海市虾类产业技术体系建设项目(沪农科产字[2014]第 5 号)

作者简介: 江宗冰(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水产动物种质资源与种苗工程。E-mail: jzbinan@163.com

通信作者: 戴习林, E-mail: xldai@shou.edu.cn

本研究首次以 5 个罗氏沼虾专门化品系选择系为基础进行完全双列杂交,通过分析杂交子一代的杂种优势、遗传力与遗传相关,以期对罗氏沼虾的遗传育种工作提供帮助。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

实验用虾的基础群体选自上海申漕特种水产开发公司经过多年封闭式选育留下的体格健壮无病害的 5 月龄罗氏沼虾。通过对其生长性状的测量分析将基础群体分为 5 个专门化品系选择系,其中依据第一腹节宽与体长的比值范围划分出 A 选择系(0.173, 0.189)、B 选择系(0.189, 0.232);依据第一腹节高与体长的比值范围划分出 C 选择系(0.174, 0.196);依据头胸甲宽与体长的比值范围划分出 D 选择系(0.195, 0.221)、E 选择系(0.221, 0.317)<sup>[14]</sup>。实验用虾为以 5 个罗氏沼虾专门化品系选择系子四代为亲本经过完全双列杂交繁育出的杂交一代。

### 1.2 实验设计

从 5 个选择系子四代中挑选出体格健壮、无病害且性腺发育成熟的罗氏沼虾各 25 尾(雌雄比为 4:1),共计 125 尾进行荧光标记,按表 1 进行完全双列杂交,每个交配组合保证各有 4 只雌虾 1 只雄虾,并及时对选育群体补充死亡亲虾。按单因素完全随机实验设计方法对每个交配组合的子代进行生长对比实验,每组设 3 个平行,每个平行 30 尾虾。

表 1 5 个选择系双列杂交配组方式

Tab. 1 The diallel crossing patterns in five strains

	A(♂)	B(♂)	C(♂)	D(♂)	E(♂)
A(♀)	自交	反交	反交	反交	反交
B(♀)	正交	自交	反交	反交	反交
C(♀)	正交	正交	自交	反交	反交
D(♀)	正交	正交	正交	自交	反交
E(♀)	正交	正交	正交	正交	自交

### 1.3 育苗及养殖管理

亲虾交配期间鲜活鱼肉强化培育,待卵变为灰色后将亲虾捞至育苗桶孵化。幼体在孵化桶变为仔虾后,暂养 15 d,之后随机放入水泥池(1.2 m × 1.2 m × 1.0 m)养殖。每个交配组合放 3 个水泥池,每个水泥池放 30 尾仔虾。实验期间,不间断气石充气,并保持水温在(28.0 ± 0.5)

℃。每隔 10 天换水 1 次,换水量为实验水体的一半。每天早晚各投喂一次饲料,早期投喂 0 号料,饲料颗粒逐渐增大至 2 号料,待 2 个月后,开始投喂清洗处理过的野杂鱼及螺狮肉。90 d 后用电子游标卡尺(0.001 cm)及天平(0.01 g)统一测量各水槽个体的体长 BL(Body length)、头胸甲宽 CW(Carapace width)、第一腹节宽 AW(The first abdominal segment width)、第一腹节高 AH(The first abdominal segment height)和体质量 BW(Body weight)5 个生长指标,并统计成活率 SR(Survival ratio)。

### 1.4 数据处理与分析

本实验利用遗传分析软件 QGA 2.0<sup>[15]</sup>并运用加性-显性遗传模型分析 5 个生长性状的杂种优势及遗传相关<sup>[16-18]</sup>。具体的线性模型如下:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + A_j + D_{ij} + B_k + e_{ij} \quad (1)$$

式中:  $Y_{ij}$  为来自母系  $i \times$  父系  $j$  组合的子一代代表型值;  $\mu$  为群体均值;  $A_i$  为母本  $i$  的加性效应;  $A_j$  为父本  $j$  的加性效应;  $D_{ij}$  为来自母系  $i \times$  父系  $j$  组合的显性效应;  $B_k$  为区组效应;  $e_{ij}$  为试验误差。

采用最小范数二阶无偏估计法——MINQUE 法(Minimum Norm Quadratic Unbiased Estimation)估算各性状的方差分量( $\sigma^2 p$ )。

表型方差:

$$\sigma_p^2 = 2\sigma_A^2 + \sigma_D^2 + \sigma_b^2 + \sigma_e^2 \quad (2)$$

加性遗传方差与显性遗传方差:

$$V_A = 2\sigma_A^2, \quad V_D = \sigma_D^2 \quad (3)$$

根据方差分量计算遗传力:

$$h^2 = (V_A + V_D) / V_p \quad (4)$$

遗传相关计算公式如下:

$$\text{表型相关 } r_p = C_p / \sqrt{V_{P(X)} V_{P(Y)}} \quad (5)$$

$$\text{遗传相关 } r_G = C_G / \sqrt{V_{G(X)} V_{G(Y)}} \quad (6)$$

$$\text{加性相关 } r_A = C_A / \sqrt{V_{A(X)} V_{A(Y)}} \quad (7)$$

$$\text{显性相关 } r_D = C_D / \sqrt{V_{D(X)} V_{D(Y)}} \quad (8)$$

式中:  $C_p$ 、 $C_G$ 、 $C_A$  和  $C_D$  分别为性状 X 与 Y 的表型协方差、遗传协方差、加性协方差和显性协方差,  $V_{P(X)}$  与  $V_{P(Y)}$ 、 $V_{G(X)}$  与  $V_{G(Y)}$ 、 $V_{A(X)}$  与  $V_{A(Y)}$ 、 $V_{D(X)}$  与  $V_{D(Y)}$  分别为性状 X 与 Y 的表型方差、遗传方差、加性方差和显性方差。对上述相关系数进行显著性  $t$  检验。

杂种优势计算如下:

$$\text{平均杂种优势 } H_M(\%) = (F_1 - P_M) \times 100 / MP \quad (9)$$

$$\text{超亲杂种优势 } H_B(\%) = (F_1 - P_B) \times 100 / BP \quad (10)$$

式中: $F_1$  为杂交组合子一代某性状的平均值; $P_M$  为自交组合子一代某性状的平均值。 $P_B$  为最优自交子一代中某性状的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长性状表型差异

25 个交配组合子代各生长性状的表型值如表 2 所示,除 D×C 组合外,其他杂交组合生长性状均优于自交组。其中,A×E 杂交组合的体长、体质量以及头胸甲宽均达到最大,A×A 组合除成活率外各生长性状均最小。25 个交配组合成

活率范围为 63.33% ~ 88.33%。

### 2.2 杂交优势分析

罗氏沼虾 5 个生长快品系选择系所构建的 20 个杂交组合的平均杂种优势值、超亲杂种优势值分别列于表 3、表 4。杂交子一代均表现出平均杂种优势,且均具有正向的超亲杂种优势。其中,A×E 的组合在大多数性状中均表现出了最高的杂种优势,说明这两个选择系的罗氏沼虾具有较高的杂交选育价值。相反,B×C 与 C×E 组合的大多性状杂种优势均较小,杂交意义不大。本实验通过杂交选育可使体长增加 5.465% ~ 17.220%,可使体质量增加 20.96% ~ 71.08%。

表 2 罗氏沼虾 25 个交配组合生长性状的表型均值

Tab. 2 Mean phenotype values of growth traits for the twenty-five combinations of *M. rosenbergii*

交配组合 Combinations	表型性状 (M ± SD) Phenotypic traits					
	体长/cm BL	头胸甲宽/cm CW	第一腹节宽/cm AW	第一腹节高/cm AH	体质量/g BW	成活率/% SR
A×A	4.425 ± 0.486 <sup>a</sup>	0.825 ± 0.111 <sup>a</sup>	0.748 ± 0.113 <sup>a</sup>	0.698 ± 0.110 <sup>a</sup>	2.01 ± 0.76 <sup>a</sup>	68.33 <sup>abc</sup>
A×B	5.030 ± 0.729 <sup>efgh</sup>	0.961 ± 0.177 <sup>cdef</sup>	0.864 ± 0.156 <sup>cdefg</sup>	0.804 ± 0.147 <sup>cdefg</sup>	3.22 ± 1.39 <sup>efghi</sup>	75.00 <sup>bcde</sup>
A×C	5.048 ± 0.613 <sup>efgh</sup>	0.964 ± 0.133 <sup>cdef</sup>	0.871 ± 0.106 <sup>defg</sup>	0.809 ± 0.096 <sup>defg</sup>	3.09 ± 1.17 <sup>d<sup>efgh</sup></sup>	66.67 <sup>ab</sup>
A×D	4.799 ± 0.714 <sup>abcdefg</sup>	0.897 ± 0.165 <sup>abcd</sup>	0.801 ± 0.146 <sup>abcde</sup>	0.738 ± 0.139 <sup>abcd</sup>	2.64 ± 1.30 <sup>abcde</sup>	63.33 <sup>a</sup>
A×E	5.386 ± 0.755 <sup>h</sup>	1.039 ± 0.183 <sup>f</sup>	0.904 ± 0.129 <sup>efg</sup>	0.848 ± 0.119 <sup>g</sup>	3.83 ± 1.55 <sup>i</sup>	75.00 <sup>bcde</sup>
B×A	5.098 ± 0.600 <sup>fgh</sup>	0.978 ± 0.122 <sup>def</sup>	0.875 ± 0.105 <sup>defg</sup>	0.813 ± 0.094 <sup>defg</sup>	3.19 ± 1.1340 <sup>d<sup>efghi</sup></sup>	73.33 <sup>bcde</sup>
B×B	4.697 ± 0.276 <sup>abcdef</sup>	0.887 ± 0.077 <sup>abcd</sup>	0.786 ± 0.080 <sup>abcd</sup>	0.709 ± 0.073 <sup>ab</sup>	2.37 ± 0.44 <sup>abc</sup>	80.00 <sup>e</sup>
B×C	4.797 ± 0.719 <sup>abcdefg</sup>	0.906 ± 0.166 <sup>abcd</sup>	0.821 ± 0.147 <sup>abcdef</sup>	0.765 ± 0.134 <sup>abcdef</sup>	2.73 ± 1.33 <sup>cde</sup>	71.67 <sup>abcde</sup>
B×D	5.098 ± 0.587 <sup>fgh</sup>	0.971 ± 0.167 <sup>cdef</sup>	0.854 ± 0.104 <sup>bcdefg</sup>	0.800 ± 0.093 <sup>cdefg</sup>	3.14 ± 1.14 <sup>d<sup>efghi</sup></sup>	70.00 <sup>abcd</sup>
B×E	5.203 ± 0.773 <sup>gh</sup>	1.022 ± 0.182 <sup>ef</sup>	0.906 ± 0.139 <sup>fg</sup>	0.841 ± 0.132 <sup>efg</sup>	3.61 ± 1.56 <sup>hi</sup>	75.00 <sup>bcde</sup>
C×A	5.200 ± 0.644 <sup>gh</sup>	1.009 ± 0.139 <sup>ef</sup>	0.918 ± 0.120 <sup>g</sup>	0.861 ± 0.112 <sup>g</sup>	3.51 ± 1.16 <sup>ghi</sup>	75.00 <sup>bcde</sup>
C×B	4.900 ± 0.520 <sup>cdefg</sup>	0.937 ± 0.142 <sup>bcde</sup>	0.843 ± 0.130 <sup>bcdefg</sup>	0.785 ± 0.125 <sup>bcdefg</sup>	2.73 ± 0.94 <sup>bcde</sup>	68.34 <sup>abc</sup>
C×C	4.448 ± 0.561 <sup>ab</sup>	0.843 ± 0.117 <sup>ab</sup>	0.750 ± 0.117 <sup>a</sup>	0.688 ± 0.118 <sup>a</sup>	2.08 ± 0.85 <sup>ab</sup>	66.67 <sup>ab</sup>
C×D	4.971 ± 0.356 <sup>defg</sup>	0.961 ± 0.087 <sup>cdef</sup>	0.871 ± 0.079 <sup>defg</sup>	0.813 ± 0.075 <sup>defg</sup>	2.94 ± 0.66 <sup>cdefg</sup>	70.00 <sup>abcd</sup>
C×E	4.835 ± 0.545 <sup>bcdefg</sup>	0.938 ± 0.132 <sup>bcde</sup>	0.859 ± 0.118 <sup>cdefg</sup>	0.800 ± 0.110 <sup>cdefg</sup>	2.78 ± 1.04 <sup>bcde</sup>	75.00 <sup>bcde</sup>
D×A	4.932 ± 0.403 <sup>defg</sup>	0.969 ± 0.111 <sup>cdef</sup>	0.869 ± 0.106 <sup>defgh</sup>	0.784 ± 0.083 <sup>bcdefg</sup>	2.86 ± 0.74 <sup>cdefg</sup>	71.67 <sup>abcde</sup>
D×B	4.837 ± 0.479 <sup>bcdefg</sup>	0.943 ± 0.113 <sup>cde</sup>	0.844 ± 0.099 <sup>bcdefg</sup>	0.792 ± 0.092 <sup>fcde</sup>	2.81 ± 0.93 <sup>cdefg</sup>	73.33 <sup>bcde</sup>
D×C	4.648 ± 0.346 <sup>abcde</sup>	0.896 ± 0.081 <sup>abcd</sup>	0.811 ± 0.0780 <sup>bcde</sup>	0.742 ± 0.076 <sup>abcd</sup>	2.33 ± 0.57 <sup>abc</sup>	68.33 <sup>abc</sup>
D×D	4.510 ± 0.605 <sup>abc</sup>	0.875 ± 0.181 <sup>abc</sup>	0.782 ± 0.137 <sup>abc</sup>	0.722 ± 0.123 <sup>abc</sup>	2.22 ± 0.94 <sup>abc</sup>	66.67 <sup>ab</sup>
D×E	4.857 ± 0.703 <sup>cdefg</sup>	0.943 ± 0.159 <sup>cde</sup>	0.852 ± 0.130 <sup>bcdefg</sup>	0.798 ± 0.126 <sup>cdefg</sup>	2.87 ± 1.24 <sup>cdefg</sup>	78.33 <sup>de</sup>
E×A	5.179 ± 0.519 <sup>gh</sup>	1.026 ± 0.135 <sup>ef</sup>	0.911 ± 0.119 <sup>fg</sup>	0.842 ± 0.106 <sup>fg</sup>	3.49 ± 1.12 <sup>fghi</sup>	88.33 <sup>f</sup>
E×B	4.708 ± 0.615 <sup>abcdef</sup>	0.897 ± 0.148 <sup>abcd</sup>	0.774 ± 0.115 <sup>ab</sup>	0.708 ± 0.111 <sup>ab</sup>	2.55 ± 1.11 <sup>abcde</sup>	76.67 <sup>cde</sup>
E×C	4.695 ± 0.600 <sup>abcdef</sup>	0.887 ± 0.141 <sup>abcd</sup>	0.806 ± 0.134 <sup>abcde</sup>	0.746 ± 0.131 <sup>abcd</sup>	2.48 ± 1.00 <sup>abcd</sup>	71.67 <sup>abcde</sup>
E×D	4.920 ± 0.466 <sup>defg</sup>	0.935 ± 0.122 <sup>bcde</sup>	0.830 ± 0.117 <sup>abcdefg</sup>	0.759 ± 0.106 <sup>abcd</sup>	2.81 ± 0.84 <sup>cdefg</sup>	75.00 <sup>bcde</sup>
E×E	4.589 ± 0.396 <sup>abcd</sup>	0.846 ± 0.118 <sup>ab</sup>	0.756 ± 0.102 <sup>a</sup>	0.708 ± 0.100 <sup>ab</sup>	2.27 ± 0.69 <sup>abc</sup>	73.33 <sup>bcde</sup>

注:同列同一指标上标中含不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

Note: The data in the same column without superscript same lower-case letter mean significant differences ( $P < 0.05$ )

表3 罗氏沼虾生长性状的杂交优势值

Tab.3 The heterosis values of growth traits in *M. rosenbergii*

杂交组合 Combinations	体长 BL		头胸甲宽 CW		第一腹节宽 AW		第一腹节高 AH		体质量 BW	
	H <sub>M</sub>	H <sub>B</sub>								
A × B	11.027	7.802	13.221	9.261	13.346	10.547	14.907	14.063	46.33	35.24
A × C	15.507	15.810	18.248	16.982	19.459	19.611	20.474	19.544	61.40	58.66
A × D	8.923	7.895	9.756	6.660	9.241	6.869	7.177	5.462	29.94	23.72
A × E	17.220	15.126	23.582	22.079	20.762	20.114	20.179	19.387	71.08	61.32
B × C	6.031	3.213	6.490	3.849	8.357	5.812	10.969	9.311	22.71	15.25
B × D	7.901	5.744	8.656	7.877	8.282	7.946	11.283	12.279	29.61	25.61
B × E	6.735	5.498	10.701	8.113	8.975	6.845	9.303	9.219	32.97	30.17
C × D	7.380	6.642	8.061	6.128	9.835	7.584	10.320	7.731	22.41	18.50
C × E	5.465	3.847	8.066	7.906	10.625	10.171	10.832	9.259	20.96	15.94
D × E	7.458	6.535	9.170	11.028	9.429	11.300	8.873	9.932	26.45	25.17

表4 罗氏沼虾生长性状的杂交优势分析

Tab.4 The heterosis analysis of growth traits in *M. rosenbergii*

组合 Combinations	类型 Type	体长/% BL	头胸甲宽/% CW	第一腹节宽/% AW	第一腹节高/% AH	体质量/% BW
H <sub>M</sub>	平均优势	9.365	11.595	11.831	12.432	36.39
	优势组合率	100%	100%	100%	100%	100%
	优势幅度	5.465 - 17.220	6.490 - 23.582	8.282 - 20.762	7.177 - 20.179	20.96 - 71.08
H <sub>B</sub>	平均优势	7.811	9.988	10.680	11.619	30.96
	优势组合率	100%	100%	100%	100%	100%
	优势幅度	3.213 - 15.810	3.849 - 22.079	5.812 - 20.114	5.462 - 19.544	15.25 - 61.32

### 2.3 遗传力与遗传相关分析

由表5可知,5个生长性状体长、头胸甲宽、第一腹节宽、第一腹节高及体质量的遗传力依次为0.549、0.548、0.527、0.516、0.580,均达到了高度遗传力的标准( $h^2 \geq 0.30$ )<sup>[13]</sup>,且显著性检验均未达到显著水平。

由表6可知,体长与体质量的遗传相关与表型相关均最大,头胸甲宽与第一腹节高的遗传相关最小,而体长与第一腹节高的表型相关最小。经显著性检验,各生长性状间的表型相关达到极

显著水平,而遗传相关均未达到显著水平。

表5 罗氏沼虾生长性状的遗传力估计值(均值±标准误)

Tab.5 Estimated heritabilities of growth traits in *M. rosenbergii* ( $M \pm SE$ )

性状 Traits	遗传力 $h^2$
体长 BL	0.549 ± 0.261 2
头胸甲宽 CW	0.548 ± 0.236 5
第一腹节宽 AW	0.527 ± 0.206 7
第一腹节高 AH	0.516 ± 0.226 9
体重 BW	0.580 ± 0.280 7

表6 罗氏沼虾生长性状的遗传相关与表型相关

Tab.6 Genetic correlations and phenotypic correlations for growth traits in *M. rosenbergii*

	体长 BL	头胸甲宽 CW	第一腹节宽 AW	第一腹节高 AH	体质量 BW
体长 BL		0.727 1	0.704 4	0.694 6	0.752 2
头胸甲宽 CW	0.947 1**		0.680 7	0.667 5	0.728 1
第一腹节宽 AW	0.930 3**	0.955 1**		0.670 8	0.697 1
第一腹节高 AH	0.924 0**	0.936 8**	0.982 4**		0.693 3
体质量 BW	0.980 0**	0.954 8**	0.933 8**	0.930 5**	

注:对角线上为遗传相关,对角线下为表型相关,\* \*表明相关性极显著, $P < 0.01$

Note: the numbers above diagonal are genetic correlations; the numbers below diagonal are phenotypic correlations; \* \* means significantly correlations,  $P < 0.01$

### 3 讨论

#### 3.1 杂交优势

杂交育种是水产生物主要的育种手段之一,目前,国内在多种水产生物杂交育种方面取得不错的研究进展。国内研究杂种优势的方法主要有两种<sup>[19-20]</sup>,一是基于数量性状的数值预测杂种优势,比如李思发、毕洋、郑怀平等分别利用数量遗传学的方法对不同品种的红鲤、瓯江彩鲤及牡蛎的杂种优势进行了研究<sup>[21-23]</sup>。二是基于分子标记的方法分析杂种优势,王炳谦等<sup>[24]</sup>、李思发等<sup>[25]</sup>、王爱民等<sup>[26]</sup>分别运用 SSR 标记法分析了虹鳟、罗非鱼、马氏珠母贝后代杂种优势。

本实验利用 5 个罗氏沼虾专门化品系选择系进行完全双列杂交,通过分析杂交子一代的生长性状来分析其杂种优势。结果表明,几乎所有的杂交组合均表现出了一定的杂交优势,与罗坤等<sup>[8]</sup>研究结果相符合,且均具有超亲杂种优势。其中 A × E 组合在所有的生长性状上均高于其他组合,杂种效果较为理想,这可能是由于专门化选择系 A 与 E 选择系的配合力较强,易产生杂种优势。

专门化品系选育是进行配套系选育的基础研究,本实验的基础群体经过邓平平<sup>[14]</sup>、蒋飞<sup>[27]</sup>、王海洋<sup>[28]</sup>等多代选育,每代均从各选择系群体中挑选符合各自体型的个体作为亲虾进行繁育,经过蒋飞<sup>[27]</sup>、王海洋<sup>[28]</sup>等多代的遗传多样性分析,每代的纯合基因位点增加,基因型趋近于纯合,其遗传纯度较高,较易利用它们的杂种优势,因而其杂交子一代均表现出了杂种优势,这说明我们在以后的配套系育种研究中选择纯度较高的选育系进行配套杂交可以获得较好的效果。当前,水产生物的选育多是单一群体的多代选育,极易造成近交衰退,降低了种群的杂合度,限制了选育良种后代的可利用性。杂交可以增加子代的杂合度及遗传多样性<sup>[9]</sup>,便于适应更多样的生长环境。

#### 3.2 遗传力与遗传相关

本实验运用加性-显性模型对罗氏沼虾 5 个生长性状的遗传力进行估计,以探索各生长性状的选育潜力。由表 5 可知,5 个生长性状体长、头胸甲宽、第一腹节宽、第一腹节高和体质量的遗传力估计值依次为 0.549、0.548、0.527、0.516、

0.580,均属于高度遗传力,说明这 5 个生长性状具有较大的遗传改良潜力,经  $t$  检验,各性状遗传力间均未达到显著水平。高的生长性状遗传力适用于个体或群体的表型选择法进行育种,同样符合本实验的研究方法。在水产动物育种研究中,何玉英等<sup>[10]</sup>、徐如卫等<sup>[11]</sup>、马爱军等<sup>[12]</sup>、卢国等<sup>[13]</sup>分别对中国对虾、凡纳滨对虾、大菱鲆、虹鳟的生长性状进行了遗传力研究。从现有水产生物的研究结果来看,多数生长性状的遗传力范围大致为 0.2 ~ 0.7,本实验结果与其吻合。MALECHA 等发现罗氏沼虾幼体早期生长率遗传力估计值在 0.2 ~ 0.7 之间<sup>[29]</sup>;同时 NISSARA 等研究发现罗氏沼虾 2 月龄时与生长相关性状的遗传力要远远大于 5 月龄时的遗传力<sup>[30]</sup>;罗坤等运用非求约束最大似然法研究罗氏沼虾 5 月龄的生长性状遗传力为 0.02 ~ 0.07,属低等遗传力<sup>[31]</sup>。何玉英等研究中国对虾生长性状的遗传力时同样发现可能由于中国对虾发育日龄的不同造成与其他学者的研究结果有一定差异<sup>[10]</sup>。此外,即使是同一物种,由于亲本来源的不同,也会造成估计结果的差异。

本研究中,罗氏沼虾 5 个生长性状的遗传相关与表型相关均比较高,其中体长与体质量的遗传相关与表型相关均最大,分别达到 0.752 2 和 0.980 0。头胸甲宽与第一腹节高的遗传相关最小,为 0.667 5;体长与第一腹节高的表型相关最小,为 0.924 0,这与凡纳滨对虾的研究结果接近<sup>[32]</sup>。体质量与其他性状间的遗传相关(0.69 ~ 0.75)与表型相关(0.93 ~ 0.98)均较大,同时体质量的遗传力在 5 个生长性状中也最高,因此实验通过对体质量的选择可以同时达到选择其他相关性状的目,这对今后的继续选育工作提供了很大的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 刘恩生, 万全. 罗氏沼虾的养殖现状与发展前景[J]. 安徽农业大学学报, 1997, 24(2): 189-192.  
LIU E S, WAN Q. Status and prospect of culture of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 1997, 24(2): 189-192.
- [2] 史建华, 肖雨, 徐琴英. 罗氏沼虾引种复壮技术的研究[J]. 水产科技情报, 2001, 28(2): 64-67.  
SHI J H, XIAO Y, XU Q Y. Studies on the introductioal rejuvenated technique of *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2001, 28(2):

- 64-67.
- [3] 卢小花, 江林源, 黄光华, 等. 罗氏沼虾幼体质量对育苗影响的研究[J]. 科学养鱼, 2011(1): 7-8.  
LU X H, JIANG L Y, HUANG G H, et al. Study on influence of juvenile quality on seed rearing of giant freshwater prawn[J]. Scientific Fish Farming, 2011(1): 7-8.
- [4] 楼允东. 鱼类育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 40-107.  
LOU Y D. Fish breeding[M]. Beijing: Agricultural Press of China, 1999: 40-107.
- [5] 胡志国, 刘建勇, 包秀凤, 等. 九孔鲍双列杂交家系子代的杂种优势与配合力分析[J]. 南方水产科学, 2014, 10(1): 43-49.  
HU Z G, LIU J Y, BAO X F, et al. Combining ability and heterosis of hybridization between cultured and wild stocks of *Haliotis diversicolor supertexta* [J]. South China Fisheries Science, 2014, 10(1): 43-49.
- [6] 吴杨平, 陈爱华, 张雨, 等. 红壳文蛤双列杂交及杂种优势分析[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 43-49.  
WU Y P, CHEN A H, ZHANG Y, et al. Heterosis analysis and diallel cross of red *Meretrix meretrix* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(1): 43-49.
- [7] 范忠刚. 两个野生罗氏沼虾引进种群的杂交选育研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2014.  
FAN Z G. Hybrid breeding studies on two wild introduced populations of *Macrobrachium rosenbergii* [D]. Hefei: Anhui University, 2014.
- [8] 罗坤, 杨国梁, 孔杰, 等. 罗氏沼虾不同群体杂交效果分析[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(3): 67-73.  
LUO K, YANG G L, KONG J, et al. Analysis of the effect of hybridization between different groups of *Macrobrachium rosenbergii* [J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(3): 67-73.
- [9] 周劲松, 曹哲明, 杨国梁, 等. 罗氏沼虾缅甸引进种和浙江本地种及其杂交种的生长性能与SRAP分析[J]. 中国水产科学, 2006, 13(4): 667-673.  
ZHOU J S, CAO Z M, YANG G L, et al. Study on hybrid of burma introduced and Zhejiang locally-cultured populations of giant prawn *Macrobrachium rosenbergii* de man and SRAP marker [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(4): 667-673.
- [10] 何玉英, 王清印, 谭乐义, 等. 中国对虾生长性状的遗传力和遗传相关估计[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10499-10502.  
HE Y Y, WANG Q Y, TAN L Y, et al. Estimates of heritability and genetic correlations for growth traits in Chinese shrimp *Fenneropenaeus chinensis* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(17): 10499-10502.
- [11] 徐如卫, 钱昭英, 刘小林, 等. 凡纳滨对虾生长性状遗传参数的估计[J]. 水产学报, 2013, 37(5): 672-678.  
XU R W, QIAN Z Y, LIU X L, et al. Genetic parameter estimation for growth traits of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(5): 672-678.
- [12] 马爱军, 王新安, 杨志, 等. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)幼鱼生长性状的遗传力及其相关性分析[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(5): 499-504.  
MA A J, WANG X A, YANG Z, et al. The growth traits and their heritability of young turbot (*Scophthalmus maximus* L.) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(5): 499-504.
- [13] 户国, 谷伟, 姜再胜, 等. 虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)选育群体主要体尺性状表型和遗传相关分析[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(3): 548-553.  
HU G, GU W, JIANG Z S, et al. Estimation of phenotypic and genetic correlation for body measurement traits in a selective breeding population of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(3): 548-553.
- [14] 邓平平. 罗氏沼虾快速生长专门化品系选择前系的组建[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.  
DENG P P. The structuring of *Macrobrachium rosenbergii* srapid growth of specialized strain [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [15] 朱志翔. 遗传分析软件QGASation2.0和GMDR-GPU的开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
ZHU Z X. Development of the genetic analysis softwares QGASation 2.0 and GMDR-GPU [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [16] 朱军. 遗传模型分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 1-15, 6-174.  
ZHU J. Genetic model and analysis methods [M]. Beijing: Agricultural Press of China, 1996: 1-15, 6-174.
- [17] CRUZ P, IBARRA A M. Larval growth and survival of two catarina scallop (*Argopecten circularis*, Sowerby, 1835) populations and their reciprocal crosses [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 212(1): 95-110.
- [18] 朱军. 作物杂种后代基因型值和杂种优势的预测方法[J]. 生物数学学报, 1993, 8(1): 32-44.  
ZHU J. Methods of predicting genotype value and heterosis for offspring of hybrids [J]. Journal of Biomathematics, 1993, 8(1): 32-44.
- [19] 李明爽, 傅洪拓, 龚永生, 等. 杂种优势预测研究进展[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 117-122.  
LI M S, FU H T, GONG Y S, et al. Progresses in the study on the heterosis prediction [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(1): 117-122.
- [20] 钟昌松, 李琳, 蒲志刚, 等. 分子标记预测杂种优势的研究现状[J]. 种子, 2006, 25(5): 43-47.  
ZHONG C S, LI L, PU Z G, et al. Research status about forecasting heterosis by using molecular markers [J]. Seed, 2006, 25(5): 43-47.

- [21] 李思发,王成辉,刘志国,等. 三种红鲤生长性状的杂种优势与遗传相关分析[J]. 水产学报, 2006, 30(2): 175-180.  
LI S F, WANG C H, LIU Z G, et al. Analysis of heterosis and genetic correlation of growth traits in three variants of red common carp[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(2): 175-180.
- [22] 毕详,项松平,王剑,等. 瓯江彩鲤配套选育系繁殖性状的配合力测定与杂交优势分析[J]. 中国水产科学, 2012, 19(5): 775-783.  
BI X, XIANG S P, WANG J, et al. Combining ability and heterosis analysis for reproductive traits of complete set selection lines in Oujiang color common carp, *Cyprinus carpio* var. color[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(5): 775-783.
- [23] 郑怀平,王迪文,林清,等. 太平洋牡蛎与葡萄牙牡蛎两近缘种间杂交及其早期阶段生长与存活的杂种优势[J]. 水产学报, 2012, 36(2): 210-215.  
ZHENG H P, WANG D W, LIN Q, et al. Hybridization between the two close related species *Crassostrea gigas* and *C. angulata* and heterosis for growth and survival at early stage of life history[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(2): 210-215.
- [24] 王炳谦,谷伟,高会江,等. 利用配合力和微卫星标记预测虹鳟品系间的杂交优势[J]. 中国水产科学, 2009, 16(2): 206-213.  
WANG B Q, GU W, GAO H J, et al. Prediction of hybridization advantage among five strains of rainbow trout by combination ability and SSR markers[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(2): 206-213.
- [25] 李思发,颜标,蔡完其,等. 尼罗罗非鱼与萨罗罗非鱼正反杂交后代耐盐性能的杂种优势及其与遗传的相关性的SSR分析[J]. 中国水产科学, 2008, 15(2): 189-197.  
LI S F, YAN B, CAI W Q, et al. Heterosis and related genetic analysis by SSR for the salt tolerance of reciprocal hybrids between Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and blackchin tilapia (*Sarotherodon melanotheron*) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(2): 189-197.
- [26] 王爱民,王焉,顾志峰,等. 马氏珠母贝 (*Pinctada martensii*) 2个地理群体杂交子代的杂种优势和遗传变异[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(1): 140-147.  
WANG A M, WANG Y, GU Z F, et al. Heterosis and genetic variation of hybrids from two geographical populations of pearl oyster, *Pinctada Martensii* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(1): 140-147.
- [27] 蒋飞. 罗氏沼虾专门化品系选择系生长、遗传及配套杂交分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.  
JIANG F. Growth, genetic and crossbreeding analysis of specialized strains of *Macrobrachium rosenbergii* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.
- [28] 王海洋. 罗氏沼虾专门化品系选择系生长及遗传参数分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.  
WANG H Y. Growth and genetic parameters analysis of specialized strains of *Macrobrachium rosenbergii* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015.
- [29] MALECHA S R, MASUNO S, ONIZUKA D. The feasibility of measuring the heritability of growth pattern variation in juvenile freshwater prawns, *Macrobrachium rosenbergii* (De Man) [J]. Aquaculture, 1984, 38(4): 347-363.
- [30] KITCHAROEN N, RUNGSIN W, KOONAWOOTRITTRIRON S, et al. Heritability for growth traits in giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii* (de Mann 1879) based on best linear unbiased prediction methodology[J]. Aquaculture Research, 2012, 43(1): 19-25.
- [31] 罗坤,孔杰,栾生,等. 罗氏沼虾生长性状的遗传参数及其相关性[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(3): 80-84.  
LUO K, KONG J, LUAN S, et al. Correlation analysis for genetic parameters of growth traits of *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(3): 80-84.
- [32] PÉREZ-ROSTRO C I, IBARRA A M. Quantitative genetic parameter estimates for size and growth rate traits in Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei* (Boone 1931) when reared indoors[J]. Aquaculture Research, 2003, 34(7): 543-553.

## Analysis of intraspecific heterosis, heritability and genetic correlation of growth traits of *Macrobrachium rosenbergii*

JIANG Zongbing<sup>1</sup>, DAI Xilin<sup>1</sup>, MING Lei<sup>1</sup>, JIANG Fei<sup>2</sup>, WANG Haiyang<sup>1</sup>, YUAN Xincheng<sup>1</sup>, LI Yufeng<sup>1</sup>, DING Fujiang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Freshwater Fishery Germplasm Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Shencao Special Fisheries Development Co., Shanghai 201516, China)

**Abstract:** The germplasm resources of *M. rosenbergii* are declining in China. To solve this problem, we used 5 strains (A, B, C, D, E) as parents to make complete diallel cross and built 25 mating combinations, whose intraspecific heterosis and genetic correlations of growth traits (body length, carapace width, the first abdominal segment width, the first abdominal segment height and body weight) were analyzed at 90 dph, respectively. The results indicated that the growth traits of all hybrid combinations were better than those of self-combination except D × C. The heterosis was observed in all hybrid combinations, the hybrid combinations of A × E has the greatest heterosis. It can increase the body length by 17.22%, and can increase the weight gain by 71.64%. The heritability was 0.549, 0.548, 0.527, 0.516, 0.580 for body length, carapace width, the first abdominal segment width, the first abdominal segment height and body weight, respectively. The genetic correlation and phenotypic correlation between body length and body weight was the highest (0.7522 and 0.98), while the genetic correlation between carapace width and first abdomere segment height was the lowest (0.6675), and the phenotypic correlation between body length and the first abdominal segment height was the lowest (0.9240). The results would provide theoretic basis for further fast growth selective breeding and hybridization of *M. rosenbergii*.

**Key words:** *M. rosenbergii*; growth traits; heterosis; heritability; genetic correlation