

王伦, 王崇懿, 刘建勇, 等. 凡纳滨对虾多代选育群体生长和耐综合胁迫性状的配合力及杂种优势分析[J]. 海洋学报, 2022, 44(4): 65–73, doi:10.12284/hyxb2022064

Wang Lun, Wang Chongyi, Liu Jianyong, et al. Analysis of combining ability and heterosis of growth and comprehensive stress tolerance traits of *Litopenaeus vannamei* multi-generation breeding population[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(4): 65–73, doi:10.12284/hyxb2022064

# 凡纳滨对虾多代选育群体生长和耐综合胁迫性状的配合力及杂种优势分析

王伦<sup>1</sup>, 王崇懿<sup>1</sup>, 刘建勇<sup>1</sup>, 傅学丽<sup>1\*</sup>

(1. 广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 为筛选凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 最佳的交配组合方式, 以 5 个不同遗传背景的凡纳滨对虾群体为亲本, 经交配构建 12 个组合 F<sub>1</sub> 代。利用 ASReml4 软件估计凡纳滨对虾 12 个组合 105 日龄的生长和耐综合胁迫 (高盐 (35)、低 pH (6±0.1) 与高氨氮 (70 mg/L) 共同胁迫) 性状的一般配合力 (GCA) 及特殊配合力 (SCA)。结果显示: 亲本的 SCA 对子代性状的表现起主导作用, 组合 K♀×K♂ (0.35±0.25)、GX♀×W♂ (0.31±0.22) 和 GX♀×M♂ (0.29±0.29) 体质量的 SCA 排名靠前; 组合 GX♀×GX♂ (3.65±1.79)、L♀×L♂ (2.19±2.33) 和 W♀×GX♂ (1.30±2.03) 耐综合胁迫的 SCA 排名靠前。杂种优势分析表明, 杂交组合的生长 (体质量、体长、头胸甲长与腹节全长) 和耐综合胁迫性状均表现出一定的杂种优势, 6 个杂交组合 GX♀×W♂、GX♀×K♂、GX♀×M♂、W♀×GX♂、K♀×GX♂ 与 K♀×M♂ 生长及耐综合胁迫性状的杂种优势率除组合 GX♀×K♂ 为负外 (-5.95%~1.00% 和 -8.03%), 其余均为正 (0.10%~80.79% 和 6.87%~42.86%), 其中, 组合 GX♀×W♂ 体质量的杂种优势最高 (25.52%); 组合 W♀×GX♂ 耐综合胁迫的杂种优势较高 (41.72%)。研究表明, 杂交组合 GX♀×W♂ 体质量的 SCA 和杂种优势均最高; 杂交组合 W♀×GX♂ 耐综合胁迫的 SCA 最高且杂种优势较高, 可考虑分别加强该两组合在生长和耐综合胁迫性状方面的配套杂交应用。

**关键词:** 凡纳滨对虾; 生长性状; 耐综合胁迫; 配合力; 杂种优势

中图分类号: S917.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)04-0065-09

## 1 引言

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 又名南美白对虾, 具有生长快、抗逆能力强、适宜高密度养殖等优点, 是世界三大对虾养殖品种之一<sup>[1-4]</sup>。据统计, 2020 年我国凡纳滨对虾海水养殖产量达 119.774×10<sup>4</sup> t, 占海水虾类养殖总产量的 80.50% 以上, 是我国最主要的水产对虾养殖品种<sup>[5]</sup>。由于该品种并非我国的本地

种, 大多数亲本种群是从国外进口或经过多代选育的亲本种群<sup>[6-7]</sup>, 经过多代选育后有效种群规模较小, 可能会带来重要经济性状近交衰退的风险<sup>[8]</sup>。杂交是解决以上问题的有效方法之一<sup>[7]</sup>, 是创造变异的重要途径; 杂交可以产生亲本从未表现的超亲优势 (获得杂种优势)<sup>[9]</sup>, 从而显著提高子代的生活力。因此, 利用杂交将 2 个及 2 个以上不同遗传背景品种的个体基因自由组合, 创造出新的遗传类型, 经人工选择优良

收稿日期: 2021-09-20; 修订日期: 2021-11-21。

**基金项目:** 国家重点研发计划重点专项 2020 年度项目 (SQ2020YFD090053-05); 中央财政 2019 年渔业成品油价格补助湛江市级统筹部分资金; 2019 年度广东省科技专项资金竞争性分配项目 (2019A04008); 广东省科技创新战略专项资金竞争性分配项目 (2018A04007); 湛江市科技发展专项资金竞争性分配项目 (2018A01013)。

**作者简介:** 王伦 (1994—), 男, 贵州省兴义市人, 从事水产动物数量遗传育种研究。E-mail: 2540166511@qq.com

\* **通信作者:** 傅学丽 (1976—), 女, 助理研究员, 从事渔业经济与管理研究。E-mail: fuxl@gdou.edu.cn

亲本,继而培育出新品种。在凡纳滨对虾育种领域,我国虽已培育出多个新品种,但采用的方法多为选择育种(家系选择、群体选择及品系选择),采用杂交育成的新品种仅见“壬海 1 号”<sup>[10]</sup>,导致对杂种优势的利用远远不够。

近年来,对虾的放养密度不断增加,但高密度养殖会降低水环境中的 pH,增加总氮和氨氮浓度<sup>[11-12]</sup>(对虾高密度养殖氨氮浓度高达 46 mg/L<sup>[13]</sup>,pH 低至 4.1<sup>[14]</sup>);而夏季的高温则会增加养殖水体中盐度<sup>[15]</sup>。生活在较高盐度、氨氮和较低 pH 水体中,对虾会出现生长缓慢、免疫力下降、对病原菌的易感性提高等不良现象,致使养殖成活率降低<sup>[16-18]</sup>。凡纳滨对虾耐高盐度、耐高氨氮和耐低 pH 的杂交育种遗传改良是解决以上问题的重要途径。

配合力分析是水产动物杂交育种研究中的重要工作之一,是遗传改良的重要手段,也是杂种优势利用的前提<sup>[19]</sup>。有关凡纳滨对虾生长或单因子胁迫的配合力研究已有相关报道,王浩等<sup>[20]</sup>研究了凡纳滨对虾 7 个引进群体体质量的配合力;胡志国等<sup>[21-22]</sup>报道了凡纳滨对虾耐盐度和耐高氨氮胁迫的杂种优势和配合力,分别选出耐高低盐一般配合力(General Combining Ability, GCA)较高的泰国正大(TZ)群体及耐高氨氮的强优势组合(美国迈阿密 SIS 群体(UM)与美国夏威夷 SIS 群体(UH)的杂交组合,即(UM×UH)组合)群体。然而在凡纳滨对虾实际养殖生产中,其所受的胁迫常常为多个环境胁迫因子的综合胁迫,但在凡纳滨对虾耐综合胁迫(高盐、低 pH 与高氨氮共同胁迫)配合力分析方面的研究未见报道,因此有必要开展该方面的研究,以实现育种目标的进一步提高。本研究以凡纳滨对虾“兴海 1 号”选育核心群体与国外引进的不同遗传背景凡纳滨对虾群体交配,构建 12 个群体,以生长和耐受性状为主要选育目标,探究凡纳滨对虾的生长和耐综合胁迫的配合力及杂种优势,以期对凡纳滨对虾生长和耐受性状选育提供依据与参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 实验材料

#### 2.1.1 实验所用亲虾来源

凡纳滨对虾“兴海 1 号”新品种核心群体(GX):以我国广东湛江和广西东兴的 7 个凡纳滨对虾养殖群体(3 880 尾)为基础群体,以成活率和体质量为目标性状,采用 BLUP 选育技术,从 2011 年开始经连续 7 代选育而成,并在 2018 年通过了全国水产原种和良种

审定委员会审定。该品种的主要优点为:生长速度快、养殖存活率高(养殖 100 日龄的凡纳滨对虾“兴海 1 号”平均成活率为 77.80%,平均体质量为 15.42 g,与 SIS 一代苗相比,平均成活率提高了 15.0%)、抗逆性强(主要表现为抗高氨氮)。该品种核心群体经本课题组选育至今已 10 年。

泰国群体(W 和 L):2019 由泰国引进两个多世代选育群体,分别为生长速度快的 W 品系及养殖适应性强,适合在高位池塘、普通虾塘、大棚等多种养殖模式养殖的 L 品系。

美国群体(K 和 M):2019 由美国引进两个多世代选育群体,分别为兼具快长、养殖适应性强强的 K 品系和养殖适应性强强的 M 品系。

以上 5 个不同遗传背景凡纳滨对虾群体均经多世代选育而成,具有较高的遗传纯度。

#### 2.1.2 家系构建和对虾养殖

实验于 2020 年 3 月在湛江市国兴水产科技有限公司(国兴公司)进行,按袁瑞鹏等<sup>[23]</sup>的方法强化亲虾,从每个群体中分别挑选雌、雄亲虾各 20 尾,进行交配实验。本课题组选育的“兴海 1 号”核心群体(GX)具有长速快、耐氨氮及养殖适应性强等优点,以其为父母本(续代选育)分别同 W、L、K、M 的母本和父本杂交,成功构建了 GX♀×W♂、GX♀×K♂、GX♀×M♂及 W♀×GX♂、K♀×GX♂;以 GX、W、L、K、M 群体分别为父母本进行自交(保留纯系及提纯),构建了 GX♀×GX♂、W♀×W♂、L♀×L♂、K♀×K♂、M♀×M♂;以长速快的 W 和 K 群体分别与养殖适应性强强的 L 和 M 群体杂交,成功构建了 W♀×M♂、K♀×M♂,因构建家系较困难和育苗过程中的其他因素导致仅成功构建及保留 12 个子代组合(表 1)。孵化后,选取每尾雌虾孵化出的无节幼体约 3 500 尾,根据标准化育苗方

表 1 凡纳滨对虾 5 个不同遗传背景群体的不完全双列杂交

Table 1 Incomplete diallel crossing of five populations of *Litopenaeus vannamei* with different genetic backgrounds

| 亲本  | GX♂ | W♂ | L♂ | K♂ | M♂ |
|-----|-----|----|----|----|----|
| GX♀ | 10  | 3  | -  | 4  | 1  |
| W♀  | 5   | 2  | -  | -  | 1  |
| L♀  | -   | -  | 2  | -  | -  |
| K♀  | 5   | -  | -  | 2  | 1  |
| M♀  | -   | -  | -  | -  | 2  |
| 合计  | 20  | 5  | 2  | 6  | 5  |

注:表中数字表示成功构建的家系数,-代表家系构建未成功。

式于 500 L 的桶中独自育至仔虾,而后移至独立水泥池进行标粗培育。培育体长至 3 cm 左右时,每个交配群体随机取 900 尾对虾进行荧光标记,将所有标记好的对虾置于长×宽×高为 13 m×10 m×0.6 m 的池内同环境养殖 60 d。

## 2.2 高盐、低 pH 和高氨氮综合胁迫实验

2019 年由国兴公司对凡纳滨对虾养殖土塘塘底水质指标进行监测,结果显示:盐度上限值为 35, pH 下限值为 6,参照袁瑞鹏<sup>[24]</sup>的方法开展高氨氮胁迫预实验,确定同环境养殖 60 d, 48 h 高氨氮胁迫半致死浓度( $LC_{50\%}$ )为 120 mg/L(铵根离子)。综合胁迫浓度的确定方式为控制盐度为 35、pH 为  $6\pm 0.1$ , 改变氨氮浓度(可变范围为 1~120 mg/L),当半致死时间( $LT_{50\%}$ )为 48 h 时对应的盐度、pH 及氨氮浓度即为最终的综合胁迫浓度。

综合胁迫预实验:对虾同环境养殖 60 d 后,设置高盐为 35、低 pH 为  $6\pm 0.1$ ,将高氨氮胁迫 48 h 的  $LC_{50\%}$ (120 mg/L)折中(60 mg/L),往 1 mg/L 或 120 mg/L 方向以间隔 1 mg/L 为梯度依次递增或递减,可递分为 120 个梯度,1 次实验难以完成,因此,分 40 个梯度为 1 个大组(共 3 个组)。第 1 组为(1)由 60 mg/L 递减的 20 个浓度(盐度、pH 和氨氮浓度)梯度分别为:35、 $6\pm 0.1$  和 60 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 59 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 58 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 57 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 56 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 55 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 54 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 53 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 52 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 51 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 50 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 49 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 48 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 47 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 46 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 45 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 44 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 43 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 42 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 41 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 40 mg/L;(2)由 60 mg/L 递增的 20 个浓度梯度分别为:35、 $6\pm 0.1$  和 61 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 62 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 63 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 64 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 65 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 66 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 67 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 68 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 69 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 70 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 71 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 72 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 73 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 74 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 75 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 76 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 77 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 78 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 79 mg/L; 35、 $6\pm 0.1$  和 80 mg/L。其他两个组以此类推分别继续往前和往后递减和递增。3 组预实验分开进行,先分别对第 1 组的 40 个梯度开展综合胁迫实验。调高盐、低 pH 及高氨氮的药品及测量仪器分别为:粗盐(盐度计折射仪 HT211ATC)、1 mg/L HCl 和 1 mg/L NaOH<sup>[25]</sup>(高精度 pH 测试笔 ATC)和  $\text{NH}_4\text{Cl}$  分析纯晶体(水质分

析仪 W-1)。预实验每个梯度设 3 个重复(每组 30 尾虾)于调好的实验海水中进行,因水体中的低 pH 会缓慢恢复正常,故每 2 h 调整 1 次实验海水 pH 并统计死亡数,并全程保持溶氧不低于 6.0 mg/L,时间持续至对虾死亡过半为止。当高盐为 35、低 pH 为  $6\pm 0.1$  和高氨氮为 70 mg/L 时,由 SPSS 19.0 算出  $LT_{50\%}$  为 47.31 h,最接近 48 h,故将该 3 因子浓度作为综合胁迫的浓度(因在第 1 组中便确定了综合胁迫的浓度,故并未继续开展第 2 组和第 3 组预实验)。

综合胁迫正式实验:对虾暂养 3 d 后开始实验,由综合胁迫预实验确定的浓度开展正式实验,其他胁迫条件与综合胁迫预实验相同,每个群体随机取实验用虾 90 尾(设 3 个重复,每组 30 尾)置于小筐中放于水深 30 cm 的池(长×宽:5 m×5 m)中进行综合胁迫。按交配组合群体排序,生长性状与耐综合胁迫性状一一对应,每 2 h 调一次实验海水 pH、统计死亡数、记录存活时间并测量生长性状(用精度为 0.01 位的分析天平连接电脑自动录入体质量数据,数码相机拍照后用 ImageJ 软件测体长、头胸甲长及腹节全长),实验持续至全部对虾死亡时结束。

## 2.3 杂种优势及配合力估算

### 2.3.1 凡纳滨对虾生长及耐综合胁迫杂种优势

杂种优势的公式<sup>[7,26-29]</sup>为

$$H = \frac{F_1 - 1/2(P_1 + P_2)}{1/2(P_1 + P_2)} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, $F_1$ 、 $P_1$  和  $P_2$  分别表示亲本 1 和亲本 2 正反交子一代、亲本 1 自交子一代表型均值、亲本 2 自交子一代表型均值; $H$  为正反交子一代杂种优势率。

### 2.3.2 凡纳滨对虾生长及耐综合胁迫性状的配合力分析模型

模型公式为

$$y_{ijk} = \mu + \text{Dam}_i + \text{Sire}_j + \text{Parents}_{ij} + e_{ijk}, \quad (2)$$

式中, $y_{ijk}$  为第  $i$  个母本群体与第  $j$  个父本群体杂交的第  $k$  个个体的生长及耐综合胁迫性状的观测值; $\mu$  为总体均值; $\text{Dam}_i$  为第  $i$  个群体母本的 GCA; $\text{Sire}_j$  为第  $j$  个群体父本的 GCA; $\text{Parents}_{ij}$  为第  $i$  个母本群体与第  $j$  个父本群体杂交的特殊配合力(Specific Combining Ability, SCA); $e_{ijk}$  为随机效应残差。

利用 ASReml4<sup>[30]</sup> 软件和亲本模型进行方差组分分析及配合力估计。估计显著性时分别将亲本模型中的 GCA 或 SCA 剔除掉,分别构建两个模型,用 ASReml4 软件中的 lrt.asreml 函数进行显著性检验,根据一般配合力和特殊配合力的显著性,决定是否进行下一步的 LSD 多重比较<sup>[31]</sup>;参照文献<sup>[32-36]</sup>方法计算 GCA 方差、SCA 方差分别占表型方差的比例。

### 3 结果与分析

#### 3.1 凡纳滨对虾亲本群体的 GCA

凡纳滨对虾 5 个不同遗传背景群体的 GCA 效应值见表 2。结果显示: 父本群体体质量、体长和头胸甲长的 GCA 范围分别为 ( $-8.90 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$ ) ~ ( $3.62 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$ )、( $-9.34 \times 10^{-6} \pm 0.003 3$ ) ~ ( $5.22 \times 10^{-6} \pm 0.003 3$ )、( $-1.92 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$ ) ~ ( $2.03 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$ ),

母本群体体质量、体长和头胸甲长的 GCA 范围分别为: ( $-1.23 \times 10^{-6} \pm 0.000 5$ ) ~ ( $5.31 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$ )、( $-5.70 \times 10^{-6} \pm 0.002 6$ ) ~ ( $2.81 \times 10^{-6} \pm 0.002 6$ )、( $-2.71 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$ ) ~ ( $1.24 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$ ), 均较接近于 0; 父母本群体耐综合胁迫的 GCA 范围为: ( $-0.93 \pm 1.687 87$ ) ~ ( $1.46 \pm 1.614 2$ ), 其中父本群体的 GCA 范围为 ( $-8.55 \times 10^{-6} \pm 0.005 4$ ) ~ ( $7.74 \times 10^{-6} \pm 0.005 4$ ), 均较接近于 0。

表 2 凡纳滨对虾生长和耐综合胁迫性状的 GCA 效应值

Table 2 GCA effect value of growth and comprehensive stress tolerance traits of *Litopenaeus vannamei*

| 亲本群体 |    | 一般配合力                              |                                    |                                    |                     |                                    |
|------|----|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
|      |    | 体质量                                | 体长                                 | 头胸甲长                               | 腹节全长                | 耐综合胁迫                              |
| 母本   | GX | $5.31 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$  | $2.81 \times 10^{-6} \pm 0.002 6$  | $-2.71 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$ | $-0.49 \pm 0.401 0$ | $1.46 \pm 1.614 2$                 |
|      | W  | $-1.23 \times 10^{-6} \pm 0.000 5$ | $-5.70 \times 10^{-6} \pm 0.002 6$ | $7.79 \times 10^{-7} \pm 0.000 8$  | $0.29 \pm 0.422 1$  | $-0.86 \pm 1.681 1$                |
|      | L  | $2.40 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$  | $1.15 \times 10^{-6} \pm 0.002 6$  | $4.80 \times 10^{-7} \pm 0.000 8$  | $0.01 \pm 0.478 6$  | $1.11 \pm 1.856 6$                 |
|      | K  | $4.67 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$  | $2.08 \times 10^{-6} \pm 0.002 6$  | $1.24 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$  | $0.08 \pm 0.421 9$  | $-0.93 \pm 1.687 87$               |
|      | M  | $-1.08 \times 10^{-8} \pm 0.000 5$ | $-3.37 \times 10^{-7} \pm 0.002 6$ | $2.15 \times 10^{-7} \pm 0.000 8$  | $0.11 \pm 0.475 0$  | $-0.79 \pm 1.861 7$                |
| 父本   | GX | $1.19 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$  | $1.19 \times 10^{-6} \pm 0.003 3$  | $-1.05 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$ | $-0.04 \pm 0.424 8$ | $7.63 \times 10^{-6} \pm 0.005 4$  |
|      | W  | $-8.90 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$ | $-9.34 \times 10^{-6} \pm 0.003 3$ | $2.03 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$  | $0.29 \pm 0.473 5$  | $-1.80 \times 10^{-6} \pm 0.005 4$ |
|      | L  | $2.40 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$  | $1.91 \times 10^{-6} \pm 0.003 3$  | $4.80 \times 10^{-7} \pm 0.000 8$  | $0.01 \pm 0.521 9$  | $7.74 \times 10^{-6} \pm 0.005 4$  |
|      | K  | $3.62 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$  | $1.02 \times 10^{-6} \pm 0.003 3$  | $-1.92 \times 10^{-6} \pm 0.000 8$ | $-0.57 \pm 0.469 1$ | $-5.02 \times 10^{-6} \pm 0.005 4$ |
|      | M  | $1.69 \times 10^{-7} \pm 0.000 5$  | $5.22 \times 10^{-6} \pm 0.003 3$  | $4.63 \times 10^{-7} \pm 0.000 8$  | $0.31 \pm 0.470 8$  | $-8.55 \times 10^{-6} \pm 0.005 4$ |

#### 3.2 凡纳滨对虾 12 个组合的 SCA

凡纳滨对虾 12 个组合生长和耐综合胁迫性状的特殊配合力效应值见表 3。结果显示: 12 个组合体质量、体长、头胸甲长和腹节全长的 SCA 范围分别为 ( $-0.92 \pm 0.25$ ) ~ ( $0.35 \pm 0.25$ )、( $-5.82 \pm 1.35$ ) ~ ( $2.02 \pm 1.60$ )、( $-0.61 \pm 0.29$ ) ~ ( $0.31 \pm 0.27$ ) 和 ( $-0.39 \pm 0.39$ ) ~ ( $0.17 \pm 0.4$ ), 其中, 组合  $K \text{♀} \times K \text{♂}$  ( $0.35 \pm 0.25$ )、 $GX \text{♀} \times W \text{♂}$  ( $0.31 \pm 0.22$ ) 和  $GX \text{♀} \times M \text{♂}$  ( $0.29 \pm 0.29$ ) 体质量的 SCA 排名靠前; 12 个组合耐综合胁迫的 SCA 范围为 ( $-2.79 \pm 2.02$ ) ~ ( $3.65 \pm 1.79$ ), 其中组合  $GX \text{♀} \times GX \text{♂}$  ( $3.65 \pm 1.79$ )、 $L \text{♀} \times L \text{♂}$  ( $2.19 \pm 2.33$ ) 和  $W \text{♀} \times GX \text{♂}$  ( $1.30 \pm 2.03$ ) 耐综合胁迫的 SCA 排名靠前。此外, 母本群体生长 ( $4.98 \times 10^{-6} \% \sim 0.43 \%$ ) 和耐综合胁迫 ( $0.73 \%$ ) 及父本群体生长 ( $5.00 \times 10^{-6} \% \sim 0.54 \%$ ) 和耐综合胁迫 ( $5.08 \times 10^{-6} \%$ ) 的 GCA 方差占表型方差的比例总体来说小于生长 ( $0.25 \% \sim 4.06 \%$ ) 和耐综合胁迫 ( $1.43 \%$ ) 的 SCA 方差占表型方差的比例 (表 4), 表明亲本的 SCA 对子代性状的表现起主导作用。

#### 3.3 杂交组合生长和耐综合胁迫性状的杂种优势比较

杂交组合生长和综合胁迫耐受性杂种优势见图 1。结果显示: 6 个杂交组合  $GX \text{♀} \times W \text{♂}$ 、 $GX \text{♀} \times K \text{♂}$ 、 $GX \text{♀} \times M \text{♂}$ 、 $W \text{♀} \times GX \text{♂}$ 、 $K \text{♀} \times GX \text{♂}$  和  $K \text{♀} \times M \text{♂}$  的体质量、体长、头胸甲长、腹节全长及耐综合胁迫性状的平均杂种优势率 ( $H$ ) 范围分别为 ( $-5.95 \% \sim 25.525 \%$ )、( $-1.00 \% \sim 80.79 \%$ )、( $-3.43 \% \sim 24.90 \%$ )、( $-4.14 \% \sim 55.87 \%$ ) 和 ( $-8.03 \% \sim 42.86 \%$ ), 其中组合  $GX \text{♀} \times K \text{♂}$  的体质量 ( $-5.95 \%$ )、体长 ( $-1.00 \%$ )、头胸甲长 ( $-3.43 \%$ )、腹节全长 ( $-4.14 \%$ ) 及耐综合胁迫 ( $-8.03 \%$ ) 性状的  $H$  均为负值, 其余均为正值。其中组合  $GX \text{♀} \times W \text{♂}$  体质量的  $H$  最高 ( $25.52 \%$ ), 组合  $K \text{♀} \times M \text{♂}$  耐综合胁迫的  $H$  最高 ( $42.86 \%$ ), 组合  $W \text{♀} \times GX \text{♂}$  次之 ( $41.72 \%$ )。

### 4 讨论

#### 4.1 凡纳滨对虾生长和耐综合胁迫性状的配合力分析

配合力是杂交育种中评估杂交效果与筛选优良杂交组合的重要遗传参数; 配合力又分一般配合

表3 凡纳滨对虾生长和耐综合胁迫性状的 SCA 效应值

Table 3 SCA effect value of growth and comprehensive stress tolerance traits of *Litopenaeus vannamei*

| 交配组合    | 特殊配合力                   |                         |                         |                         |                         |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|         | 体质量                     | 体长                      | 头胸甲长                    | 腹节全长                    | 耐综合胁迫                   |
| GX♀×GX♂ | -0.13±0.17 <sup>a</sup> | -0.56±0.96 <sup>a</sup> | -0.53±0.24 <sup>a</sup> | -0.19±0.37 <sup>a</sup> | 3.65±1.79 <sup>a</sup>  |
| GX♀×W♂  | 0.31±0.22 <sup>a</sup>  | 1.22±1.22 <sup>a</sup>  | 0.23±0.30 <sup>a</sup>  | 0.07±0.39 <sup>a</sup>  | 1.16±2.09 <sup>a</sup>  |
| GX♀×K♂  | -0.11±0.21 <sup>a</sup> | -0.38±1.14 <sup>a</sup> | -0.61±0.29 <sup>b</sup> | -0.39±0.39 <sup>b</sup> | -1.44±2.02 <sup>a</sup> |
| GX♀×M♂  | 0.29±0.29 <sup>a</sup>  | 2.02±1.60 <sup>a</sup>  | 0.21±0.36 <sup>a</sup>  | 0.17±0.4 <sup>a</sup>   | -0.49±2.43 <sup>a</sup> |
| W♀×GX♂  | 0.07±0.20 <sup>a</sup>  | 0.26±1.09 <sup>a</sup>  | -0.05±0.27 <sup>a</sup> | 0.09±0.38 <sup>a</sup>  | 1.30±2.03 <sup>a</sup>  |
| W♀×W♂   | -0.92±0.25 <sup>b</sup> | -5.82±1.35 <sup>b</sup> | 0.30±0.33 <sup>a</sup>  | 0.09±0.40 <sup>a</sup>  | -1.67±2.28 <sup>a</sup> |
| W♀×M♂   | 0                       | 0.91±1.60 <sup>a</sup>  | -0.05±0.36 <sup>a</sup> | 0.02±0.4 <sup>a</sup>   | -1.32±2.44 <sup>a</sup> |
| L♀×L♂   | 0.16±0.25 <sup>a</sup>  | 0.94±1.35 <sup>a</sup>  | 0.13±0.33 <sup>a</sup>  | 0.01±0.40 <sup>a</sup>  | 2.19±2.33 <sup>a</sup>  |
| K♀×GX♂  | 0.13±0.20 <sup>a</sup>  | 0.89±1.09 <sup>a</sup>  | 0.31±0.27 <sup>a</sup>  | 0.07±0.38 <sup>a</sup>  | -2.79±2.02 <sup>b</sup> |
| K♀×K♂   | 0.35±0.25 <sup>a</sup>  | 0.89±1.35 <sup>a</sup>  | 0.11±0.33 <sup>a</sup>  | 0.08±0.40 <sup>a</sup>  | 0.02±2.25 <sup>a</sup>  |
| K♀×M♂   | -0.17±0.29 <sup>a</sup> | -0.09±1.60 <sup>a</sup> | -0.10±0.36 <sup>a</sup> | -0.09±0.4 <sup>a</sup>  | 0.95±2.44 <sup>a</sup>  |
| M♀×M♂   | -0.01±0.25 <sup>a</sup> | -0.28±1.35 <sup>a</sup> | 0.06±0.33 <sup>a</sup>  | 0.08±0.40 <sup>a</sup>  | -1.55±2.35 <sup>a</sup> |

注: 表中不同字母为差异显著( $p < 0.05$ ), 相同字母为差异不显著( $p > 0.05$ )。

表4 凡纳滨对虾生长和耐综合胁迫性状配合力的方差组分

Table 4 The variance components of combining ability for growth and comprehensive stress tolerance of *Litopenaeus vannamei*

| 方差组分 | 各性状的方差数值                                      |                         |                         |                         |       |                         |
|------|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|-------------------------|
|      | 体质量   | 体长                      | 头胸甲长                    | 腹节全长                    | 耐综合胁迫 |                         |
| 母本   | 一般配合力方差( $\sigma_{GCA}^2$ )                   | $0.236 \times 10^{-6}$  | $6.58 \times 10^{-6}$   | $0.701 \times 10^{-6}$  | 0.27  | 4.15                    |
|      | 一般配合力方差占表型方差比例( $\sigma_{GCA}^2/\sigma_P^2$ ) | $5.00 \times 10^{-6}\%$ | $4.98 \times 10^{-6}\%$ | $4.98 \times 10^{-6}\%$ | 0.43% | 0.73%                   |
| 父本   | 一般配合力方差( $\sigma_{GCA}^2$ )                   | $2.36 \times 10^{-7}$   | $10.91 \times 10^{-6}$  | $7.01 \times 10^{-7}$   | 0.34  | $29.00 \times 10^{-6}$  |
|      | 一般配合力方差占表型方差比例( $\sigma_{GCA}^2/\sigma_P^2$ ) | $5.00 \times 10^{-6}\%$ | $8.25 \times 10^{-6}\%$ | $5.06 \times 10^{-6}\%$ | 0.54% | $5.08 \times 10^{-6}\%$ |
|      | 特殊配合力方差( $\sigma_{SCA}^2$ )                   | 0.16                    | 5.37                    | 0.18                    | 0.16  | 8.16                    |
|      | 特殊配合力方差占表型方差比例( $\sigma_{SCA}^2/\sigma_P^2$ ) | 3.39%                   | 4.06%                   | 1.30%                   | 0.25% | 1.43%                   |
|      | 表型方差( $\sigma_P^2$ )                          | 4.72                    | 132.22                  | 13.86                   | 63.01 | 570.50                  |

(GCA)和特殊配合力(SCA),前者由基因的加性效应决定可稳定遗传<sup>[33, 37]</sup>;后者由基因非加性效应(显性、超显性及上位效应)决定不可稳定遗传<sup>[38]</sup>,是产生杂种优势的必要条件<sup>[21, 34, 39]</sup>。对凡纳滨对虾配合力的研究已有相关报道<sup>[20-22]</sup>,然而有关凡纳滨对虾耐综合胁迫配合力的研究未见报道,本研究以5个不同遗传背景的多世代选育凡纳滨对虾群体(具有较高纯度)为亲本构建子代组合,并尝试估计各组合耐综合胁迫和生长性状的配合力。结果显示,父本群体体质量、体长和头胸甲长的GCA分别为 $(-8.90 \times 10^{-7} \pm 0.0005) \sim (3.62 \times 10^{-7} \pm 0.0005)$ 、 $(-9.34 \times 10^{-6} \pm 0.0003) \sim (5.22 \times$

$10^{-6} \pm 0.0003)$ 、 $(-1.92 \times 10^{-6} \pm 0.0008) \sim (2.03 \times 10^{-6} \pm 0.0008)$ ,母本群体体质量、体长和头胸甲长的GCA分别为 $(-1.23 \times 10^{-6} \pm 0.0005) \sim (5.31 \times 10^{-7} \pm 0.0005)$ 、 $(-5.70 \times 10^{-6} \pm 0.0026) \sim (2.81 \times 10^{-6} \pm 0.0026)$ 、 $(-2.71 \times 10^{-6} \pm 0.0008) \sim (1.24 \times 10^{-6} \pm 0.0008)$ ,均较接近于0,父本群体耐综合胁迫性状的GCA为 $(-8.55 \times 10^{-6} \pm 0.0004) \sim (7.74 \times 10^{-6} \pm 0.0004)$ ,均较接近于0,与王浩等<sup>[20]</sup>报道的凡纳滨对虾7个群体生长性状GCA $(-0.53 \sim 0.42)$ 及胡志国等<sup>[21-22]</sup>报道的凡纳滨对虾父母本群体耐低溶氧与耐高氨氮及耐高盐与耐低盐的GCA $(-0.215 \sim 0.1522$ 和 $-0.2153 \sim 0.1522)$ 存在差异;与林明雪等<sup>[40]</sup>报道的多世代选育

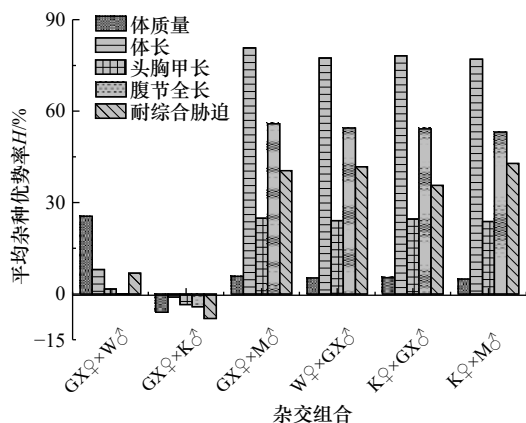


图1 凡纳滨对虾杂交组合生长和耐综合胁迫性状的杂种优势

Fig. 1 Heterosis of growth and comprehensive stress tolerance in hybrid combinations of *Litopenaeus vannamei*

的高纯度“吉富”系列尼罗罗非鱼杂交, 生长性状的GCA为0且表现出较高的杂种优势结果相似, 推测选育亲本群体的GCA可能会随选育世代和遗传纯度的增加而逐渐趋近于0, 具体原因还有待进一步的研究(包括对多代选育纯系内交配及多代选育纯系间杂交的配合力进行更加全面、详细的研究和探讨)。

利用LRT似然比进行配合力的显著性检验, 发现GCA不显著, SCA显著, 续而对SCA进行多重比较(LSD-*t*检验)。结果显示, 组合K♀×K♂(0.35±0.25)、GX♀×W♂(0.31±0.22)和GX♀×M♂(0.29±0.29)体质量的SCA排名靠前、效应值为正且3组合的*t*检验差异不显著( $p>0.05$ ); 组合GX♀×GX♂(3.65±1.79)、L♀×L♂(2.19±2.33)和W♀×GX♂(1.30±2.03)耐综合胁迫的SCA排名靠前、效应值为正且3组合的*t*检验差异不显著( $p>0.05$ ), 说明前3个组合存在较高的体质量非加性效应, 后3个组合存在较高的耐综合胁迫非加性效应。可考虑将组合K♀×K♂、GX♀×W♂和GX♀×M♂作为子二代快长的备选组合, 将组合GX♀×GX♂、L♀×L♂和W♀×GX♂作为子二代耐综合胁迫的备选组合。该研究可为凡纳滨对虾配套系杂交提供参考资料, 随着研究进一步的深入, 笔者后续将结合配合力评估凡纳滨对虾生长和耐受性能的三系、四系配套效果。

#### 4.2 凡纳滨对虾生长和耐综合胁迫性状的杂种优势分析

杂种优势是两个不同群体的亲本杂交后代在繁殖、存活和生长等生活力方面优于亲本的现象<sup>[34]</sup>, 在生产上, 被用来评估不同杂交方案的可行性。中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)杂交、凡纳滨对虾(*L. vannamei*)杂交, 在生长性状上表现出杂种优势<sup>[29, 41-42]</sup>。

在本研究中, 杂交群体GX♀×W♂、GX♀×M♂、W♀×GX♂、K♀×GX♂和K♀×M♂的体质量、体长、头胸甲长、腹节全长及耐综合胁迫的杂种优势均为正(0.10%~80.79%和6.87%~42.86%), 说明杂交群体在生长及耐综合胁迫性状上表现出一定的杂种优势。Lu等<sup>[7]</sup>认为, 大量的杂种优势可能是由于有利显性等位基因的积累或杂种中显性等位基因掩盖隐性有害等位基因而产生的; 从近交使有害基因暴露的角度考虑, 杂种优势仅是近交衰退的补偿, 也就是说杂交子代不表现优势而可能表现劣势<sup>[23, 43]</sup>, 田焱等<sup>[43]</sup>报道中国对虾两群体杂交, F<sub>1</sub>代早期群体YP♂×KN♀存活率表现出一定杂种优势, 而群体YP♀×KN♂表现出杂种劣势; 袁瑞鹏等<sup>[23]</sup>报道凡纳滨对虾群体杂交F<sub>1</sub>代群体YH♀×ZX♂低溶氧耐受性具有杂种优势, 而群体ZK♀×YH♂低溶氧耐受性表现杂种劣势; 在其他水产动物中, 杂交子代也表现出杂种优势与杂种劣势<sup>[44]</sup>。在本研究中, 杂交群体GX♀×K♂的体质量(-5.95%)、体长(-1.00%)、头胸甲长(-3.43%)、腹节全长(-4.14%)及耐综合胁迫(-8.03%)性状的H为负值, 表现出一定的杂种劣势。总的来说, 杂交中表现出的杂种优势表明, 杂交对提高凡纳滨对虾生长和耐综合胁迫性状具有正向效应。此外, 本研究筛选出组合GX♀×W♂体质量的H最高, 为25.52%; 组合GX♀×M♂体长、头胸甲长和腹节全长的H均最高, 分别为80.79%、24.90%和55.87%; 组合K♀×M♂耐综合胁迫的H最高, 为42.86%, 组合W♀×GX♂的次之, 为41.72%, 可考虑将组合GX♀×W♂和组合GX♀×M♂作为快长配套杂交的备选组合, 将组合K♀×M♂和组合W♀×GX♂作为耐综合胁迫配套杂交的备选组合。

## 5 结论

本研究利用亲本模型分析了“兴海1号”新品种核心群体(GX)、泰国引进群体(W和L)和美国引进群体(K和M)5个凡纳滨对虾种质群体之间的GCA和SCA, 并在此基础上分析了5个群体之间的杂种优势。结果显示, 杂交后代生长和耐综合胁迫性状的表现主要受到亲本SCA的影响, 杂交组合生长(体质量、体长、头胸甲长与腹节全长)和耐综合胁迫性状均表现出一定的杂种优势; 杂交组合GX♀×W♂体质量的GCA和H最高; 杂交组合W♀×GX♂耐综合胁迫的SCA最高且H较高, 可考虑分别加强该两组合在生长和耐综合胁迫性状方面的配套杂交应用。

## 参考文献:

- [1] Lu Xia, Luan Sheng, Cao Baoxiang, et al. Estimation of genetic parameters and genotype-by-environment interactions related to acute ammonia stress in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) juveniles at two different salinity levels[J]. PLoS One, 2017, 3(12): e0173835.
- [2] Lü Ding, Yu Yang, Zhang Qian, et al. Estimating genetic parameters for resistance to *Vibrio parahaemolyticus* with molecular markers in Pacific white shrimp[J]. *Aquaculture*, 2020, 527: 735439.
- [3] 胡东, 王丽萍, 赵苒, 等. 福建漳浦凡纳滨对虾海水养殖中后期水体细菌群落多样性分析[J]. 海洋学报, 2017, 39(8): 89–98.  
Hu Dong, Wang Liping, Zhao Ran, et al. The diversity changes of bacterial community in mariculture water of *Litopenaeus vannamei* at Zhangpu, Fujian Province[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(8): 89–98.
- [4] 张伟权. 世界重要养殖品种——南美白对虾生物学简介[J]. 海洋科学, 1990, 14(3): 69–73.  
Zhang Weiquan. An important breeding species in the world—Biology of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Marine Sciences*, 1990, 14(3): 69–73.
- [5] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2021年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.  
Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Station, China Fisheries Association. 2021 China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [6] Funge-Smith S, Briggs M. The introduction of *Penaeus vannamei* and *P. stylirostris* into the Asia-Pacific region[C]// International Mechanisms for the Control and Responsible use of Alien Species in Aquatic Ecosystems, Report of an Ad Hoc Expert Consultation. Rome, Italy: FAO, 2005.
- [7] Lu Xia, Luan Sheng, Luo Kun, et al. Genetic analysis of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*): heterosis and heritability for harvest body weight[J]. *Aquaculture Research*, 2015, 47(11): 3365–3375.
- [8] De Donato M, Manrique R, Ramirez R, et al. Mass selection and inbreeding effects on a cultivated strain of *Penaeus (Litopenaeus) vannamei* in Venezuela[J]. *Aquaculture*, 2005, 247(1/4): 159–167.
- [9] Maluwa A O, Gjerde B. Genetic evaluation of four strains of *Oreochromis shiranus* for harvest body weight in a diallel cross[J]. *Aquaculture*, 2006, 259(1/4): 28–37.
- [10] 孔杰, 栾生, 谭建, 等. 对虾选择育种研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(9): 81–97.  
Kong Jie, Luan Sheng, Tan Jian, et al. Progress of study on penaeid shrimp selective breeding[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(9): 81–97.
- [11] 熊大林, 段亚飞, 徐敬明, 等. 凡纳滨对虾鳃组织对高温和氨氮胁迫的生理响应[J]. 南方农业学报, 2020, 51(9): 2296–2303.  
Xiong Dalin, Duan Yafei, Xu Jingming, et al. Physiological responses in gills of *Litopenaeus vannamei* exposed to the combined stress of temperature and ammonia[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(9): 2296–2303.
- [12] 戴习林, 杨展昆, 朱其建. 凡纳滨对虾室内养殖密度和简易水质调控措施对水质及养殖效果的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(6): 894–906.  
Dai Xilin, Yang Zhankun, Zhu Qijian. Effects of indoor aquaculture density and simple water quality control measures on water quality and culture efficiency of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018, 27(6): 894–906.
- [13] Chen J C, Liu P C, Lin Y T, et al. Super intensive culture of red-tailed shrimp *Penaeus penicillatus*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1988, 19(3): 127–131.
- [14] Haines T A. Acidic precipitation and its consequences for aquatic ecosystems: a review[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1981, 110(6): 669–707.
- [15] Colombani N, Giambastiani B M S, Mastrociccio M. Impact of climate variability on the salinization of the coastal wetland-aquifer system of the Po Delta, Italy[J]. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*, 2017, 66(7): 430–441.
- [16] Cui Yangting, Ren Xianyun, Li Jian, et al. Effects of ammonia-N stress on metabolic and immune function via the neuroendocrine system in *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 64: 270–275.
- [17] Yu Qiuran, Xie Jia, Huang Maoxian, et al. Growth and health responses to a long-term pH stress in Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 16: 100280.
- [18] 赵玉超, 王仁杰, 沈敏, 等. 高盐对凡纳滨对虾仔虾生长、渗透调节及免疫相关酶活性的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 833–840.  
Zhao Yuchao, Wang Renjie, Shen Min, et al. Effects of high-salt stress on daily weight gain, osmoregulation and immune related enzyme activities in *Litopenaeus vannamei* postlarvae[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(4): 833–840.
- [19] Hedgecock D, Davis J P. Heterosis for yield and crossbreeding of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. *Aquaculture*, 2007, 272(S1): S17–S29.
- [20] 王浩, 罗坤, 栾生, 等. 凡纳滨对虾多个引进群体的杂交配合力分析[J]. 水产学报, 2013, 37(4): 489–495.  
Wang Hao, Luo Kun, Luan Sheng, et al. Combining ability of hybrid generation from the introduced populations of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(4): 489–495.
- [21] 胡志国, 刘建勇, 袁瑞鹏, 等. 3个凡纳滨对虾引进群体对温度和盐度耐受力的配合力分析[J]. 海洋科学, 2016, 40(1): 25–31.  
Hu Zhiguo, Liu Jianyong, Yuan Ruipeng, et al. Analysis of combining ability of survival of imported *Litopenaeus vannamei* populations

- under temperature and salinity stress[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(1): 25–31.
- [22] 胡志国, 刘建勇, 袁瑞鹏, 等. 凡纳滨对虾高氨氮和低溶氧抗逆性状的杂交配合力分析[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(1): 43–49.  
Hu Zhiguo, Liu Jianyong, Yuan Ruipeng, et al. Combining ability for resistance of *Litopenaeus vannamei* to ammonia nitrogen and dissolved oxygen[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(1): 43–49.
- [23] 袁瑞鹏, 刘建勇, 张嘉晨, 等. 凡纳滨对虾群体杂交与自交 F<sub>1</sub> 低溶氧与高氨氮耐受性比较[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(3): 410–417.  
Yuan Ruipeng, Liu Jianyong, Zhang Jiachen, et al. A comparative study of hypoxia and high-ammonia resistance between *Litopenaeus vannamei* inbred and hybrid offspring at different stages[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(3): 410–417.
- [24] 袁瑞鹏. 凡纳滨对虾生长、繁殖及高氨氮耐受性的选择育种研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2016.  
Yuan Ruipeng. The selective breeding research on the growth, reproduction and high ammonia nitrogen tolerance in *Litopenaeus vannamei*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2016.
- [25] Duan Yaifei, Wang Yun, Liu Qingsong, et al. Changes in the intestine barrier function of *Litopenaeus vannamei* in response to pH stress[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 88: 142–149.
- [26] 盛志廉, 陈瑶生. 数量遗传学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
Sheng Zhilian, Chen Yaosheng. Quantitative Genetics[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [27] 张天时. 中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)育种的模型分析与遗传参数评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
Zhang Tianshi. Analysis of animal models and estimation genetic parameters in *Fenneropenaeus chinensis* breeding[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [28] 李永, 黄建华, 杨其彬, 等. 斑节对虾2个地理种群自交与杂交F<sub>1</sub>的生长性能[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(5): 784–789.  
Li Yong, Huang Jianhua, Yang Qibin, et al. Growth performance of inbred and hybrid F<sub>1</sub>s created from the cross of two geographic *Penaeus monodon* populations[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(5): 784–789.
- [29] 阮晓红, 罗坤, 栾生, 等. 凡纳滨对虾7个引进群体的生长性能评估[J]. *水产学报*, 2013, 37(1): 34–42.  
Ruan Xiaohong, Luo Kun, Luan Sheng, et al. Evaluation of growth performance in *Litopenaeus vannamei* populations introduced from other nations[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2013, 37(1): 34–42.
- [30] Butler D G, Cullis B R, Gilmour A R, et al. ASReml-R Reference Manual Version 4[M]. UK: VSN International Ltd, 2017.
- [31] 唐燕琼. Griffing双列杂交育种配合力统计分析的SAS实施研究——试验模型 II 单变元分析[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2002.  
Tang Yanqiong. SAS Programs of univariate combining ability analysis of Griffing's diallel—cross design for method 2[D]. Haikou: South China University of Tropical Agriculture, 2002.
- [32] 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 Zhiguo, Liu Jianyong, Bao Xiufeng, 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.
- [33] Costa A C, Botelho H A, Da Silva Gomes R C, et al. General and specific combining ability in Serrasalmidae[J]. *Aquaculture Research*, 2019, 50(3): 717–724.
- [34] 周发林, 杨其彬, 姜松, 等. 斑节对虾3个种质群体体质量性状配合力及杂种优势分析[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(1): 39–44.  
Zhou Falin, Yang Qibin, Jiang Song, et al. Analysis of combining ability and heterosis on body mass trait of three *Penaeus monodon* populations[J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(1): 39–44.
- [35] 潘清洁. 5个新选水稻三系不育系主要农艺性状配合力分析及评价[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.  
Pan Qingjie. Analysis of combining ability and evaluation of major agronomic characters in five new rice three-line CMS line[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [36] 张升祥. 家蚕对颗粒饲料摄食性选择方法与育种研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2003.  
Zhang Shengxiang. Selection method and breeding of silkworm (*Bombyx mori* L.) for feeding ability on pellet artificial diet[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2003.
- [37] Hayman B I. Interaction, heterosis and diallel crosses[J]. *Genetics*, 1957, 42(3): 336–355.
- [38] Griffing B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems[J]. *Australian Journal of Biological Sciences*, 1956, 9(4): 463–493.
- [39] 马爱军, 王新安, 黄智慧, 等. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)快速生长品系和高成活率选育品系的配合力分析[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(5): 1100–1107.  
Ma Aijun, Wang Xin'an, Huang Zhihui, et al. Combining ability of selected fast-growing and high survival strain of turbot *Scophthalmus maximus*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(5): 1100–1107.
- [40] 林明雪, 杨洁, 岳武成, 等. “吉富”系列罗非鱼生长性状的配合力、杂种优势与遗传相关分析[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(2): 1–6.  
Lin Mingxue, Yang Jie, Yue Wucheng, et al. Analysis of combining ability, heterosis and genetic correlation on growth traits of GIFT tilapia[J]. *South China Fisheries Science*, 2016, 12(2): 1–6.
- [41] 张存善, 李色东, 王亚平, 等. 2个凡纳滨对虾群体仔虾的生长比较[J]. *水产科学*, 2010, 29(6): 325–328.  
Zhang Cunshan, Li Sedong, Wang Yaping, et al. Comparison of growth between two populations of pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fisheries Science*, 2010, 29(6): 325–328.
- [42] 姚雪梅, 黄勃, 张继涛, 等. SPF凡纳滨对虾F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>及杂交代生长和存活比较研究[J]. *中国水产科学*, 2007, 14(2): 326–330.

- Yao Xuemei, Huang Bo, Zhang Jitao, et al. Comparison of growth and survival rate of  $F_1$ ,  $F_2$  and hybrid generation from SPF *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2007, 14(2): 326–330.
- [43] 田毅, 孔杰, 杨翠华, 等. 中国明对虾2个群体的杂交子一代早期分析[J]. 海洋学报, 2007, 29(3): 157–161.
- Tian Yi, Kong Jie, Yang Cuihua, et al. Study on hybridization of two different populations of *Fenneropenaeus chinensis*[J]. *Haiyang Xuebao*, 2007, 29(3): 157–161.
- [44] World Fish Center. Genetic improvement of carp species in Asia[R]. ICLARM Final Report, 2001: 159.

## Analysis of combining ability and heterosis of growth and comprehensive stress tolerance traits of *Litopenaeus vannamei* multi-generation breeding population

Wang Lun<sup>1</sup>, Wang Chongyi<sup>1</sup>, Liu Jianyong<sup>1</sup>, Fu Xueli<sup>1</sup>

(1. College of Fisheries, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** This research aimed to screen the best mating combinations of *Litopenaeus vannamei*. Five populations of *L. vannamei* with different genetic backgrounds were used as parents, and 12 combinations of the  $F_1$  generation were constructed by mating. The ASReml4 software was used to estimate the general fitness (GCA) and specific fitness (SCA) for growth and tolerance to combined stress (high salt (35), low pH ( $6\pm 0.1$ ), and high ammonia nitrogen (70 mg/L) co-stress) traits of the 12 combinations of P105 in *L. vannamei*. The results showed that the SCA of the parents played a dominant role in the performance of offspring traits, with combinations  $K_{\text{♀}}\times K_{\text{♂}}$  ( $0.35\pm 0.25$ ),  $GX_{\text{♀}}\times W_{\text{♂}}$  ( $0.31\pm 0.22$ ) and  $GX_{\text{♀}}\times M_{\text{♂}}$  ( $0.29\pm 0.29$ ) ranking high in SCA for body mass; combinations  $GX_{\text{♀}}\times GX_{\text{♂}}$  ( $3.65\pm 1.79$ ),  $L_{\text{♀}}\times L_{\text{♂}}$  ( $2.19\pm 2.33$ ) and  $W_{\text{♀}}\times GX_{\text{♂}}$  ( $1.30\pm 2.03$ ) ranking high in SCA for tolerance to combined stress. The analysis of heterozygous dominance  $H$  showed that the crosses showed some heterozygous dominance for growth (body mass, body length, cephalothorax length, and full length of ventral segments) and stress tolerance traits, and the  $H$  for growth and stress tolerance traits of the six crosses  $GX_{\text{♀}}\times W_{\text{♂}}$ ,  $GX_{\text{♀}}\times K_{\text{♂}}$ ,  $GX_{\text{♀}}\times M_{\text{♂}}$ ,  $W_{\text{♀}}\times GX_{\text{♂}}$ ,  $K_{\text{♀}}\times GX_{\text{♂}}$  and  $K_{\text{♀}}\times M_{\text{♂}}$  were negative except for the combination  $GX_{\text{♀}}\times K_{\text{♂}}$  (0.10%–80.79% and 6.87%–42.86%), with the highest  $H$  for the combination  $GX_{\text{♀}}\times W_{\text{♂}}$  body mass (25.52%) and the higher  $H$  for the combination  $W_{\text{♀}}\times GX_{\text{♂}}$  tolerance to combined stress (41.72%). The study showed that the hybrid combination  $GX_{\text{♀}}\times W_{\text{♂}}$  had the highest SCA and  $H$  for body mass; the hybrid combination  $W_{\text{♀}}\times GX_{\text{♂}}$  had the highest SCA and higher  $H$  for tolerance to combined stress, which can be considered to enhance the application of the two combinations in matching crosses for growth and combined stress tolerance traits respectively.

**Key words:** *Litopenaeus vannamei*; growth traits; comprehensive stress tolerance; combining ability; heterosis