

凡纳滨对虾多个引进群体的杂交配合力分析

王 浩^{1,2}, 罗 坤², 栾 生², 孔 杰^{2*}, 许圣钰³, 陈宝龙³

(1. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;

3. 青岛海壬水产种业科技有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 利用人工授精技术, 通过双列杂交和巢式交配设计, 以 7 个凡纳滨对虾群体生产家系 130 个, 建立育种基础群体。利用混合线性模型和广义线性模型, 结合约束极大似然法估计不同引进群体体质量和存活性状的一般配合力 (general combining ability, GCA) 和特殊配合力 (special combining ability, SCA)。结果显示, 对于体质量性状, UA5、UA4 和 SIN 3 个群体的 GCA 值最高, 分别为 0.42、0.32 和 0.19; 17 个杂交组合中, UA5 × SIN、UA1 × UA2、UA4 × UA5、UA4 × SIN 和 UA1 × SIN 5 个组合体质量和存活性状的 SCA 值正向优势较明显, 是生产优良子代的优先搭配组合; 体质量和存活性状配合力方差分析结果显示, 不同环境下体质量性状 GCA 和 SCA 方差组分所占比例不同, 但总体差异不大; 相关性分析显示, 不同环境下体质量性状配合力之间存在正相关, 而存活性状存在负相关。

关键词: 凡纳滨对虾; 杂交; 一般配合力; 特殊配合力

中图分类号: Q 321; S 968.22

文献标志码: A

凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 属对虾科 (Penaeidae)、滨对虾属 (*Litopenaeus*), 是当前世界养殖产量最高的对虾品种^[1]。国外自 20 世纪 80 年代开始进行选择育种, 已经建立了多个育种核心群体, 对生长、抗病和抗逆等性状进行遗传改良, 并已获得了遗传进展^[2-6]。国内凡纳滨对虾育种也取得重要进展, 相继培育出“中兴 1 号”、“中科 1 号”和“科海 1 号”等新品种, 生长和抗逆性状得到一定程度的提高^[7-9]。

配合力是评估和筛选引进群体的重要遗传学参数, 由 Sprague 等^[10]在玉米杂交育种研究中首次提出, 分为一般配合力 (general combining ability, GCA) 和特殊配合力 (specific combining ability, SCA)。GCA 的遗传基础是基因的加性效应, 可以稳定遗传; SCA 效应包括等位基因的显性效应、上位效应及不同基因间的相互作用等非加性基因效应, 是产生杂种优势的主要因素。配

合力分析广泛地应用于农业、畜牧业和林业的研究^[11-13]。在水产动物育种研究中, Mallet 等^[14]研究了野生牡蛎 (*Concha ostreae*) 3 个地理群体在早期发育阶段的生长和存活性状配合力, 发现牡蛎在幼虫、稚贝期的生长和存活率主要受母体效应的影响; Deng 等^[15]通过双列杂交设计, 分析了皱纹盘鲍 (*Haliotis discus hannai*) 3 个群体的生长性状配合力和杂交优势, 结果显示加性效应和非加性效应共同影响生长性状的表现; 王炳谦等^[16]利用微星标记对 5 个不同虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 品系进行了遗传距离分析, 并与配合力分析相结合, 预测各品系间的杂交优势。关于凡纳滨对虾群体间杂种优势及其利用的研究, 国内外均有报道^[17-19], 但是不同引进群体的配合力分析尚未见报道。

本实验利用人工授精技术, 通过双列杂交和巢式交配设计组合 7 个凡纳滨对虾群体生产家

收稿日期: 2012-09-17 修回日期: 2013-01-11

资助项目: 农业部“九四八”项目 (2012-S5, 2013-Z13); 国家“八六三”高技术研究发展计划 (2012AA10A404)

通信作者: 孔 杰, E-mail: kongjie@ysfri.ac.cn

系,建立育种基础群体。利用混合线性模型和广义线性模型,结合约束极大似然法估计不同引进群体体质量和存活性状的 GCA 和 SCA,来评估和筛选性能优良的引进群体,为构建遗传变异丰富的凡纳滨对虾基础群体提供技术参数,以期加速凡纳滨对虾选择育种的进程。

1 材料与方法

1.1 实验材料

7个凡纳滨对虾引进群体于2011年6月分批运抵农业部海水养殖遗传育种中心(中国水产科学研究院黄海水产研究所鳌山基地),分别命名为 SIN、UA1、UA2、UA3、UA4、UA5 和 UA6。亲虾经过暂养稳定后,对雌虾进行单侧眼柄切除术,并逐步升温至 28 °C,投喂鲜活沙蚕和冰冻鲑鱼进行促熟。性腺发育成熟后,利用人工授精技术,通过巢式设计(2尾雄虾与1尾雌虾交配;1尾雌虾与2尾雄虾交配),成功建立全同胞家系130个(母系半同胞家系40个;父系半同胞家系26个)(表1)。

1.2 家系培育及数据收集

待家系成功孵化后,从每个家系中随机选取无节幼体3000尾,放入170L的培育桶内单独培育。当幼体发育至仔虾后,从每个家系随机取400尾放入170L的培育桶继续单独培育。当仔虾发育至第8天时,每个家系数300尾,平均分成2份:一份运往河北黄骅养殖场,一份继续在青岛鳌山遗传育种中心170L培育桶内养殖。幼体生长至3~4cm时,在每个家系个体的第6腹节和第5腹节处进行“可视嵌入性荧光标记”(visible implant elastomer, VIE)注射,以区分不同的家系,然后放入水泥池中混养。河北黄骅和青岛鳌山养殖场内每个混养测试池的养殖密度均控制在109尾/m²。其他水质控制、饵料投喂和日常管理等操作,两地均按照标准化程序保持一致。个体养殖至5月龄时,测量每尾虾的体质量,记录个体的VIE颜色组合、测试场号、测试池号、测量日期等信息。统计每个家系存活个体数量,计算存活率。

表1 凡纳滨对虾七个引进群体的不完全双列杂交
Tab.1 Incomplete diallel cross of seven populations of *L. vannamei*

引进群体(♀) introduced population	引进群体(♂) introduced population						
	UA5	UA4	SIN	UA3	UA1	UA6	UA2
UA5	7	3	4	3	-	-	5
UA4	-	10	4	5	1	2	3
SIN	6	4	10	3	1	3	4
UA3	-	5	4	5	-	2	2
UA1	-	-	-	-	3	-	-
UA6	-	-	1	4	-	1	1
UA2	-	4	5	4	4	2	5
合计 total	130						

1.3 统计分析

利用 Excel 软件对体质量和存活数据进行初步整理,用 ASReml 软件采用混合线性模型和约束极大似然法估算体质量性状的配合力,通过广义线性模型估计存活性状的配合力。体质量性状的配合力分析模型为线性混合模型:

$$y_{hijkl} = u + Env_h + Pond_n(Env_h) + b_1 w_l + g_i + g_j + s_{ij} + f_k + e_{hijkl}$$

式中, y_{hijkl} 系第*i*个父本群体与第*j*个母本群体杂交的第*l*个记录, u 为总体均数, Env_h 为第*h*个养殖场固定效应, $Pond_n(Env_h)$ 为第*h*个养殖场内第*n*个测试池塘固定效应, w_l 为标记前体质量(协变量), b_1 为回归系数, $g_i(g_j)$ 为第*i(j)*个群体的父本(母本)一般配合力(随机效应), s_{ij} 为第*i*个父本群体与第*j*个母本群体杂交的特殊配合力(随机效应), f_k 为同胞家系单独养殖产生的共

同环境效应, e_{hnmijl} 为随机误差效应。

存活性状的配合力分析模型为广义线性模型 (probit 连接函数):

$$y_{hnmijl} = \begin{cases} 0 & \text{if } \lambda_{hnmijl} \leq 0 \\ 1 & \text{if } \lambda_{hnmijl} > 0 \end{cases}$$

$$\lambda_{hnmijl} = u + Env_h + Pond_n(Env_h) + s_{ij} + e_{hnmijl}$$

式中, y_{hnmijl} 是第 l 尾虾的存活状态 (1: 存活, 0: 死亡), λ_{hnmijl} 为 y_{hnmijl} 的潜在变量 (符合累积标准正态分布), u 为总体均值, Env_h 为第 h 个养殖场固定效应, $Pond_n(Env_h)$ 为第 h 个养殖场内第 n 个测试池塘固定效应, s_{ij} 为第 i 个父本群体与第 j 个母本群体杂交的特殊配合力 (随机效应), e_{hnmijl} 为随机误差效应。

存活性状配合力分析模型中加入一般配合力效应后, 模型无法收敛, 因此结果部分未包括引进群体存活性状的一般配合力。此外, 对于存活性状, 由于每个家系仅有一个存活率值, 部分杂交组合内家系数量少, 全同胞组效应与 SCA 存在部分

重线性关系, 模型中加入全同胞组效应后会严重低估杂交组合的特殊配合力, 因此在模型中未加入全同胞组效应作为共同环境效应。

2 结果

2.1 体质量和存活性状的统计性描述量

对于体质量和存活性状, 在青岛鳌山和河北黄骅两地家系数和个体数目不同, 主要由于存活率统计过程中, 部分家系存活率大于 1, 对存活性状进行配合力分析时将家系剔除, 因此存活性状家系和个体数较少。收获体质量范围为 5.60 ~ 30.83 g, 其中青岛鳌山体质量均值为 17.96 g, 河北黄骅体质量均值为 18.41 g, 两地变异系数相差不大。各家系养殖存活率范围为 55.06% ~ 98.82%, 其中青岛鳌山平均值为 91.70%, 大于河北黄骅存活率 (79.17%); 两地变异系数分别为 0.06、0.14 (表 2)。

表 2 凡纳滨对虾引进群体收获体质量及存活率的描述性统计量

Tab. 2 Descriptive statistics in harvest body weight and survival of *L. vannamei*

性状 traits	场地 field	家系数 no. of families	个体数 no. of individuals	平均值/g mean	最小值/g min	最大值/g max	标准差 SD	变异系数 CV
体质量 harvest body weight	青岛鳌山 QDAS	130	10 482	17.96	5.60	30.80	3.09	0.17
	河北黄骅 HBHH	106	8 717	18.41	5.87	30.83	3.24	0.18
存活率 survival	青岛鳌山 QDAS	114	9 324	91.70	70.79	98.82	5.50	0.06
	河北黄骅 HBHH	101	8 270	79.17	55.06	96.15	11.00	0.14

2.2 引进群体体质量和存活性状的一般配合力

综合青岛鳌山和河北黄骅两地数据, UA5、UA4 和 SIN 3 个引进群体的 GCA 值最高, 其值分别为 0.42、0.32 和 0.19; 而 UA3、UA1、UA6 和 UA2 4 个引进群体收获体质量的 GCA 值较小且为负值 (表 3)。UA5 和 SIN 群体在青岛鳌山和河北黄骅两地的生长表现较为稳定, 其收获体质量的一般配合力均为正值; UA4 引进群体的收获体质量的一般配合力值在青岛鳌山和河北黄骅两地存在较大差异, 分别为 0.27 和 -0.21, 说明该群体的生长性状表现受环境因素的影响较大。对两地体质量性状 GCA 效应值进行相关系数分析, 结果显示不同环境下体质量性状 GCA 值存在正相关 (0.31)。

表 3 凡纳滨对虾引进群体体质量的一般配合力效应值

Tab. 3 General combining ability in harvest body weight of introduced populations of *L. vannamei*

引进群体 introduced populations	收获体质量 harvest body weight		
	青岛鳌山 QDAS	河北黄骅 HBHH	河北黄骅 + 青岛鳌山 HBHH + QDAS
UA5	0.03	0.37	0.42
UA4	0.27	-0.21	0.32
SIN	0.01	0.26	0.19
UA3	0.04	0.19	-0.04
UA1	0.02	-0.03	-0.09
UA6	-0.16	-0.32	-0.27
UA2	-0.27	-0.27	-0.53

2.3 引进群体体质量和存活性状的特殊配合力

不同引进群体在相同环境下体质量和存活性状 SCA 值存在较大差异。青岛鳌山体质量性状 SCA 值范围为 $-0.48 \sim 3.56$, 存活性状 SCA 值为 $-0.13 \sim 0.26$; 河北黄骅体质量性状 SCA 值差异较小为 $-0.30 \sim 0.14$, 存活性状 SCA 值范围为 $-0.23 \sim 0.29$ (表 4)。对两地体质量和存活性状 SCA 效应值进行相关系数分析, 结果显示不同环境下体质量性状 SCA 值存在正相关(0.17), 存活性状 SCA 值存在负相关(-0.30)。

综合青岛鳌山和河北黄骅两地体质量和存活性状的总体 SCA 值效应, 杂交组合 UA5 × SIN、UA1 × UA2、UA3 × UA4 和 UA4 × UA5 体质量性状的 SCA 值最高, 其值分别为 0.30、0.29、0.24 和 0.22; 而 UA2 × UA5、UA2 × SIN、UA6 × SIN、UA6 × UA4 和 UA1 × SIN 杂交组合的 SCA 效应值为负数。杂交组合 UA1 × SIN 和 UA1 × UA2 存活性状的 SCA 值最高, 分别为 0.29 和 0.21; 而 UA6 × SIN 杂交组合 SCA 值最低, 为 -0.19 。

表 4 凡纳滨对虾不同杂交组合体质量和存活性状的特殊配合力效应值

Tab. 4 Specific combining ability in harvest body weight and survival of hybridized combinations of *L. vannamei*

杂交组合 hybridized combinations	青岛鳌山 QDAS		河北黄骅 HBHH		河北黄骅 + 青岛鳌山 HBHH + QDAS	
	收获体质量 harvest body weight	存活 survival	收获体质量 harvest body weight	存活 survival	收获体质量 harvest body weight	存活 survival
UA5 × SIN	-0.43	-0.01	0.14	-0.02	0.30	0.01
UA1 × UA2	0.39	0.16	0.09	0.13	0.29	0.21
UA4 × UA5	1.23	0.07	0.03	0.14	0.22	0.16
UA6 × UA2	-0.21	0.07	-0.01	0.06	0.04	0.09
UA3 × UA5	1.30	-0.05	0.04	0.21	0.17	0.03
UA3 × SIN	0.28	0.07	0.01	0.06	0.01	0.07
UA2 × UA3	0.37	-0.06	0.02	0.11	0.08	0.01
UA3 × UA4	-0.13	0.01	-0.03	-0.01	0.24	0.02
UA1 × UA4	3.56	0.09	0.00	-0.21	0.12	-0.07
UA6 × UA3	0.51	0.04	0.02	0.15	0.04	0.10
UA2 × UA4	0.19	0.05	0.02	0.09	0.08	0.07
UA4 × SIN	0.43	-0.11	0.05	0.29	0.08	0.14
UA1 × SIN	0.93	0.26	0.00	0.00	-0.04	0.29
UA6 × UA4	-0.20	-0.08	0.03	-0.06	-0.07	-0.01
UA2 × SIN	-0.45	-0.13	0.01	0.29	-0.21	-0.03
UA6 × SIN	-0.04	-0.08	-0.08	-0.23	-0.11	-0.19
UA2 × UA5	-0.48	0.26	-0.30	-0.08	-0.35	0.05

2.4 引进群体体质量、存活性状配合力的方差组分

青岛鳌山体质量性状 SCA 方差组分较大(1.27), 占表型方差组分的 14.77%, 而 GCA 方

差组分仅占表型方差的 0.81%; 河北黄骅体质量性状 GCA 和 SCA 方差组分均较小, 分别占表型方差组分的 1.34% 和 0.89% (表 5)。综合两地

表 5 凡纳滨对虾引进群体体质量、存活性状配合力的方差组分

Tab. 5 Variance component of combining ability in harvest body weight and survival of *L. vannamei*

性状 traits		方差 variances				
		σ_p^2	σ_{GCA}^2	σ_{SCA}^2	σ_f^2	σ_e^2
体质量 harvest body weight	青岛鳌山 QDAS	8.60	0.07	1.27	-	7.26
	河北黄骅 HBHH	8.94	0.12	0.08	1.11	7.63
	综合两地 QDAS + HBHH	8.88	0.16	0.14	1.46	7.12
存活 survival	青岛鳌山 QDAS	1.04	-	0.04	-	1.00
	河北黄骅 HBHH	1.08	-	0.08	-	1.00
	综合两地 QDAS + HBHH	1.05	-	0.05	-	1.00

注: σ_p^2 . 表型方差, σ_{GCA}^2 . 一般配合力方差, σ_{SCA}^2 . 特殊配合力方差, σ_f^2 . 全同胞效应方差, σ_e^2 . 残差。

Notes: σ_p^2 . phenotypic variance, σ_{GCA}^2 . general combining ability variance, σ_{SCA}^2 . specific combining ability variances, σ_f^2 . full-sib variance, σ_e^2 . residual variance.

体质量性状 GCA 和 SCA 方差组分,分别占表型方差的 1.80% 和 1.58% 两者无显著差异。青岛鳌山和河北黄骅两地存活性状 SCA 方差组分分别为 0.04 和 0.08,占各自表型方差的 3.85% 和 7.41%;综合两地存活性状 SCA 方差组分为 0.05,占表型方差的 4.76%。

3 讨论

国内外学者对凡纳滨对虾生长性状遗传参数估计显示,其体质量遗传力为中高遗传力^[20-21],在大规模养殖条件下,其收获体质量和存活率主要受加性基因效应控制^[22]。遗传力主要由加性效应决定,一般配合力也是由于基因的加性效应所致^[23],因此通过对引进群体一般配合力效应值的分析,可以初步预测其选育潜力。综合河北黄骅和青岛鳌山两地数据,凡纳滨对虾 UA5、UA4 和 SIN 3 个引进群体体质量性状的 GCA 值均表现为正效应,群体内存在较为丰富的加性遗传变异,可贡献更多的亲本参与构建育种基础群体。

研究表明,凡纳滨对虾存活性状遗传力较低^[3],体质量遗传力和存活率遗传力呈正相关^[22]。遗传力低的性状,受基因的非加性效应影响作用较大,具有较高的杂种优势^[24]。在水产动物中,野生牡蛎(*Concha ostreae*)、皱纹盘鲍、海湾扇贝(*Argopectens irradians*)均存在较强生长非加性效应^[14-15,25],可以通过特殊配合力分析指导牡蛎群体的选育^[26]。本研究中,综合分析青岛鳌山和河北黄骅两地体质量和存活性状特殊配合力,UA5 × SIN、UA1 × UA2、UA4 × UA5、UA4 × SIN 和 UA1 × SIN 5 个杂交组合 SCA 效应值正向优势较明显,说明该组合内存在较强的生长和存活非加性效应,杂交优势明显,可考虑作为留种家系并进一步验证。

综合两地体质量配合力方差组分分析显示,一般配合力方差组分和特殊配合力方差组分相近,说明加性效应和非加性效应共同影响体质量性状的表现;同时在结果中,家系全同胞组效应占了较大比重,如果利用系谱资料,估计体质量的加性遗传方差组分,方差组分值会更大。对青岛鳌山和河北黄骅两地体质量和存活性状配合力相关分析显示,两地体质量性状 GCA 与 SCA 值相关系数为正值,而存活性状 SCA 效应值相关系数为负数,表明体质量间基因型与环境互作差异小,存

活性状间差异大,这与 Gitterle 等^[22] 和 Perez-Rostro 等^[27] 研究结果一致。

水产动物重要经济性状的配合力分析模型主要有两类:一是基于方差分析(ANOVA)的 Griffing 遗传模型^[28]。Griffing 法在农作物育种配合力分析中应用较为多,在水产动物方面,主要应用在贝类杂交配合力研究中^[14-15,24,26]。然而,Griffing 遗传模型只能分析平衡数据,在完全双列杂交设计中的应用较为广泛,对于动物育种实践中常出现的不规则缺失的遗传数据难以应用分析^[29]。Wearden 等^[30] 在 Griffing 模型基础上增加了全同胞效应,但是仍然难以改变其在水产动物育种实践中局限性。二是基于 REML 和 BLUP 法的混合线性模型。混合线性模型中既能包括养殖场、养殖池塘、性别等固定效应,也能包括 GCA、SCA 和全同胞组效应等随机效应,并且可以处理不平衡数据,模型估计的配合力值更为准确。国外学者最先应用 REML 法开展杂交效应分析和非加性方差组分估计的研究^[31-32];国内研究者使用 MTDFREML 和 DFREML 分别研究了猪肉质、胴体性状的杂交参数和鸡生产性能、屠体性状配合力和杂种优势^[33-34];此方法在水产动物中应用较少,王炳谦等^[16] 应用线性模型最小二乘法估算 5 个虹鳟品系间的杂交配合力,从中选出一般配合力和特殊配合力较高的品系,并与微星标记相结合,预测品系间的杂交优势。本研究采用混合线性模型和约束极大似然法估算体质量性状的配合力,通过广义线性模型估计存活性状的配合力,成功筛选出具有优势性状的引进群体。在分析过程中,由于实际育种工作中的客观条件所限,不同引进群体间杂交组合家系数差异较大,且缺失部分杂交组合,因此无法估计存活性状的一般配合力。为了克服上述不足,在今后的研究中应完善凡纳滨对虾人工授精技术,提高育种家系构建成功率,同时保证家系数目在群体组合中合理分配。

本实验利用混合线性模型和广义线性模型,结合约束极大似然法估算了多个凡纳滨对虾引进群体杂交的体质量和存活率配合力,并筛选出生长性状加性遗传效应较强的 3 个群体,以及杂交优势明显的 5 个群体组合,为进一步进行我国北方养殖地区的凡纳滨对虾选育工作奠定了基础。

参考文献:

- [1] 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(3): 69-73.
- [2] Moss S M. Biosecure shrimp production: Emerging technologies for a maturing industry [J]. Global Aquaculture Advocate, 1999(2): 50-52.
- [3] Argue B J, Arce S M, Lotz J M, et al. Selective breeding of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) for growth and resistance to Taura Syndrome Virus[J]. Aquaculture, 2002, 204(3-4): 447-460.
- [4] Donato M D, 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.
- [5] Donato M D, Ramirez R, Howell C, et al. Artificial family selection based on growth rate in cultivated lines of *Litopenaeus vannamei* (Decapoda, Penaeidae) from Venezuela [J]. Genetics and Molecular Biology, 2008, 31(4): 850-856.
- [6] Goyard E, Patrois J, Peignon J M, et al. IFREMER's shrimp genetics program [J]. Global Aquaculture Advocate, 1992, 2(6): 26-28.
- [7] 陈锚, 吴长功, 相建海, 等. 凡纳滨对虾的选育与家系的建立[J]. 海洋科学, 2008, 32(11): 5-8.
- [8] 黄永春, 艾华水, 殷志新, 等. 第四代凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 抗 WSSV 选育家系抗病及免疫特性的研究[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1549-1557.
- [9] Andriantahina F. 凡纳滨对虾体重和体尺性状的遗传参数和选择育种效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [10] Sprague G F, Tatum L A. General vs. specific combining ability in single crosses of corn [J]. Journal of American Society of Agronomy, 1942, 34(4): 923-932.
- [11] 杨仕柳, 彭英林, 曾昭顺, 等. 湘黄猪杂交配合力测定[J]. 湖南农业大学学报, 2003, 29(4): 283-287.
- [12] 毛友纯, 徐庆国, 胡志明. 杂交早稻农艺性状的配合力研究[J]. 湖南农业大学学报, 2005, 31(2): 115-119.
- [13] 何贵平, 陈益泰, 张国武. 杉木主要生长、材质性状遗传分析及家系选择[J]. 林业科学研究, 2002, 15(5): 559-563.
- [14] Mallet A L, Haley L E. General and specific combining abilities of larval and juvenile growth and viability estimated from natural oyster populations [J]. Marine Biology, 1984, 81(1): 53-59.
- [15] Deng Y W, Liu X, Zhang G F, et al. Heterosis and combining ability: a diallel cross of three geographically isolated populations of Pacific abalone *Haliotis discus hannai* Ino [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(6): 1195-1199.
- [16] 王炳谦, 谷伟, 高会江, 等. 利用配合力和微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.
- [17] 姚雪梅, 赖秋明, 张继涛, 等. 凡纳滨对虾自交系与杂交系早期生长和存活比较[J]. 水产学报, 2006, 30(6): 791-795.
- [18] 杨章武, 郑雅友, 李正良, 等. 凡纳滨对虾群体自交与杂交子代幼体对低温、低盐抗逆性与生长比较[J]. 水产学报, 2012, 36(2): 284-289.
- [19] Misamore M, Browdy C L. Evaluating hybridization potential between *Penaeus setiferus* and *Penaeus vannamei* through natural mating, artificial insemination and in vitro fertilization [J]. Aquaculture, 1997, 150(1-2): 1-10.
- [20] Gitterle T, Salte R, Gjerde B, et al. Genetic (co) variation in resistance to White Spot Syndrome Virus (WSSV) and harvest weight in *Penaeus* (*Litopenaeus*) *vannamei* [J]. Aquaculture, 2005, 246(1-4): 139-149.
- [21] Castillo-Juarez H, Casares J C Q, Campos-Montes G, et al. Heritability for body weight at harvest size in the Pacific white shrimp, *Penaeus* (*Litopenaeus*) *vannamei*, from a multi-environment experiment using univariate and multivariate animal models [J]. Aquaculture, 2007, 273(1-4): 42-49.
- [22] Gitterle T, Rye M, Salte R, et al. Genetic (co) variation in harvest body weight and survival in *Penaeus* (*Litopenaeus*) *vannamei* under standard commercial conditions [J]. Aquaculture, 2005, 243(1-4): 83-92.
- [23] 庄志廉, 陈瑶生. 数量遗传学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] 古春龙, 李金碧, 喻达辉, 等. 合浦珠母贝双列杂交家系的建立与遗传分析[J]. 水产学报, 2010, 34(1): 26-31.
- [25] Zheng H P, Zhang G F, Guo X M, et al. Heterosis between two stocks of the bay scallop, *Argopecten irradians* Lamarck [J]. Journal of Shellfish Research, 2006, 25(3): 807-812.
- [26] Hedgecock D, Davis J P. Heterosis for yield and crossbreeding of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*

- [J]. *Aquaculture*, 2007, 272(1-4): 17-29.
- [27] Perez-Rostro C, Ibarra A M. Heritabilities and genetic correlations of size traits at harvest size in sexually dimorphic Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) grown in two environments [J]. *Aquaculture Research*, 2003, 34(12): 1079-1085.
- [28] Grigg B. The concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing system [J]. *Australian Journal of Biological Sciences*, 1956, 9(4): 463-493.
- [29] 朱军, 季道藩, 许馥华. 作物品种间杂交优势遗传分析的新方法 [J]. *遗传学报*, 1993, 20(3): 262-271.
- [30] Wearden S, Craig J V, Tindell D. Components of specific combining ability estimated from strain and breed crosses in chickens [J]. *Poultry Science*, 1967, 46(6): 1398-1406.
- [31] Henderson C R. Best linear unbiased prediction of non-additive genetic merits in noninbred populations [J]. *Journal of Animal Science*, 1985, 60(1): 111-117.
- [32] Rodriguez-Almeida F A, Van-Vleck L D, Willham R L, et al. Estimation of non-additive genetic variances in three synthetic lines of beef cattle using an animal model [J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(4): 1002-1011.
- [33] 章岩. 猪肉质和胴体性状的测定及其杂交参数分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 1993.
- [34] 张俊, 张沅, 孙东晓, 等. 应用非求导约束最大似然法 DFREML 分析杂种优势 [J]. *畜牧兽医学报*, 2004, 35(1): 28-32.

Combining ability of hybrid generation from the introduced populations of *Litopenaeus vannamei*

WANG Hao^{1,2}, LUO Kun², LUAN Sheng², KONG Jie^{2*}, XU Shengyu³, CHEN Baolong³

(1. College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

3. Qingdao Higen Aquabreeding Technology Co., Ltd, Qingdao 266071, China)

Abstract: Seven populations of *Litopenaeus vannamei* were collected to evaluate the general combining ability and the specific combining ability in harvest body weight and survival with the mixed linear model and generalized linear models, combined with constrained maximum likelihood method. Incomplete diallel crosses and nest design were adopted and 130 full-sib families were obtained by artificial insemination. The results showed that the populations of UA5, UA4 and SIN were higher than others in general combining ability of harvest body weight, the magnitude were 0.40, 0.32 and 0.19, respectively. The general combining ability of harvest body weight and survival in the hybrid groups of UA5 × SIN, UA1 × UA2, UA4 × UA5, UA4 × SIN and UA1 × SIN, which were priority combinations in producing superior offspring, had positive advantages. The analysis of variance of combining ability showed that in different environments, the proportion of GCA and SCA variance component in body weight traits had little difference. Correlation analysis showed that there is positive correlation between the GCA of harvest weight, but negative correlation in survival. For the study of general combining ability and specific combining ability in different groups, the experiment provided the basic data for further genetic breeding of *L. vannamei*.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; hybrid; general combining ability; specific combining ability

Corresponding author: KONG Jie. E-mail: kongjie@ysfri.ac.cn