

文章编号: 1674-5566(2017)01-0057-07

DOI:10.12024/jsou.20160301700

## 4 个不同地理群体刺参杂交的杂种优势及配合力分析

郑言鑫<sup>1</sup>, 赵春暖<sup>1</sup>, 于涛<sup>1</sup>, 蔡忠强<sup>1</sup>, 林建国<sup>1</sup>, 秦搏<sup>2</sup>

(1. 中国水产科学研究院长岛增殖实验站, 山东长岛 265800; 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

**摘要:** 为了探究长岛(C)、大连(D)、威海(W)、胶南(J)4 个中国不同地理种群刺参的杂种优势和配合力, 采用完全双列杂交建立 16 个杂交和自交群体组, 测定不同日龄(30 日龄, 60 日龄, 80 日龄, 105 日龄)的杂交及自交后代生长情况, 分析后代生长杂种优势和各组合配合力。结果发现, 不同组幼参的生长速度不同, 30 至 80 日龄杂交组与自交组差异不显著, 105 日龄时杂交组 D(♀) × J(♂) (DJ) 组、WD 组、JD 组、JC 组显著高于自交组(CC 组、WW 组、JJ 组); 不同杂交组的杂种优势率在同一生长阶段各不相同, 而同一组在不同生长阶段也存在差别, CD 组、JC 组和 JD 组始终为正值, CW 组始终为负值, 随着各组刺参的生长杂种优势率为正值的组增多, 其中 105 日龄 JC 组最高, 为 9.69%; D(♀)、J(♀) 和 D(♂) 一般配合力效应值较高; 30 至 60 日龄 JD 组特殊配合力较高, 80 至 105 日龄 WD、JC、CW 和 DJ 组特殊配合力较高。综合分析认为 C(♀) × D(♂)、D(♀) × J(♂)、J(♀) × C(♂) 和 J(♀) × D(♂) 杂交组合具有良好的生长和较高特殊配合力。

**关键词:** 刺参; 双列杂交; 杂种优势; 配合力

**中图分类号:** S 917 **文献标志码:** A

刺参(*Apostichopus japonicus*) 隶属于棘皮动物门(Echinodermata)、海参纲(Holothuroidea)、楯手目(Aspidochirota)、刺参科(Stichopodidae), 主要分布在我国辽宁、山东、河北等地, 朝鲜半岛、日本和俄罗斯远东沿海, 被誉为我国的“海产八珍”之首, 具有很高的经济和药用价值<sup>[1-5]</sup>。近年来, 随着人们生活水平的提高, 刺参的市场需求不断增加, 这也带动刺参养殖业的迅速发展, 形成了具有地方特色的养殖产业和新的海洋经济增长点。其中山东是我国北方刺参的重要产地之一, 占全国刺参养殖总产量的七成以上, 并迅速成为山东省重要海水养殖产业<sup>[6-7]</sup>。

然而, 随着生产规模的扩大、捕捞力度的增加, 我国野生刺参资源量大幅减少、苗种质量严重下降, 主要表现为生长缓慢、个体差异大、病害频发、成活率低等<sup>[8]</sup>, 严重制约了刺参养殖业的健康发展。因此, 改良刺参种质、培育优良新品种, 对我国刺参增养殖业的持续健康发展愈显重

要<sup>[9-10]</sup>。杂交育种是动植物改良遗传性状、培育优良品种的重要手段之一, 利用杂种优势可获得产量高和抗逆性强的杂交后代<sup>[11]</sup>。杂交育种在水产动物育种中广泛应用, 如在鱼类<sup>[12-14]</sup>、扇贝<sup>[15-19]</sup>、牡蛎<sup>[20-21]</sup>、海胆<sup>[22-23]</sup> 和对虾<sup>[24-26]</sup> 等均有报道。在刺参育种中杂交也得到应用, 将中国刺参与日本红刺参杂交, 杂交子一代的各生长性状在幼虫期和幼参期均表现出明显的杂种优势, 有较高的杂种优势率<sup>[27-28]</sup>。

本研究选用不同地理群体的中国刺参, 采用完全双列杂交建立选育杂交和自交群体, 比较不同杂交组合与对照组在幼参期的生长状况, 探究其一般配合力和特殊配合力, 以及杂交组合的杂种优势, 进而为刺参的杂交育种提供技术参数, 为刺参杂交的生产实践提供基础资料。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料

4 个不同地理群体刺参分别来自长岛、威海、

收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-08-04

基金项目: 烟台市科技发展计划项目(2012GGA1320121011105548)

作者简介: 郑言鑫(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海水经济动物遗传育种及养殖技术。E-mail: zhengyanxin1989@163.com

通信作者: 于涛, E-mail: cdzzyut@163.com

大连及胶南,所选群体均为当地野生群体。每个群体采集 1 000 个野生雌雄个体作亲本,实验在中国水产科学院长岛增殖实验站内进行。

### 1.2 实验设计

4 个不同地理群体刺参构建 4 × 4 完全双列杂交家系共计 16 组(表 1),每组三个平行,每组选用雌雄亲本各 200 头进行群体繁殖。

表 1 刺参 4 × 4 双列杂交试验设计  
Tab.1 Design of diallel cross for *Apostichopus japonicus*

亲本 Parent	长岛♀(C) Changdao	威海♀(W) Weihai	大连♀(D) Dalian	胶南♀(J) Jiaonan
长岛♂(C) Changdao	CC	WC	DC	JC
威海♂(W) Weihai	CW	WW	DW	JW
大连♂(D) Dalian	CD	WD	DD	JD
胶南♂(J) Jiaonan	CJ	WJ	DJ	JJ

### 1.3 苗种培育

选择自然海区重量为 300 g 以上体格健壮的刺参作为亲体促熟,室内自然水温(4.2 ℃)暂养。为保证各群体亲本性腺的同步发育,将各地理群体同时移入车间暂养 10 d,培育池规格为 10 m × 3 m × 1 m。暂养期间每天换水、投饵,投喂少量藻粉和过滤海泥,每 5 天倒池一次。待种参稳定后,每天升温 0.5 ℃,换水 2/3 体积,根据种参摄食情况增减饵料,及时挑拣死亡种参,每 5 天倒池一次,定期解剖种参观察性腺发育情况。升至 12 ℃ 和 16 ℃ 时恒温培育 3 d 后继续升温,升至 18 ℃ 时恒温培育,解剖观察性腺发育情况,等待产卵排精。性腺发育成熟后,升温刺激(20.5 ℃)种参排放。

种参排放时及时挑选出各群体的雌雄亲参,雌雄各 200 头,按表 1 交配组合进行人工授精,水泥池内 22 ℃ 孵化。幼参体长达 4 mm 时开始大量附着,更换波纹板,调整密度。每天换水 1/2、投喂藻粉和过滤海泥,根据幼参摄食情况增减饵料,及时挑拣死亡幼参。每 5 天倒池一次,定期更换波纹板调整培育密度。

### 1.4 取样及数据分析

在幼参培育阶段,第 30、60、80、105 天,每个平行随机取幼参 30 头,测量并记录刺参体长,测量方法参照魏杰等<sup>[29]</sup>测量方法,将刺参停食 24 ~

48 h,用浓度为 0.5 ~ 0.6 mol / L 的硫酸镁海水溶液在常温下浸泡活体刺参 1.5 ~ 2 h,解剖镜下测量活体刺参体长。将测量后的刺参样品放入自然海水中,在微流水 5 ~ 8 h,即可正常运动、摄食。

参照孔令锋<sup>[20]</sup>的计算方法,计算杂交子代各性状的杂种优势率( $H$ , Heterosis),公式为:

$$H(\%) = (F_1 - P) / P \times 100 \quad (1)$$

式中: $H$ 为杂种优势率; $F_1$ 为杂交子代性状的平均值; $P$ 为两自交组性状的平均值。

参照黄远樟、刘来福<sup>[29-30]</sup>的计算方法,计算一般配合力及特殊配合力:

$$\text{一般配合力: } GCA_i = x_i - \bar{X}_{**} \quad (2)$$

式中: $GCA_i$ 表示  $i$  亲本的一般配合力; $x_i$  表示  $i$  亲本所配组合的平均产量; $\bar{X}_{**}$  表示所有组合的总平均产量。

$$\text{特殊配合力: } SCA_{ij} = x_{ij} - \bar{X}_{**} - GCA_i - GCA_j \quad (3)$$

式中: $SCA_{ij}$ 表示  $i$  亲本和  $j$  亲本交配组合的特殊配合力; $x_i$  表示  $i$  亲本交配组合的平均产量; $x_{ij}$  表示  $i$  亲本和  $j$  亲本所配组合的产量; $\bar{X}_{**}$  为所有组合的总平均产量; $GCA_i$  表示  $i$  亲本的一般配合力; $GCA_j$  表示  $j$  亲本的一般配合力。

用 EXCEL 对各实验数据进行整理,采用 SPSS 19.0 统计分析软件进行方差分析与比较。

## 2 结果

### 2.1 各组生长状况

各实验幼参体长变化如表 2 所示,不同阶段各组生长各不相同。30 d, JD > DJ > JC > WJ 组,幼参体长均在 3.9 mm 以上,大于总体平均值(3.82 mm),而 WW < CW 组,幼参体长均小于 3.7 mm,小于总体平均值(3.82 mm),JD 组显著高于 WW 组和 CW 组( $P < 0.05$ ),DJ 组显著高于 WW 组( $P < 0.05$ );60 d, CJ > WW > WJ > JD > JW > CD > JC 组,幼参体长均在 5.30 mm 以上,大于总体平均值(5.29 mm),而 WD < DD < DW 组,幼参体长均小于 5.20 mm,小于总体平均值(5.29 mm),DW 组显著低于 CJ 组、WW 组、WJ 组和 JD 组( $P < 0.05$ );80 d, CD > WC > WD > CW 组,幼参体长均在 7.45 mm 以上,大于总体平均值(7.40 mm),而 DD < JJ 组,幼参体长均小于 7.20 mm,小于总体平均值(7.40 mm),CD 组、

WC 组、WD 组和 CW 组显著高于 DD 组和 JJ 组 ( $P < 0.05$ ); 105 d, DJ > WD > JD > JC 组, 幼参体长均在 10.60 mm 以上, 大于总体平均值 (10.30 mm), 而 CC < WW < CJ 组, 幼参体长均小于 10.00 mm, 小于总体平均值 (10.30 mm), CC 组

显著低于其他各组 ( $P < 0.05$ ), DJ 组、WD 组 JD 组和 JC 组显著高于 CC 组、WW 组、CJ 组和 JJ 组 ( $P < 0.05$ )。可见, 不同组合幼参生长速度各不相同, 随着时间推移差异明显。

表 2 各实验组幼参的体长的变化  
Tab.2 The body length of different groups

组合 Groups	30 d	60 d	80 d	105 d
CC	3.76 ± 0.41 <sup>abc</sup>	5.20 ± 0.35 <sup>ab</sup>	7.35 ± 0.33 <sup>abc</sup>	9.18 ± 0.51 <sup>a</sup>
CD	3.81 ± 0.52 <sup>abc</sup>	5.35 ± 0.37 <sup>ab</sup>	7.57 ± 0.28 <sup>c</sup>	10.03 ± 0.46 <sup>bcd</sup>
CW	3.68 ± 0.51 <sup>ab</sup>	5.30 ± 0.33 <sup>ab</sup>	7.48 ± 0.29 <sup>c</sup>	10.15 ± 0.54 <sup>bcd</sup>
CJ	3.85 ± 0.41 <sup>abc</sup>	5.41 ± 0.25 <sup>b</sup>	7.44 ± 0.30 <sup>bc</sup>	9.88 ± 0.67 <sup>bc</sup>
WW	3.63 ± 0.43 <sup>a</sup>	5.38 ± 0.22 <sup>b</sup>	7.45 ± 0.31 <sup>c</sup>	9.79 ± 0.71 <sup>b</sup>
WC	3.81 ± 0.46 <sup>abc</sup>	5.23 ± 0.31 <sup>ab</sup>	7.55 ± 0.24 <sup>c</sup>	10.29 ± 0.58 <sup>cdef</sup>
WD	3.71 ± 0.36 <sup>ab</sup>	5.12 ± 0.31 <sup>a</sup>	7.49 ± 0.30 <sup>c</sup>	10.70 ± 0.54 <sup>fg</sup>
WJ	3.91 ± 0.32 <sup>abc</sup>	5.37 ± 0.31 <sup>b</sup>	7.38 ± 0.56 <sup>abc</sup>	10.47 ± 0.52 <sup>defg</sup>
DD	3.83 ± 0.41 <sup>abc</sup>	5.17 ± 0.31 <sup>ab</sup>	7.19 ± 0.37 <sup>ab</sup>	10.29 ± 0.99 <sup>cdef</sup>
DC	3.79 ± 0.51 <sup>abc</sup>	5.28 ± 0.27 <sup>ab</sup>	7.45 ± 0.31 <sup>c</sup>	10.55 ± 0.63 <sup>efg</sup>
DW	3.72 ± 0.48 <sup>ab</sup>	5.19 ± 0.32 <sup>ab</sup>	7.35 ± 0.36 <sup>abc</sup>	10.58 ± 0.56 <sup>efg</sup>
DJ	4.05 ± 0.32 <sup>bc</sup>	5.26 ± 0.30 <sup>ab</sup>	7.35 ± 0.23 <sup>abc</sup>	10.86 ± 0.56 <sup>g</sup>
JJ	3.75 ± 0.36 <sup>abc</sup>	5.27 ± 0.32 <sup>ab</sup>	7.18 ± 0.29 <sup>a</sup>	10.14 ± 0.60 <sup>bcd</sup>
JC	3.98 ± 0.28 <sup>abc</sup>	5.33 ± 0.30 <sup>ab</sup>	7.43 ± 0.20 <sup>abc</sup>	10.62 ± 0.59 <sup>fg</sup>
JW	3.80 ± 0.49 <sup>abc</sup>	5.35 ± 0.36 <sup>ab</sup>	7.37 ± 0.31 <sup>abc</sup>	10.57 ± 0.46 <sup>efg</sup>
JD	4.11 ± 0.43 <sup>c</sup>	5.37 ± 0.36 <sup>b</sup>	7.43 ± 0.35 <sup>abc</sup>	10.67 ± 0.51 <sup>fg</sup>

注: 在同一列数据右上角不同上标字母表示有显著差异 ( $P < 0.05$ )

Note: Date in the same column with different superscripts indicate significant ( $P < 0.05$ )

## 2.2 各杂交组合的杂种优势

各杂交组合幼参体长的杂种优势率变化如表 3 所示, 30 d 时 JD 组杂种优势率最高 (为 9.83%), 60 d 时 DC 组和 CJ 组杂种优势率较高 (分别为 3.15% 和 3.13%), 80 d 时 CD 组杂种优势率最高 (4.12%), 105 d 时 JC 组杂种优势率最高 (9.69%)。不同组合在同一生长阶段杂种优势率各不相同, 同一组合在不同生长阶段杂种优势率也出现差别, 有些生长阶段表现为正值, 有些生长阶段则为负值。CD 组、JC 组和 JD 组杂种优势率始终为正值, 而 CJ 组、WC 组、WJ 组、DC 组和 DJ 组杂种优势率在某一生长阶段为负值, WD 组和 DW 组杂种优势率只有一个正值出现, 而 CW 组杂种优势率则始终为负值。

## 2.3 一般配合力和特殊配合力

本实验设计采用完全双列杂交, 共有 ( $n^2$ ,  $n=4$ ) 16 个组合。因此, 通过本实验可以同时估算父本和母本一般配合力 (加性遗传) 效应和子代特殊配合力 (非加性遗传) 效应。不同群体主要生长性状的父母本一般配合力如表 4 所示, 各

群体不同阶段一般配合力效应表现不同, 前期各群体一般配合力较低, 后期一般配合力升高, 但仍有些表现出负值。大连群体父母本一般配合力升高, 且母本升高较父本快; 长岛群体父母本一般配合力下降, 父本下降较为明显; 威海群体的一般配合力一直在较低水平; 胶南群体母本一般配合力升高, 而父本的一般配合力降低。105 日龄时, 母本一般配合力效应值较高的为大连群体 ( $GCA D \text{♀} = 0.28$ ) 和胶南群体 ( $GCA J \text{♀} = 0.21$ ), 这两个群体父本的一般配合力也较高。

不同交配组合在不同生长阶段的特殊配合力也不同 (表 5)。在 30 日龄时, 体长平均值最高的杂交组合为 JD, 母本的  $GCA$  是最高的 ( $GCA J \text{♀} = 0.08$ ), 组合的特殊配合力也是最高的 ( $SCA JD = 0.23$ )。在 60 日龄时, 体长平均值最大的杂交组合为 CD, 其母本  $GCA$  相对其他组较大 ( $GCA C \text{♀} = 0.04$ ), 但是其  $SCA$  不是最大的,  $SCA$  效应值最大的为 JD。在 80 日龄时, 体长平均值最大的杂交组合为 CD, 其父母本的  $GCA$  ( $GCA C \text{♀} = 0.04$ ,  $GCA D \text{♂} = 0.00$ ) 均不是最

大值,但是其  $SCA$  ( $SCA\ CD = 0.12$ ) 为最大值,且与  $CJ$ 、 $DC$  组合差别不大。在 105 日龄,体长平均值最高的杂交组合为  $DJ$ ,其母本  $GCA$  是最高的 ( $GCA\ D\ \text{♀} = 0.28$ ),但其  $SCA$  不是最高的, $WD$  组合的  $SCA$  效应值最高 ( $SCA\ WD = 0.28$ ),但与  $JC$ 、 $CW$ 、 $DJ$  差别不大。可见,在不同生长阶段一般配合力(加性效应)和特殊配合力(非加性效应)发挥着不同的作用。

表 3 各杂交组合幼参体长的杂种优势率

Tab.3 Heterosis for body length of different groups %

组合 Groups	30 d	60 d	80 d	105 d
CD	0.43	3.18	4.12	3.05
CW	-3.18	-0.29	-0.46	-1.36
CJ	4.07	3.13	0.43	-4.62
WC	3.12	-1.16	2.03	8.55
WD	-2.61	-3.26	-0.94	5.28
WJ	5.71	3.15	-1.33	0.42
DC	-0.19	1.85	2.49	8.33
DW	-2.09	-2.29	-2.12	2.82
DJ	9.39	0.21	-0.84	4.81
JC	6.02	1.68	2.29	9.96
JW	-2.45	0.29	-1.69	2.29
JD	9.83	0.80	0.13	3.05

表 4 不同群体体长性状的父母本一般配合力效应值

Tab.4 General combining ability of body length in diallel cross groups

	30 d	60 d	80 d	105 d
$GCA\ C\ \text{♀}$	-0.05	0.04	0.04	-0.50
$GCA\ D\ \text{♀}$	0.02	-0.06	-0.07	0.28
$GCA\ W\ \text{♀}$	-0.06	0.00	0.06	0.02
$GCA\ J\ \text{♀}$	0.08	0.02	-0.04	0.21
$GCA\ C\ \text{♂}$	0.01	-0.02	0.03	-0.14
$GCA\ D\ \text{♂}$	-0.04	-0.04	0.00	0.11
$GCA\ W\ \text{♂}$	-0.04	0.04	0.02	-0.03
$GCA\ J\ \text{♂}$	0.06	0.02	-0.05	0.07

### 3 讨论

杂交是动植物种质改良的重要手段之一,通过杂交使后代获得明显的杂种优势。而杂种优势是指杂种子一代在生长力、繁殖力、产量、品质等性状上优于双亲的一种复杂的生物学现象,且双亲的差异越大杂种优势越强,反之越弱<sup>[20]</sup>。种内杂交是杂交育种的一种,且其不易产生种质污染,有利于保护经济种类的种质资源。

本研究选用 4 个不同地理群体的中国刺参,采用完全双列杂交得到杂交和自交后代,比较交配组合幼参期的生长状况,结果表明,不同组合幼参生长速度各不相同,随着时间推移生长差异逐渐明显。杂种优势率方面,不同杂交组合在同一生长阶段各不相同,同一组合在不同生长阶段也有差别, $CD$  组、 $JC$  组和  $JD$  组始终为正值,说明其杂交后代有一定的杂种优势,且  $JC$  组的杂种优势率始终较高;而  $CW$  组的杂种优势率始终为负值,说明杂交后代没有表现出杂种优势;其他组既有正值也有负值,但是随着时间的推移不同杂交组合的杂种优势率为正值的组合增多,105 日龄仅有  $CW$  组表现为负值,表明后代杂种优势随着时间的推移越来越明显。相同的结果在中国刺参和日本红刺参杂交实验中也得到证实,胡美燕等研究中国刺参与日本红刺参杂交子一代的早期生长比较,结果发现,幼虫期 8 日龄时杂交组合和自交组合体长总体上差异不显著,幼参期 160 日龄时其中一个杂交组合体长显著高于其他组合,且体长的杂种优势率在 160 日龄均为正值<sup>[27]</sup>;孙秀俊等研究了中国刺参( $\text{♂}$ ) × 日本红刺参( $\text{♀}$ ) 杂交子代的胚胎、幼体发育及幼参生长性状,结果发现随着时间增加自交苗和杂交苗的个体间体质量差异逐渐增大<sup>[28]</sup>。在其他水产动物育种过程中,不同地理群体间杂交也表现出一定的杂种优势,如不同地理群体的长牡蛎杂交,后代在生长性状上有一定的杂种优势<sup>[20-21]</sup>;不同种群海胆杂交,杂交后代在 12 月龄时平均体质量表现出明显的杂种优势<sup>[22]</sup>。

表 5 不同交配组合体长性状的特殊配合力效应值

Tab.5 Specific combining ability of body length in diallel cross groups

	30 d	60 d	80 d	105 d
$SCA\ CD$	0.07	0.06	0.12	0.13
$SCA\ CW$	-0.06	-0.02	0.01	0.25
$SCA\ CJ$	-0.16	0.00	0.09	0.14
$SCA\ WC$	0.04	-0.01	0.06	0.12
$SCA\ WD$	-0.02	-0.11	0.02	0.28
$SCA\ WJ$	0.08	0.07	-0.03	0.09
$SCA\ DC$	-0.07	0.08	0.09	0.11
$SCA\ DW$	-0.09	-0.07	-0.01	0.04
$SCA\ DJ$	0.14	0.00	0.07	0.22
$SCA\ JC$	0.06	0.04	0.04	0.26
$SCA\ JW$	-0.07	-0.02	-0.01	0.10
$SCA\ JD$	0.23	0.11	0.07	0.06

配合力是衡量杂交组合中性状配合能力的重要指标,一般配合力主要是基因的加性效应,而加性效应更易稳定地遗传;而特殊配合力则是双亲杂交后通过互作表现出的基因的显性、超显性和上位效应,即非加性效应<sup>[31-32]</sup>。测定杂交后代的配合力效应值,在较高的一般配合力基础上,选择特殊配合力高的杂交组合,这对亲本选择和组合设计具有重要的指导意义,能够更好地促进杂交选育工作的开展<sup>[33]</sup>。本研究选用4个不同地理群体的中国刺参,大连和胶南群体作为母本一般配合力效应值较高,大连群体作为母本一般配合力效应值亦较高;而特殊配合力方面,前期JD组合的特殊配合力较高,后期WD、JC、CW、DJ组合特殊配合力较高,综合分析CD、DJ、JC、JD组合有较高特殊配合力。已有研究表明,某一性状亲本的一般配合力与杂交组合的特殊配合力间没有显著相关关系,这为选育一般配合力和特殊配合力高的强优势组合提供了可能<sup>[34]</sup>。

本研究选用4个不同地理群体的中国刺参,采用完全双列杂交得到杂交和自交后代,通过分析后代生长状况、杂种优势及配合力,确定了不同地理群体之间的优势杂交组合,为刺参的良种选育和养殖推广提供了重要参考资料。

## 参考文献:

- [1] 廖玉麟. 中国动物志: 棘皮动物门, 海参纲[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] 李丹彤, 常亚青, 陈炜, 等. 獐子岛野生刺参体壁营养成分的分析[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(3): 278-282.
- [3] 苏秀榕, 娄永江, 常亚青, 等. 海参的营养成分及海参多糖的抗肿瘤活性的研究[J]. 营养学报, 2003, 25(2): 181-182.
- [4] 樊绘曾. 海参: 海中人参-关于海参及其成分保健医疗功能的研究与开发[J]. 中国海洋药物, 2001, 20(4): 37-44.
- [5] HATAKEYAMA T, SATO T, TAIRA E, et al. Characterization of the interaction of hemolytic lectin CEL-III from the marine invertebrate, *Cucumaria echinata*, with artificial lipid membranes: involvement of neutral sphingoglycolipids in the pore-forming process [J]. The Journal of Biochemistry, 1999, 125(2): 277-284.
- [6] 隋锡林. 刺参人工育苗及养殖技术的进步与展望[J]. 水产科学, 2004, 23(9): 29-31.
- [7] 李成林, 宋爱环, 胡炜, 等. 山东省刺参养殖产业现状分析与可持续发展对策[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 126-133.
- [8] 孙慧玲. 刺参苗种繁育研究与产业现状以及存在问题[C]//中国海洋湖沼学会. "全球变化下的海洋与湖沼生态安全"学术交流会议论文集. 南京: 中国海洋湖沼学会, 2014: 1.
- [9] 常亚青, 隋锡林, 李俊. 刺参增养殖业现状、存在问题与展望[J]. 水产科学, 2006, 25(4): 198-201.
- [10] 邹积波, 高广斌, 姜洪亮, 等. 分析刺参养殖发病原因、研讨对策, 走可持续发展之路[J]. 水产科学, 2006, 25(1): 53-54.
- [11] 范兆廷. 水产动物育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 87-88.
- [12] 李炎璐, 陈超, 翟发明, 等. 鱼类杂交育种技术及其在石斑鱼类中的应用[J]. 海洋渔业, 2012, 34(1): 102-109.
- [13] LI C L, SONG A H, HU W, et al. Status analysis and sustainable development strategy of sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka aquaculture industry in Shandong Province [J]. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31(4): 126-133.
- [14] SUN H L. The seedling breeding research and industry status quo and existing problems of *Apostichopus japonicus* [C]// Chinese Society of Oceanology and Limnology. "The Ocean and Lake Ecological Security of Global Change" Abstract Set of Academic Exchange. Nanjing: Chinese Society for Oceanology and Limnology, 2014: 1.
- [15] CHANG Y Q, SUI X L, LI J. The current situation, problem and prospect on the *Apostichopus japonicus* aquaculture [J]. Fisheries Science, 2006, 25(4): 198-201.
- [16] ZOU J B, GAO G B, JIANG H L, et al. Causes and prevention of sea cucumber diseases: sustainable aquaculture [J]. Fisheries Science, 2006, 25(1): 53-54.
- [17] FAN Z T. Breeding of aquatic animal [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 87-88.
- [18] LI Y L, CHEN C, ZHAI J M, et al. Fish hybridization and its application in grouper [J]. Marine Fisheries, 2012, 34(1): 102-109.

- [13] 李炎璐, 陈超, 王清印, 等. 云纹石斑鱼(*E. moara*) (♀) × 七带石斑鱼(*E. septemfasciatus*) (♂) 杂交 F1 生长特征与其亲本子代的比较[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(3): 42-49.  
LI Y L, CHEN C, WANG Q Y, et al. Comparative analysis of growth characteristics between hybrid F1 by *Epinephelus moara* (♀) × *Epinephelus septemfasciatus* (♂) and the offspring of their parents[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(3): 42-49.
- [14] BRYDEN C A, HEATH J W, HEATH D D. Performance and heterosis in farmed and wild Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) hybrid and purebred crosses [J]. Aquaculture, 2004, 235(1/4): 249-261.
- [15] 于涛. 栉孔扇贝(♀) × 虾夷扇贝(♂) 杂种优势遗传机理的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.  
YU T. Studies on the heterosis mechanism of scallop *Chlamys farreri* (♀) × *Patinopecten yesoensis* (♂) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2011.
- [16] BEAUMONT A R, BUDD M D. Effects of self-fertilisation and other factors on the early development of the scallop *Pecten maximus* [J]. Marine Biology, 1983, 76(3): 285-289.
- [17] 常亚青, 刘小林, 相建海, 等. 栉孔扇贝不同种群杂交效果Ⅲ. 中国种群与俄罗斯种群及其杂种 1~2 龄的生长发育[J]. 海洋学报, 2006, 28(2): 114-120.  
CHANG Y Q, LIU X L, XIANG J H, et al. Hybridization effects of the different geographic population of *Chlamys farreri* Ⅲ. The yearlong (1-2 years old) growth and development of Chinese population and Russian population and their reciprocal crosses [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(2): 114-120.
- [18] 刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 栉孔扇贝中国种群与日本种群杂交一代的中期生长发育[J]. 水产学报, 2003, 27(3): 193-199.  
LIU X L, CHANG Y Q, XIANG J H, et al. The medium-term growth and development of hybrid between Chinese and Japanese populations of *Chlamys farreri* [J]. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(3): 193-199.
- [19] 郑怀平, 张国范, 刘晓, 等. 海湾扇贝杂交家系与自交家系生长和存活比较[J]. 水产学报, 2004, 28(3): 267-272.  
ZHENG H P, ZHANG G F, LIU X, et al. Comparison of growth and survival between the self-fertilized and hybridized families in *Argopecten irradians irradians* [J]. Journal of Fisheries of China, 2004, 28(3): 267-272.
- [20] 孔令锋, 滕爽爽, 李琪. 长牡蛎中国群体与日本群体杂交子一代的生长和存活比较[J]. 海洋科学, 2013, 37(8): 78-84.  
KONG L F, TENG S S, LI Q. Growth and survival of the first generation of Hybrid between Chinese and Japanese populations of Pacific oyster *Crassostrea gigas* [J]. Marine Sciences, 2013, 37(8): 78-84.
- [21] 王卫军, 李琪, 杨建敏, 等. 长牡蛎(*Crassostrea gigas*) 三个选育群体完全双列杂交后代生长性状分析[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 628-635.  
WANG W J, LI Q, YANG J M, et al. Analysis of growth trait of pacific oyster *Crassostrea Gigas* using complete diallel cross from three selective breeding strains [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(3): 628-635.
- [22] RAHMAN M A, UEHARA T, LAWRENCE J M. Growth and heterosis of hybrids of two closely related species of Pacific sea urchins (*Genus Echinometra*) in Okinawa [J]. Aquaculture, 2005, 245(1/4): 121-133.
- [23] DING J, CHANG Y Q, WANG C H, et al. Evaluation of the growth and heterosis of hybrids among three commercially important sea urchins in China; *Strongylocentrotus nudus*, *S. intermedius* and *Anthocidaris crassispina* [J]. Aquaculture, 2007, 272(1/4): 273-280.
- [24] BENZIE J A H, KENWAY M, BALLMENT E, et al. Interspecific hybridization of the tiger prawns *Penaeus monodon* and *Penaeus esculentus* [J]. Aquaculture, 1995, 133(2): 103-111.
- [25] TIAN Y, KONG J, YANG C H. Comparative growth and viability of hybrids between two populations of Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(19): 2369-2374.
- [26] 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.  
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.
- [27] 胡美燕, 李琪, 孔令锋, 等. 中国刺参与日本红刺参杂交子一代的早期生长比较[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(s): 375-380.  
HU M Y, LI Q, KONG L F, et al. Comparative study on juvenile growth of hybrids between Chinese and Japanese stocks of sea cucumber (*Stichopus japonicus*) [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(s): 375-380.
- [28] 孙秀俊, 李琪, 孔令锋, 等. 中国刺参(♂) × 日本红刺参(♀) 杂交子代的胚胎、幼体发育及幼参生长性状的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(4): 26-32.  
SUN X J, LI Q, KONG L F, et al. Embryonic, larval development and juvenile growth in hybrid between green (♂) and red (♀) sea cucumber *Apostichopus japonicus* [J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(4): 26-32.
- [29] 魏杰, 常亚青, 聂竹兰, 等. 准确测量活体刺参体长的方法: 中国, CN100466970C [P]. 2009-03-11.  
WEI J, CHANG Y Q, NIE Z L, et al. Method for accurately measuring body length of living *stichopus japonicus*; China, CN100466970C [P]. 2009-03-11.
- [30] 黄远樟, 刘来福. 作物数量遗传学基础六、配合力: 不完全双列杂交[J]. 遗传, 1980, 2(2): 43-46.  
HUANG Y Z, LIU L F. The basis of quantitative genetics in

- crops VI. combining ability: incomplete diallel cross [J]. *Hereditas* (Beijing), 1980, 2(2): 43-46.
- [31] 刘来福,毛盛贤,黄远樟. 作物数量遗传[M]. 北京: 农业出版社, 1984: 206-284.  
LIU L F, MAO S X, HUANG Y Z. Crop quantity genetic [M]. Beijing: Agriculture Press, 1984: 206-284.
- [32] 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.
- [33] 盛志廉,陈瑶生. 数量遗传学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 110.  
SHENG Z L, CHEN Y S. Quantity genetics [M]. Beijing: Science Press, 1999: 110.
- [34] 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.

## Heterosis and combining ability analysis of diallel cross from four different *Apostichopus japonicas* populations

ZHENG Yanxin<sup>1</sup>, ZHAO Chunnuan<sup>1</sup>, YU Tao<sup>1</sup>, CAI Zhongqiang<sup>1</sup>, LIN Jianguo<sup>1</sup>, QIN Bo<sup>2</sup>

(1. Changdao Enhancement and Experiment Station, Chinese Academy of Fishery Science, Changdao 265800, Shandong, China; 2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To investigate heterosis and combining ability of the diallel crosses of different *Apostichopus japonicas* populations which were from Changdao (C), Dalian (D), Weihai (W) and Jiaonan (J), the experiment established 16 groups of 4 × 4 diallel crosses of different *Apostichopus japonicas* populations. The larval survival growth performance of 30 day (d), 60 d, 80 d and 105 d were obtained, and the heterosis, the general combining ability and the specific combining ability were compared between the different groups. The results showed that: The body length was different in different groups, and there was no significance between hybrid and selfing groups of 30 d, 60 d and 80 d. The body length of the hybrid groups which were groups of D (♀) × J (♂) (DJ), WD, JD and JC of 105 d was significantly greater than the combinations which were groups of CC, WW and JJ. The heterosis was different in different hybrid groups and different stages. The groups of CD, JC and JD were always positive, and the group of CW was always negative. The number of groups which were positive increased with growth of *A. japonicas*, and the groups of JC of 105 d was 9.69% and highest. The general combining ability of D (♀), J (♀) and D (♂) was higher than others. The special combining ability of groups of JD was higher on 30 d and 60 d, the groups of CD, DJ, JC and JD were higher than other groups on 80 d and 105 d. It can be concluded that the hybrid combinations of C (♀) × D (♂), D (♀) × J (♂), J (♀) × C (♂) and J (♀) × D (♂) of *Apostichopus japonicas* have better growth performance and higher special combining ability by comprehensive consideration.

**Key words:** *Apostichopus japonicas*; diallel cross; heterosis; combining ability