

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14459

凡纳滨对虾 3 个引进群体及其杂交子代的生长性能评估

胡志国, 刘建勇, 袁瑞鹏, 张嘉晨

广东海洋大学 水产学院, 广东 湛江 524088

摘要: 以 3 个凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)引进群体为亲本, 按照 Griffing I 方法进行双列杂交, 对子代杂交组合体质量进行长期跟踪测量, 分析幼虾阶段、成虾阶段、留种阶段的特定生长率和杂种优势率。研究结果表明, 9 个交配组合群体 3 个生长发育阶段体质量最小二乘均值的变化范围分别为 5.86~12.15 g、14.79~28.82 g 和 38.25~54.74 g, 其中各生长发育阶段杂交组均值均比自交组高。各阶段的特定生长率分别为 3.40~5.70%/d、1.11~2.56%/d 和 0.33~0.68%/d。杂种优势分析结果显示, 凡纳滨对虾各杂交组合体质量存在较明显的杂种优势, 幼虾阶段、成虾阶段、留种阶段表现为递减趋势, 其中迈阿密 SIS 的 M 群体母本与夏威夷的 H 群体父本杂交组合(M-H)杂种优势率最高。M 群体作为父本亦或母本其子代体质量的最小二乘均值均较高, 且不同生长阶段双亲均值均高于 3 个群体的均值, 属于相对优良的亲本, M-H 和 M-T 杂交组合属于优选杂交组合。该研究为进一步家系选育基础群体的建立提供了技术参数和理论依据。

关键词: 凡纳滨对虾; 双列杂交; 体质量; 最小二乘均值; 特定生长率; 杂种优势

中图分类号: S917, Q321

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)05-0925-08

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)又称南美白对虾, 主要分布于加利福尼亚湾至秘鲁北部的太平洋沿岸水域, 是当今世界上产量最高的养殖对虾品种之一^[1]。1998 年, 国内开始引进该品种, 并迅速发展为主要对虾养殖品种, 养殖产量超过 120 万 t^[2]。但随着凡纳滨对虾养殖业的发展, 死亡率上升、规格大小不均、形态畸形以及抗逆性下降等诸多种质衰退问题逐渐暴露出来^[3]。培育抗逆性强、生长快的新品系成为推动凡纳滨对虾产业可持续发展的关键所在^[4]。自 20 世纪 80 年代以来, 国外已陆续建立了多个凡纳滨对虾育种核心群体^[5-6], 对其进行生长、抗病和抗逆等数量性状的遗传改良, 并取得了一定的成果。国内在凡纳滨对虾的遗传改良方面也取得重要进展, 已培育出“中科 1 号”、“中兴 1 号”、“科海 1 号”和“桂

海 1 号”等凡纳滨对虾新品种^[7-9]。目前国内已报道的凡纳滨对虾选育良种均是通过远缘群体杂交的手段获得。

杂交优势的利用可有效发掘生长潜力, 大幅度提高产量, 是动植物育种的重要手段之一。双列杂交分析具有能够提供组合材料遗传方差的变异来源、遗传成分等方面的本质信息, 能够预测杂交后代的实际表型能力, 以及预测杂种优势等优点, 因而成为亲本评价及发现优异组合材料的有效方法。在水产动物育种中, 林红军等^[10]分析了 2 个凡纳滨对虾群体杂交子一代的生长和存活率; 秦钦等^[11]研究了斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)家系育种核心群的生长性能及优良亲本选择。阮晓红等^[12]评估了 7 个引进群体 153 日龄的生长性能, 研究了其生长的杂种优势。由此

收稿日期: 2014-11-08; 修订日期: 2015-03-09.

基金项目: 广东省海洋渔业科技推广专项科技攻关与研发项目(A201208B05); 广西科学研究与技术开发技术项目(桂科转 12239002-3, 桂科合 14125007-2-9).

作者简介: 胡志国(1990-), 男, 硕士研究生, 从事水产动物数量遗传育种研究. E-mail: 741164367@qq.com

通信作者: 刘建勇(1970-), 男, 教授, 从事水产动物遗传育种研究. E-mail: liujy70@126.com

可见,分析选育亲本杂交后裔生长性状,评估筛选优良性状的亲本及优良的交配组合是良种选育最重要的一个步骤。本研究以 3 个凡纳滨对虾引进群体为亲本,按照 Griffing I 方法进行双列杂交,对亲本及杂交组合体质量性状进行长期跟踪测量,分析幼虾阶段、成虾阶段、留种阶段的特定生长率和杂种优势率,筛选和评估生长性状优良的亲本群体和杂交最优组合,以期减少杂交组合选配的盲目性,加速凡纳滨对虾选择育种的进程,为进一步家系选育基础群体的建立提供技术参数和理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

实验所用 3 个凡纳滨对虾亲本群体均为进口亲虾,分别为美国迈阿密 SIS 群体(M),美国夏威夷 SIS 群体(H)和泰国正大群体(T)。2013 年 5 月,采用自然交配与人工授精相结合的方法(人工授精按照赖秋明等^[13]报道的方法)构建杂交群体,共计 9 个交配组合,128 个全同胞家系(表 1)。

表 1 凡纳滨对虾 3 个引进群体的完全双列杂交
Tab.1 Complete diallel cross of three introduced populations of *Litopenaeus vannamei*

引进群体(♀) introduced population(♀)	引进群体(♂) introduced population(♂)		
	迈阿密 M	夏威夷 H	正大 Z
迈阿密 M	9	16	11
夏威夷 H	13	15	21
正大 Z	18	10	15
合计 total	128		

1.2 幼体培育和仔虾暂养

待各群体成功孵化后,9 个群体分别在 9 个 18 m² 的育苗池中进行标准化幼体培育。当幼体发育至仔虾后,从每个群体随机取 4000 尾放入 10 m² 的育苗池中继续单独培养。为消除环境差异,保持各阶段的培育条件尽量一致,主要包括各个阶段水的盐度、水温、幼体密度、饵料及充气等条件。

1.3 混养和数据测量

待仔虾生长至 1~3 g 时,各群体随机选取 60 尾个体,在第 5 腹节和第 6 腹节处,进行“可视嵌

入性荧光标记”(visible implant elastomer)注射,以区分不同的群体。各群体标记稳定后,即 2013 年 7 月 26 日,放入室外水泥池中。随后分别于 2013 年 8 月、10 月和 2014 年 3 月,使用电子天平测量实验组所有存活凡纳滨对虾体质量。

1.4 数据处理与分析

应用 SPSS17.0 软件进行体质量数据残差正态性检验。各交配组合体质量的最小二乘均值估计模型为:

$$Y_{ijk}=u+bW_k+P_i+Sex_j+e_{ijk}$$

式中, Y_{ijk} 为各生长阶段观测体质量, u 为总体均数, W_k 为标记时体质量(协变量), b 为回归系数, P_i 为第 i 个交配组合的固定效应, S_j 为性别固定效应, e_{ijk} 为随机误差效应。由于幼虾阶段和成虾阶段测量体质量时,测量样本的性别较难确定,故只在留种阶段数据分析时,包括了模型中性别固定效应。

体质量性状的特定生长率:

$$SGR=(\ln X_1-\ln X_0)/t \times 100\%$$

式中, X_0 为性状的初始值, X_1 为性状的最终值, t 为实验养殖天数。

杂种优势(heterosis)计算公式如下:

$$MP(\%) = \frac{F_1 - P_0}{P_0} \times 100$$

$$BP(\%) = \frac{F_1 - P_B}{P_B} \times 100$$

式中, MP 代表中亲优势, F_1 为杂交组最小二乘均值, P_0 为相应双亲均值; BP 代表超亲优势, P_B 为杂交组较好的亲本均值。

2 结果与分析

2.1 各生长阶段的体质量数据正态性检验

分别对凡纳滨对虾幼虾阶段、成虾阶段及留种阶段体质量数据进行残差正态性检验。结果如图 1 的直方图和 P-P 图所示,表明数据近似服从正态分布。因此不需要对各生长阶段体质量数据进行数据转换处理,可直接进行体质量的最小二乘均值估计。

2.2 各生长阶段体质量的描述性统计量

3 个引进群体完全双列杂交获得的 9 个交配组合,包括 6 个杂交组合和 3 个自交组合,暂养

前、标记阶段、幼虾阶段、成虾阶段以及留种阶段体质量实测值的描述性统计见表 2。凡纳滨对虾各阶段体质量的中位数、最大值、最小值、第一四分位数、第三四分位数及异常值如图 2 所示。

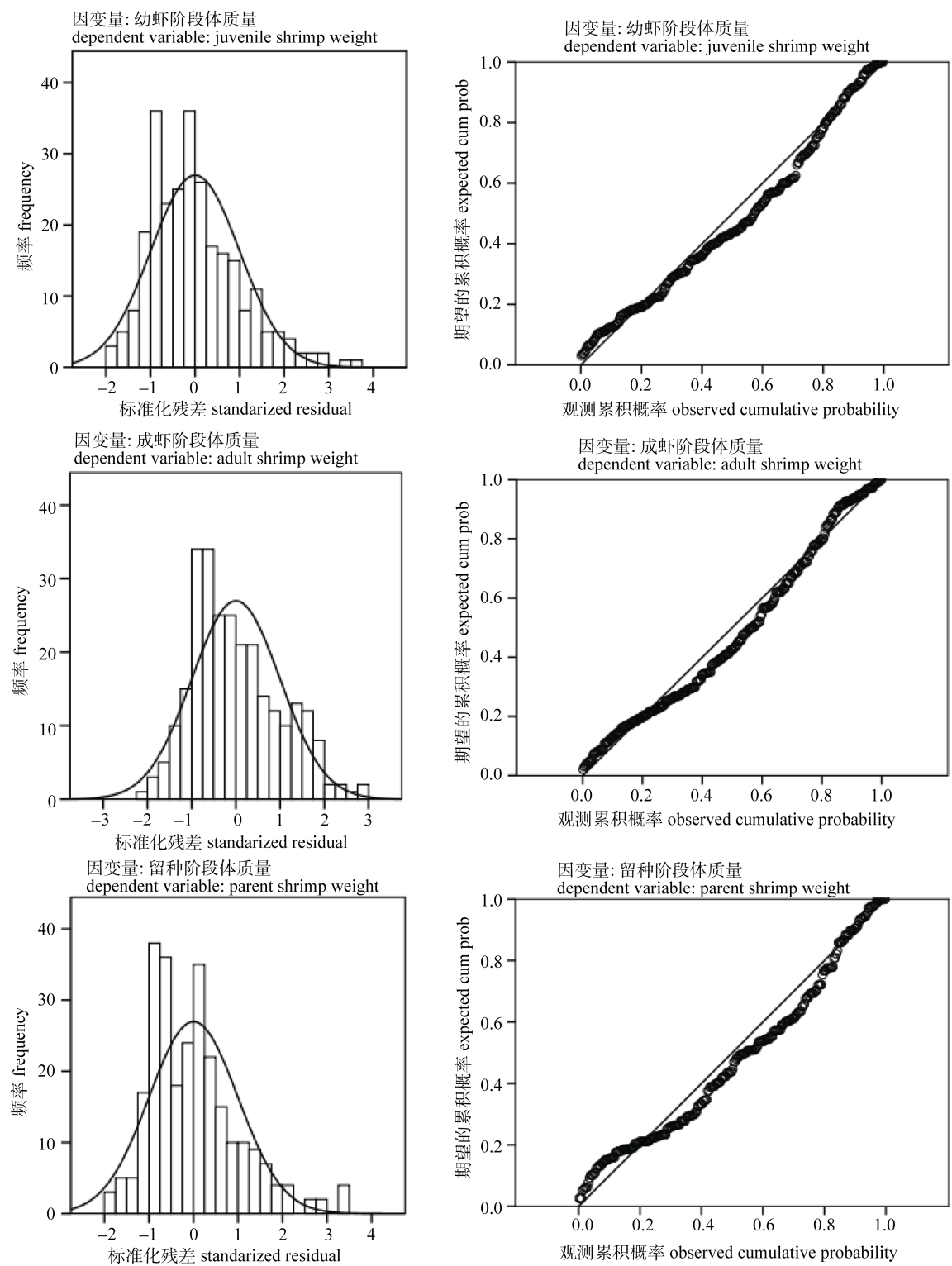


图 1 凡纳滨对虾 3 个生长阶段体质量数据残差直方图和 P-P 图

Fig.1 Residual histograms and P-P plot of body weight of *Litopenaeus vannamei* at three development stages

表 2 暂养前、标记阶段、幼虾阶段、成虾阶段以及留种阶段凡纳滨对虾杂交及自交群体体质量性状的描述性统计量
Tab.2 Descriptive statistics of body weight of *Litopenaeus vannamei* at different stages n=30

交配组合 combination	暂养前 larvae shrimp	标记阶段 individual marked	幼虾阶段 juvenile shrimp stage		成虾阶段 adult shrimp stage		留种阶段 reserve seed stage	
	$\bar{x} \pm SD$	$\bar{x} \pm SD$	$\bar{x} \pm SD$	变异系数 SV	$\bar{x} \pm SD$	变异系数 SV	$\bar{x} \pm SD$	变异系数 SV
	$\bar{x} \pm SD$	$\bar{x} \pm SD$	$\bar{x} \pm SD$	变异系数 SV	$\bar{x} \pm SD$	变异系数 SV	$\bar{x} \pm SD$	变异系数 SV
M-M	0.02±0.04	1.4±0.67	6.18±1.35 ^c	0.22	14.79±3.57 ^c	0.24	38.55±5.63 ^{cd}	0.15
H-H	0.04±0.04	1.0±0.38	5.86±1.55 ^c	0.26	17.63±3.46 ^{cd}	0.20	41.51±7.78 ^{cd}	0.19
T-T	0.02±0.02	1.0±0.52	6.03±1.12 ^c	0.19	15.46±4.17 ^{de}	0.27	38.56±4.31 ^d	0.11
M-H	0.06±0.02	2.4±1.27	11.19±3.69 ^{ab}	0.24	28.66±5.02 ^{ab}	0.18	54.47±12.2 ^a	0.22
M-T	0.03±0.02	3.4±1.46	12.48±3.29 ^b	0.26	19.2±4.63 ^c	0.24	43.58±5.21 ^c	0.12
H-M	0.02±0.04	1.7±0.62	11.45±2.77 ^c	0.24	31.13±5.54 ^a	0.18	39.08±4.25 ^d	0.11
H-T	0.10±0.03	2.1±1.28	8.13±1.44 ^d	0.18	18.74±3.64 ^{cd}	0.19	44.97±6.03 ^c	0.13
T-M	0.04±0.02	3.8±2.04	12.74±3.04 ^a	0.21	27.75±5.79 ^b	0.21	50.24±6.73 ^b	0.13
T-H	0.03±0.02	1.1±0.63	7.04±2.01 ^{de}	0.29	17.19±3.69 ^{de}	0.21	41.78±6.56 ^c	0.16

注：同列数据间上标小写字母均不相同为差异显著($P<0.05$)。
Note: Different superscript letters in the same column denote significant differences ($P<0.05$).

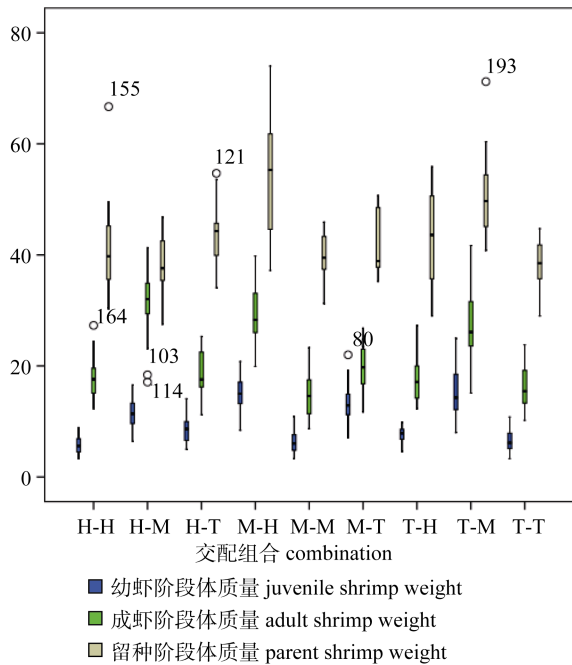


图 2 凡纳滨对虾不同交配组合体质量性状箱线图
Fig.2 Box plot of body weight among different mating combinations of *Litopenaeus vannamei*

各交配组合群体的幼虾阶段、成虾阶段和留种阶段体质量均值的变化范围分别为 5.86~12.74 g、14.79~31.13 g、38.55~54.47 g。各群体的标准差分别为 1.12~3.69、3.46~5.79、4.25~12.2，变异系数的范围在 0.11~0.26。较高的变异系数表明，凡

纳滨对虾个体间体质量差异明显，体质量性状遗传变异丰富，选育潜力较大。

2.3 凡纳滨对虾交配组合体质量最小二乘均值

各生长阶段体质量性状的最小二乘均值以及特定生长率和杂种优势分析结果如表 3 所示。幼虾阶段各交配组合的体质量的最小二乘均值为 5.86~12.15 g，其中杂交组合均值为 10.65 g，自交组合均值为 6.14 g。成虾阶段各交配组合的体质量的最小二乘均值为 14.79~28.82 g，其中杂交组合均值为 22.89 g，比自交组合均值(16.26 g)高 40.77%。留种阶段各交配组合的体质量的最小二乘均值为 38.25~54.74 g，其中杂交组合均值(45.69 g)比自交组合均值(39.21 g)高 16.53%。各阶段的特定生长率分别为 3.40~5.70%/d，1.11%~2.56%/d，0.33%~0.68%/d。杂种优势分析结果显示，凡纳滨对虾各杂交组合体质量存在较明显的中亲优势和超亲优势，幼虾阶段、成虾阶段、留种阶段表现为递减趋势，其中迈阿密群体母本与夏威夷群体父本杂交组合(M-H)杂种优势率最高。

2.4 凡纳滨对虾亲本体质量最小二乘均值

3 个引进群体分别作为父本和母本，完全双列杂交子一代各生长阶段体质量的最小二乘均值如表 4 所示。仔虾阶段，3 个群体分别作为父本和

表 3 凡纳滨对虾杂交及自交群体体质量性状最小二乘均值
Tab. 3 Analysis of least squares means on body weight of hybrid and inbred populations of *Litopenaeus vannamei*

交配组合 combination		最小二乘均值 LSM			特定生长率 SGR			中亲优势 MP			超亲优势 HP		
		A 阶段	B 阶段	C 阶段	A 阶段	B 阶段	C 阶段	A 阶段	B 阶段	C 阶段	A 阶段	B 阶段	C 阶段
		A stage	B stage	C stage	A stage	B stage	C stage	A stage	B stage	C stage	A stage	B stage	C stage
自交组合 inbred combination	M-M	6.18	14.79	38.25	4.37	2.03	0.68						
	H-H	5.86	17.63	40.93	5.20	2.56	0.60						
	T-T	6.39	16.36	38.45	5.46	2.19	0.61						
均值 mean		6.14	16.26	39.21									
杂交组合 hybridized combination	M-H	11.89	28.82	54.74	4.71	2.06	0.46	0.98	0.78	0.38	0.92	0.63	0.34
	M-T	12.15	19.60	41.98	3.75	1.11	0.54	0.93	0.26	0.09	0.90	0.20	0.10
	H-M	11.71	25.14	39.91	5.68	1.78	0.33	0.95	0.55	0.01	0.89	0.43	-0.02
	H-T	8.46	18.74	44.13	4.10	1.85	0.61	0.38	0.10	0.11	0.32	0.06	0.08
	T-M	12.07	27.75	50.14	3.40	1.94	0.42	0.92	0.78	0.31	0.89	0.70	0.31
	T-H	7.64	17.31	43.25	5.70	1.90	0.65	0.25	0.02	0.09	0.20	-0.02	0.06
	均值 mean	10.65	22.89	45.69									

注: A 阶段代表幼虾阶段, B 阶段代表成虾阶段, C 阶段代表留种阶段。
Note: A stage represents larvae stage; B stage represents adult stage; C stage represents select seed shrimp stage.

表 4 凡纳滨对虾亲本体质量最小二乘均值分析
Tab. 4 Analysis of least squares means on body weight of different parents of *Litopenaeus vannamei* populations

群体 population	父本 组合数 no. of sir	母本 组合数 no. of dam	幼虾阶段 larvae stage			成虾阶段 adult stage			留种阶段 reserve seed stage		
			父本 sir	母本 dam	双亲均值 parent	父本 sir	母本 dam	双亲均值 parent	父本 sir	母本 dam	双亲均值 parent
迈阿密 M	3	3	9.99	10.07	10.03	22.56	21.07	21.82	42.77	44.99	43.88
夏威夷 H	3	3	8.46	8.68	8.57	21.25	20.50	20.86	46.31	41.67	43.99
泰国正大 T	3	3	9.00	8.70	8.85	18.23	20.47	19.35	41.52	42.95	42.24
均值 mean					9.15			20.68			43.37

母本时, 子代体质量的最小二乘均值排序均为迈阿密群体(M)>泰国正大群体(T)>夏威夷群体(H); 成虾阶段, 3 个群体分别作为父本和母本时, 子代体质量的最小二乘均值排序均为 M>H>T; 留种阶段, 3 个群体作为父本时, 子代体质量的最小二乘均值排序依次为 H>M>T, 作为母本时, 子代体质量的最小二乘均值排序依次为 M>T>H。由此可见, M 群体作为父本亦或母本其子代体质量的最小二乘均值均较高, 且不同生长阶段双亲均值均高于 3 个群体的均值, 属于相对优良的亲本群体。

3 讨论

3.1 亲本评估

选育子代只有从亲本获得优良的、高产的遗

传基因, 才能产生显著的种质优势。在数量遗传育种过程中, 优良亲本的选择是良种培育的前提。该研究通过对不同群体间完全双列杂交的子一代不同生长阶段体质量性状的全面分析, 综合评定筛选亲本群体和杂交组合群体, 构建优良储备亲本群为下一代家系选育准备材料, 是进一步实现选择育种的基础。利用遗传背景不同的群体杂交改良后代生长性状的研究, 在中国明对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)^[14]、日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)^[15]、罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[16]、斑节对虾(*Penaeus monodon*)^[17]等虾类中均有报道。目前国内凡纳滨对虾优质种苗(俗称一代苗)生产使用的进口亲虾主要包括美国迈阿密 SIS 群体, 美国夏威夷 SIS 群体和泰国正大群体,

即该研究使用的 3 个亲本群体,地理上远缘、遗传分化较大^[18],因此该研究结果对于养殖生产具有实际参考价值。

3.2 杂种优势分析

杂种优势在国内外均被广泛运用,通常生产上都依据杂交后代是否显示杂种优势来评估不同的杂交方案的可行性。该研究 6 个杂交组合中正交与反交子代的体质量性状存在差异,正反交杂种优势差异明显,表明存在一定的反交效应。而这种正反交结果的差异为杂交育种过程中特定的亲本选择提供了理论基础^[19]。在水产动物中,正反交组合杂种优势存在差异的现象是较为普遍的^[20]。朱健等^[21]对建鲤(*Cyprinus carpio* var. *jian*)和黑龙江野鲤(*Cyprinus carpio haematopterus*)自交以及正反交子代生长性状比较表明,体质量和体长正反交杂种优势存在差异。张辉等^[22]对 2 个菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)品系间的双列杂交研究表明,正反交组合的单亲杂种优势具有明显的不对称性。高保全等^[23]对不同地理群体三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)自繁和种群间杂交子代生长性状的比较发现,不同种群在某些性状的正反交效果也不一样。Heath 等^[24]认为此现象与亲本的母体效应有关,也有学者指出此现象还与细胞质遗传、父本效应以及性别连锁有关。此外,杂种优势的大小取决于双亲性状间的差异和互相补充、双亲个体基因型的纯合度、以及养殖环境条件等诸多因素的综合作用。综合分析幼虾阶段、成虾阶段和留种阶段各杂交子代的杂种优势表明,不同生长发育阶段,体质量性状的杂种优势率存在显著差异,且随着生长日龄的增加有明显下降趋势,与林红军等^[10]和姚雪梅等^[25]的研究结果一致。

3.3 最小二乘均值分析

该研究利用线性模型对各生长阶段体质量性状进行最小二乘均值估计。对校正后的各交配组合最小二乘均值分析结果显示,杂交群体的生长优势高于自交群体,其中 MT 和 MH 正反交群体较 HT 正反交群体有明显生长优势,表明 M 群体与 T 群体、M 群体与 H 群体为远缘关系,而 H 群

体与 T 群体的遗传距离相对较近。因此在实际生长中 M-H 杂交组合和 M-T 杂交组合可作为优选杂交组合,在组建下一代家系选育储备亲本群时,可适当增加 M 群体和 H 群体的亲本比例。

参考文献:

- [1] Wang X Q, Ma S, Dong S L. Studies on the biology and cultural ecology of *Litopenaeus vannamei*: A Review[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2004(4): 94–100. [王兴强, 马甦, 董双林. 凡纳滨对虾生物学及养殖生态学研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2004(4): 94–100.]
- [2] Chen J S, Zhu N Y, Kong L, et al. Molecular characteristics and antimicrobial sensitivity of bacterial pathogen from the outbreak of *Litopenaeus vannamei* red-body disease[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(12): 1891–1900. [陈健舜, 朱凝瑜, 孔蕾, 等. 凡纳滨对虾细菌性红体病原的分子特征与耐药性[J]. 水产学报, 2012, 36(12): 1891–1900.]
- [3] Li Y C, Cai Q, Chen H J, et al. Shrimp of *Penaeus vannamei* breeding: Study on larval rearing techniques[J]. Ocean and Fishery, 2010, 11: 41–42. [李亚春, 蔡强, 陈海进, 等. 凡纳滨对虾良种选育之虾苗培育技术探讨[J]. 海洋与渔业, 2010, 11: 41–42.]
- [4] Luan S, Luo K, Ruan X H, et al. Genetic parameters and genotype by environment interaction for body weight and survival of pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(2): 445–452. [栾生, 罗坤, 阮晓红, 等. 凡纳滨对虾 (*Litopenaeus vannamei*) 体重, 存活性状的遗传参数和基因型与环境互作效应[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(2): 445–452.]
- [5] Donato M, Ramirez R, Howell C, et al. Artificial family selection based on growth rate in cultivated lines of *Litopenaeus vannamei* (Decapoda, Penaeidae) from Venezuela[J]. Genet Mol Biol, 2008, 31(4): 850–856.
- [6] 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): 447–460.
- [7] Chen M, Wu C G, Xiang J H, et al. Selective breeding and pedigree foundation of *Litopenaeus vannamei*[J]. Marine Sciences, 2008, 32(11): 5–8, 55. [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, 55.]
- [8] Farafidy A. Study on the effect of selective breeding and genetic parameters for pacific white shrimp, *Litopenaeus Vannamei*[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry

- University, 2001. [Farafidy A. 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]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2011.]
- [9] Zhao Y Z, Guihai No.1 *Litopenaeus vannamei*[J]. Ocean and Fishery, 2013(3): 54. [赵永贞. 凡纳滨对虾“桂海1号”[J]. 海洋与渔业, 2013(3): 54.]
- [10] Lin H J, Shen Q, Zhang L P, et al. A diallel analysis on growth traits in shrimp *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(6): 51–56. [林红军, 沈琪, 张吕平, 等. 凡纳滨对虾生长性状的双列杂交分析[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(6): 51–56.]
- [11] Qin Q, Bian W J, Cai Y X, et al. Study of growth performance of nucleus herd of family breeding in channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and selection of parents with good trait[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(1): 63–70. [秦钦, 边文翼, 蔡永祥, 等. 斑点叉尾鲷家系育种核心群生长性能研究及优良亲本选择[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(1): 63–70.]
- [12] Ruan X H, Luo K, Luan S, 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. [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.]
- [13] Lai Q M, Wang H S, Fu K Z. Artificial insemination of *Litopenaeus vannamei*[J]. Marine Sciences, 2005, 29(10): 19–22. [赖秋明, 王海石, 符孔忠. 凡纳滨对虾人工授精的初步研究[J]. 海洋科学, 2005, 29(10): 19–22.]
- [14] Tian Y, Kong J, Yang C H, et al. Study on hybridization of two different populations of *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(3): 157–161. [田焱, 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.]
- [15] Li H S, Feng J B, Xie N, et al. Comparison on growth performance among F_1 groups of diallel crosses of *Macrobrachium nipponense* from Taihu Lake and Poyang Lake populations[J]. Freshwater Fisheries, 2011, 41(1): 43–47. [李瀚声, 冯建彬, 谢楠, 等. 日本沼虾太湖群体和鄱阳湖群体杂交 F_1 生长性能比较研究[J]. 淡水渔业, 2011, 41(1): 43–47.]
- [16] 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. [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.]
- [17] Li Y, Huang J H, Yang Q B, et al. Growth performance of inbred and hybrid F_1 s created from the cross of two geographic *Penaeus monodon* populations[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(5): 784–789. [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_1 的生长性能[J]. 中国水产科学, 2012, 19(5): 784–789.]
- [18] Sun C B, Chen G L, Tong H R, et al. Morphological differences of four imported *Litopenaeus vannamei* groups from the united states[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(1): 27–32. [孙成波, 陈国良, 董汉荣, 等. 美国4个凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)种群形态差异与判别分析[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(1): 27–32.]
- [19] Bentsen H B, Eknath A E, Palada-de Vera M S, et al. Genetic improvement of farmed tilapias: growth performance in a complete diallel cross experiment with eight strains of *Oreochromis niloticus*[J]. Aquaculture, 1998, 160(1): 145–173.
- [20] Clayton G M, Price D J. Heterosis in resistance to *Ichthyophthirius multifiliis* infections in poeciliid fish[J]. J Fish Biol, 1994, 44(1): 59–66.
- [21] Zhu J, Chai X S, Li B, et al. Growth comparison of inbreeds of *Cyprinus carpio* var. Jian, *Cyprinus carpio haematopterus* and the reciprocal F_1 hybrid[J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(2): 35–41. [朱健, 柴学森, 李冰, 等. 建鲤和黑龙江野鲤自交以及正反交子代生长比较[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(2): 35–41.]
- [22] Zhang H, Yan X W, Zhang Y H, et al. Diallel crosses between cow color strain and ocean-orange color strain of manila clam *Ruditapes philippinarum*[J]. Fisheries Science, 2014, 33(2): 75–80. [张辉, 闫喜武, 张跃环, 等. 菲律宾蛤仔奶牛蛤与海洋橙品系间的双列杂交[J]. 水产科学, 2014, 33(2): 75–80.]
- [23] Gao B Q, Liu P, Li J, et al. Heterosis of F_1 *Portunus trituberculatus* form matings and crosses among different geographical populations[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2008, 39(3): 291–296. [高保全, 刘萍, 李健, 等. 三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)不同地理种群内自繁和种群间杂交子一代生长性状的比较[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(3): 291–296.]
- [24] Heath D D, Fox C W, Heath J W. Maternal effects on offspring size: variation through early development of chinook salmon[J]. Evolution, 1999, 53(5): 1605–1611.
- [25] Yao X M, Huang B, Lai Q M, et al. Comparison of growth and survival of the hybrid and inbred lines in *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(6): 791–795. [姚雪梅, 黄勃, 赖秋明, 等. 凡纳滨对虾自交系与杂交系早期生长和存活的比较[J]. 水产学报, 2006, 30(6): 791–795.]

Evaluation of growth performance in three imported *Litopenaeus vannamei* populations and their hybrid offspring

HU Zhiguo, LIU Jianyong, YUAN Ruipeng, ZHANG Jiachen

Fisheries College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

Abstract: The white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, is one of the most economically important farmed shrimp species worldwide, which has the higher yields and lower production cost, and it is mainly distributed from the Gulf of California to the Pacific coastal waters of northern Peru. In 1998, *L. vannamei* was introduced to China, but the long-term sustainability of white shrimp farming is currently under threat because of variation in size, vulnerability of farmed stocks to disease and many other germplasm recession-related problems. The current status of white shrimp aquaculture highlights the need for a systematic stock improvement program to improve economically important traits. The cultivation of strongly resistant, fast growing new shrimp strains is key to maintaining sustainable development of the *L. vannamei* industry. Since the 1980s, many countries have gradually established several *L. vannamei* breeding groups to improve growth, disease resistance, and other quantitative traits that yield genetic improvement. Although the domestic *L. vannamei* germplasm mainly comes from an American source, there has been substantial genetic improvement of *L. vannamei*, including production of new strains such as “in section No. 1,” “ZTE No. 1,” “Kehai No. 1,” and “Gui Hai No. 1,” which were obtained from distant groups by hybridization. Heterosis can effectively improve growth potential and increase production, which is one of the most important goals of animal and plant breeding. Crossbreeding has been used in aquaculture to exploit hybrid vigor in crossbred offspring that show better performance and increased fitness compared with their purebred parents. In the present study, we used genetic resources from different geographical strains of white shrimp from Miami, Hawaii, and Thailand in a complete diallel cross (Griffing I). In this study, we analyzed the effect of heterosis on growth rate and body weight at parental- and hybrid-strain juveniles, adults, and reserve seed stages. The results showed that the ranges of least squares means of different mating combinations among these stages were 5.86–12.15 g, 14.79–28.82 g, and 38.25–54.74 g, respectively, and the ranges of growth rate were 3.40–5.70%/d, 1.11–2.56%/d, and 0.33–0.68%/d, respectively. Least squares means of hybrid strains were higher than those of inbred strains. Heterosis analysis showed positive mid-parent heterosis and heterobeltiosis for body weight of hybrids with a diminishing trend over time. The highest heterosis occurred in hybrid offspring that were crosses of female individuals of the Miami population with male individuals of the Hawaiian population. At each growth stage, least squares mean of offspring of the Miami population and average of the parents were higher than those of the average of all 3 parent populations. Increase in proportion of Miami and Hawaiian parents when producing crosses will help improve offspring growth performance. Our study provides theoretical basis and technical parameters for constructing a base breeding population of white shrimp in the future.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; complete diallel; body weight; least squares mean; specific growth rate; heterosis

Corresponding author: LIU Jianyong. E-mail: liujy70@126.com