

文章编号: 1000-0615(2018)12-1880-09

DOI: 10.11964/jfc.20180111120

## 虾夷扇贝与风向标扇贝种间杂交的初步研究

刘桂龙<sup>1</sup>, 林基亮<sup>1</sup>, 杨斌<sup>2</sup>, 陈银<sup>1</sup>, 马斌<sup>3</sup>,  
魏振禄<sup>4</sup>, 张金盛<sup>5</sup>, 刘博<sup>1</sup>, 王春德<sup>1\*</sup>

- (1. 青岛农业大学, 山东 青岛 266109;
2. 青岛机场出入境检验检疫局, 山东 青岛 266108;
3. 青岛海弘达生物科技有限公司, 山东 青岛 266101;
4. 大连长海振禄水产有限公司, 辽宁 大连 116504;
5. 山东招远市夏甸镇农业技术推广站, 山东 烟台 265415)

**摘要:** 针对虾夷扇贝在养殖过程中出现的问题, 本研究以风向标扇贝和虾夷扇贝为亲本进行了种间杂交实验, 培育出了虾夷扇贝(♀)×风向标扇贝(♂)(PY♀×PC♂)及风向标扇贝(♀)×虾夷扇贝(♂)(PC♀×PY♂)两种杂交一代, 并对其早期发育及幼虫期和稚贝期生长进行了比较。结果显示, PY♀×PC♂杂交一代的受精率、孵化率和幼虫期的生长和存活率介于双亲之间, 而壳高和壳长的生长均高于双亲, 表现出显著的杂种优势; PC♀×PY♂杂交一代的受精率、孵化率、幼虫期生长和存活率均低于双亲, 表现为杂种劣势。在养殖第1年, PY♀×PC♂杂交一代的壳高、壳长、壳宽和体质量增长率均高于双亲, 杂种优势显著。研究表明, 卵子来源对后代的表现具有极其显著的影响, 以雌性虾夷扇贝与雄性风向标扇贝进行种间杂交从而改良虾夷扇贝种质是可行的。

**关键词:** 虾夷扇贝; 风向标扇贝; 种间杂交; 杂种优势

**中图分类号:** Q 321; S 968.3

**文献标志码:** A

虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)原产于日本和朝鲜, 自1982年引进我国以来已在山东、辽宁等北方沿海进行了人工养殖, 其个体大、营养丰富、味道鲜美, 有很高的市场价值。虾夷扇贝是一种大型冷水性贝类, 生存温度4~20℃, 最适水温12~18℃, 一般水温高于23℃时就会引起死亡<sup>[1]</sup>。近年来, 由于累代自交以及养殖环境的恶化对虾夷扇贝生长和存活产生了不利影响, 高死亡率事件时有发生, 给产业的发展带来了巨大阻碍, 因此养殖业亟需优良的品种来支持产业的可持续发展<sup>[2]</sup>。

杂交育种是培育新品种的一种常规方法, 具有操作简便, 能充分利用物种或种群间的优势性状互补等特点, 是改良遗传性状、培育优良品种的可靠途径。国内外对杂交育种技术的

研究已经开展多年, 起初主要运用于种植业和畜牧业。在水产动物中, 我国主要在淡水鱼类中进行杂交育种, 培育出一系列优良品种, 如湘鲫和盘锦一号杂交鲫等<sup>[3-4]</sup>。在贝类中较为成功的是以我国的皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)与日本的虾夷盘鲍(*H. gigantea discus*)进行杂交, 获得了优势明显的杂交后代, 大大推动了我国鲍养殖业的发展<sup>[5]</sup>。此外, 国内外学者对长牡蛎(*Crassostrea gigas*)<sup>[6-7]</sup>、马氏珠母贝(*Pinctada maxima*)<sup>[8]</sup>、紫贻贝(*Mytilus edulis*)<sup>[9-11]</sup>和文蛤(*Meretrix meretrix*)<sup>[12]</sup>等养殖品种均进行了种内或种间杂交育种研究。在扇贝中, 主要进行了不同地理种群间或亚种间的杂交研究<sup>[13-21]</sup>。近年来, 青岛农业大学王春德团队又进行了秘鲁紫扇贝(*Argopecten purpuratus*)与我国海湾扇贝(*A. irradians*)北

收稿日期: 2018-01-02 修回日期: 2018-04-25

资助项目: 农业部“九四八”项目(2015-z61); 山东省现代农业产业技术体系贝类创新团队项目(SDAIT-14)

通信作者: 王春德, E-mail: Chundewang2007@163.com

部亚种及南部亚种的种间杂交研究, 获得了个体大、生长快、抗逆性强的杂交子代, 显示出较大的杂种优势<sup>[22-23]</sup>。

风向标扇贝(*P. caurinus*)是原产于太平洋东北部, 分布于从阿拉斯加到加利福尼亚海域的一种冷水性大型扇贝, 温度适应范围较窄, 最大壳长可达到25 cm。风向标扇贝的壳宽较大、闭壳肌肥大、出肉率高且味道鲜美, 因此风向标扇贝加工产品在欧美深受欢迎, 是世界上公认的优良养殖种类之一。由于风向标扇贝和我国大规模养殖的虾夷扇贝同属于*Patinopecten*属, 因此可以利用风向标扇贝与虾夷扇贝进行种间杂交, 以对虾夷扇贝进行种质改良, 培育出一种个体大、生长快、适应性广的杂交新品种。Saunders等<sup>[24]</sup>曾在加拿大进行了这两种扇贝的种间杂交实验, 培育出一种杂交扇贝新品系——太平洋扇贝, 目前已在加拿大西海岸进行商业化养殖, 但我国尚未引进风向标扇贝或其杂交后代太平洋扇贝。为改良虾夷扇贝的种质, 青岛农业大学自2015年开始从加拿大引进风向标扇贝, 并将其与虾夷扇贝进行了种间杂交实验, 以期培育出遗传性状良好的杂交扇贝新品种。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

风向标扇贝种贝于2017年1月底采自加拿大英属哥伦比亚西北部沿岸, 采集后置于25 m<sup>3</sup>的水槽中连续流水培养约1周, 培育水温6~8 °C, 每天投喂单细胞藻类饵料。装运时, 将扇贝平放于泡沫箱中, 用泡沫材料压紧使其不能开口, 然后在泡沫材料上放置4个1 kg的冰袋, 压紧包装后空运到国内机场, 并尽快转运到育苗场中隔离暂养, 扇贝的离水时间约为28 h。风向标扇贝在养殖场的暂养温度保持在6~8 °C, 暂养期间每天全量换水1次, 每天分4次投喂单细胞藻类饵料, 暂养2周后的成活率约为81.6%。虾夷扇贝种贝为大连长海县海域的3龄养殖虾夷扇贝, 选择个体大、发育良好、活力旺盛的个体作为实验用种贝, 于2017年2月初与风向标扇贝同时纳入育苗室进行育肥促熟。实验用两种种贝的规格见表1。

### 1.2 实验方法

**亲贝育肥** 采用笼养方式, 将亲贝置于网笼中, 每笼5层, 每层2个, 将笼子分别捆绑在3m长的竹竿两端, 将竹竿横跨在暂养池的上方, 每池放4根竹竿, 笼子最上层保证在水面以下15 cm, 控制水温在8 °C左右, 每个暂养池放6个气石连续充气, 远离亲贝, 防止水流刺激引起流产。饵料以金藻(*Chrysophyta*)和硅藻(*Diatom*)为主, 日投饵量为 $5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$ 个细胞/mL, 分8~12次投喂, 前期每天早、晚各换水1次, 每次换水量为1/3水体; 后期每天倒池1次, 早晨换水1次。接近临产或水中有少量精卵时, 停止倒池换水, 采用吸底方式改善水质。经常检查亲贝性腺发育情况, 测量生殖腺指数, 当性腺指数达到20%左右, 性腺发育饱满时, 便可准备催产。

**产卵与幼虫培育** 提前将4个育苗池和2个玻璃钢槽中加入12 °C的海水, 将挑选出的性腺发育良好的虾夷扇贝和风向标扇贝亲贝用刷子清洗干净, 阴干刺激0.5 h后, 将雌贝和雄贝分别放入育苗池和玻璃钢槽中产卵、排精, 分别收集虾夷扇贝及风向标扇贝的纯净精液和卵子, 并对卵子进行显微镜镜检, 以确保所获得的卵子未受精。随后进行交叉授精, 获得虾夷扇贝(♀)×风向标扇贝(♂)(PY♀×PC♂)和风向标扇贝(♀)×虾夷扇贝(♂)(PC♀×PY♂)杂交群体以及虾夷扇贝(♀)×虾夷扇贝(♂)(PY♀×PY♂)和风向标扇贝(♀)×风向标扇贝(♂)(PC♀×PC♂)自交群体, 各群体组合分别置于不同育苗池中隔离培养。

**胚胎发育和幼虫生长** 精、卵混合受精后24 h内, 每隔10 min取样1 mL, 观察各组胚胎发育情况, 统计各组受精率、孵化率, 以排出极体为受精指标, 受精率即受精卵个数占总卵数的百分比。孵化率为D形幼虫数占受精卵的百分比。受精24 h后每30 min取样观察一次。每天早上搅池后, 从池子四角分别取样计数, 根据育苗池水体体积, 估算幼虫总数。当D形幼虫数量达到80%, 立即采用虹吸法选优, 按常规育苗方法<sup>[20]</sup>继续培养至30%幼虫出现眼点后, 投放附着基。期间每隔1 d对各组幼虫取样20个, 统计其壳长和壳高。

**养成期的生长** 幼虫附着变态后在育苗室内继续暂养1周后转移到海上继续保苗, 并及时根据生长情况更换保苗袋。平均壳高达到

表1 实验用种贝规格

Tab. 1 Sizes of the brood stocks

种类 species	性别 sex	壳长/cm shell length	壳高/cm shell height	壳宽/cm shell width	数量/个 number
虾夷扇贝 <i>P. yessoensis</i>	雌性(♀) female	11.13±0.10	10.90±0.46	2.73±0.41	20
	雄性(♂) male	10.75±0.26	10.50±0.43	2.67±0.11	10
风向标扇贝 <i>P. caurinus</i>	雌性(♀) female	16.21±0.66	15.93±0.71	3.38±0.09	20
	雄性(♂) male	15.92±0.67	15.45±0.50	3.35±0.13	11

25 mm时转移到养成笼中继续养殖, 养殖密度为每层30个。

**数据处理** 利用Excel和数据分析软件SPSS 17.0对实验所得数据进行统计分析, 分别计算出在幼虫发育阶段各组合受精率、孵化率以及幼虫壳高、壳长等生长指标的平均值和标准差, 并通过方差分析进行显著性检验,  $P < 0.05$ 为差异显著。

杂交子代的杂种优势率(H)参照Cruz等<sup>[18]</sup>的方法计算:

$$H(\%) = (\text{杂交子代平均值} - \text{双亲平均值}) / \text{双亲平均值} \times 100.$$

## 2 结果

### 2.1 各组合的受精率和孵化率

各组合的受精率均在90%以上, 孵化率均在80%以上, 但以虾夷扇贝为母本的杂交组和自交组的受精率和孵化率均高于以风向标扇贝为母本的杂交组和自交组( $P < 0.05$ )(表2)。

表2 各组合的受精率和孵化率(n=4)

	each cohort				%
	PY♀×PY♂	PC♀×PC♂	PY♀×PC♂	PC♀×PY♂	
受精率 fertilization rate	98.92±1.26 <sup>a</sup>	94.35±1.83 <sup>b</sup>	97.88±1.49 <sup>a</sup>	91.00±1.30 <sup>c</sup>	
孵化率 hatching rate	90.01±2.89 <sup>a</sup>	88.00±4.80 <sup>ab</sup>	93.33±1.26 <sup>a</sup>	80.32±8.86 <sup>b</sup>	

注: 同行参数上方字母不同代表有显著差异( $P < 0.05$ ), 下同  
Notes: different superscript letters in the same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ), the same below

### 2.2 各组合的胚胎发育时间

本实验以50%以上胚胎达到某一阶段的时间作为该组合发育达到该阶段的平均胚胎发育时间。结果发现, 在孵化水温为11.7 °C时, 虾夷扇贝自交组的发育时间最短, 与以虾夷扇贝为母

本的杂交组发育时间非常相近, 而以风向标扇贝为母本的自交组和杂交组的胚胎发育时间略长(表3)。

表3 虾夷扇贝和风向标扇贝杂交和自交组的胚胎发育时间

Tab. 3 Average embryonic development time of crossbred and inbred cohorts of *P. yessoensis* and *P. caurinus*

发育阶段 development stage	PY♀×PY♂	PC♀×PC♂	PY♀×PC♂	PC♀×PY♂
第一极体 first polar body	1 h	1 h 30 min	1 h 10 min	1 h 30 min
第二极体 second polar body	2 h 5 min	2 h 30 min	2 h 10 min	2 h 30 min
2细胞期 two-cells	3 h 5 min	3 h 40 min	3 h	3 h 5 min
4细胞期 four-cells	5 h 10 min	5 h 30 min	5 h 30 min	5 h 30 min
8细胞期 eight-cells	6 h 30 min	8 h	6 h 30 min	7 h 30 min
32细胞期 thirty-two-cells	14 h 5 min	18 h 5 min	14 h 30 min	20 h
囊胚期 blastocyst stage	16 h 10 min	22 h 30 min	16 h 30 min	24 h
原肠胚期 gastrul stage	27 h 30 min	32 h	28 h	33 h 30 min
担轮幼虫 trochophore	34 h 30 min	42 h 30 min	36 h	43 h
D形幼虫 D-larvae	66 h	70 h	68 h	72 h

### 2.3 幼虫期的生长

各组合幼虫的生长结果显示, 与其他3组相比, PY♀×PC♂杂交组生长最快, 其壳长日增长量为6.95 μm/d, 壳高日增长量为6.57 μm/d; 虾夷扇贝自交组和风向标扇贝自交组次之, 壳长日增长量分别为5.62和5.32 μm/d, 壳高日增长量分别为5.37和5.10 μm/d; PC♀×PY♂杂交组生长最慢, 壳长、壳高日增长量分别为4.05和3.80 μm/d, 且该组合在第11天时苗种大量死亡, 实验终止(表4, 表5, 图1, 图2)。

单因素方差分析表明, 以风向标扇贝为母本的杂交组与其余3之间组差异显著( $P < 0.05$ ), 其

表 4 虾夷扇贝与风向标扇贝自交和杂交各组的壳长生长(n=20)

Tab. 4 Growth in shell length of the crossbred and inbred cohorts between *P. yessoensis* and *P. caurinus*  $\mu\text{m}$

养殖天数/d breeding days	PY♀×PY♂	PY♀×PC♂	PC♀×PC♂	PC♀×PY♂
1	109.0±2.1 <sup>a</sup>	111.0±2.1 <sup>a</sup>	105.0±5.1 <sup>b</sup>	109.5±1.5 <sup>a</sup>
3	118.0±2.5 <sup>ab</sup>	125.0±2.3 <sup>a</sup>	114.0±3.1 <sup>c</sup>	118.5±2.4 <sup>ab</sup>
5	132.0±3.4 <sup>b</sup>	136.0±2.1 <sup>a</sup>	118.0±2.5 <sup>d</sup>	124.5±1.5 <sup>c</sup>
7	145.0±2.3 <sup>a</sup>	146.5±2.4 <sup>a</sup>	128.5±2.4 <sup>e</sup>	132.0±3.4 <sup>b</sup>
9	150.0±5.1 <sup>b</sup>	155.5±4.6 <sup>a</sup>	140.0±2.3 <sup>e</sup>	140.0±2.9 <sup>e</sup>
11	160.0±4.9 <sup>b</sup>	173.0±2.5 <sup>a</sup>	153.0±2.5 <sup>e</sup>	150.0±2.7 <sup>d</sup>
13	172.0±4.1 <sup>b</sup>	195.0±3.2 <sup>a</sup>	165.5±4.1 <sup>e</sup>	
15	185.0±4.6 <sup>b</sup>	209.0±7.9 <sup>a</sup>	177.0±2.5 <sup>e</sup>	
17	200.0±4.4 <sup>b</sup>	222.0±2.6 <sup>a</sup>	187.0±4.1 <sup>e</sup>	
19	210.0±7.4 <sup>b</sup>	236.0±8.2 <sup>a</sup>	200.0±4.6 <sup>e</sup>	
21	221.5±11.9 <sup>b</sup>	250.0±7.6 <sup>a</sup>	211.5±6.1 <sup>e</sup>	

表 5 虾夷扇贝与风向标扇贝自交和杂交各组的壳高生长(n=20)

Tab. 5 Growth in shell height of crossbred and inbred cohorts between *P. yessoensis* and *P. caurinus*  $\mu\text{m}$

养殖天数/d breeding days	PY♀×PY♂	PY♀×PC♂	PC♀×PC♂	PC♀×PY♂
1	87.5±2.6 <sup>a</sup>	88.5±2.4 <sup>a</sup>	82.5±2.6 <sup>b</sup>	87.0±3.4 <sup>a</sup>
3	95.5±2.8 <sup>a</sup>	98.0±3.4 <sup>a</sup>	91.5±3.3 <sup>b</sup>	98.5±3.3 <sup>a</sup>
5	109.0±3.1 <sup>a</sup>	110.0±3.2 <sup>a</sup>	100.5±6.3 <sup>b</sup>	102.0±2.5 <sup>b</sup>
7	119.0±2.1 <sup>b</sup>	119.0±3.8 <sup>a</sup>	109.5±5.8 <sup>b</sup>	110.0±5.6 <sup>b</sup>
9	124.0±2.1 <sup>b</sup>	129.0±3.1 <sup>a</sup>	122.9±3.2 <sup>a</sup>	115.0±2.3 <sup>c</sup>
11	135.0±3.2 <sup>b</sup>	147.0±2.5 <sup>a</sup>	131.0±2.1 <sup>e</sup>	125.0±4.0 <sup>d</sup>
13	147.0±2.5 <sup>b</sup>	170.0±2.3 <sup>a</sup>	140.0±4.0 <sup>e</sup>	
15	162.5±7.7 <sup>b</sup>	186.5±5.2 <sup>a</sup>	151.0±2.1 <sup>e</sup>	
17	175.0±4.0 <sup>b</sup>	198.5±2.4 <sup>a</sup>	161.0±4.5 <sup>e</sup>	
19	185.0±10.8 <sup>b</sup>	214.0±7.5 <sup>a</sup>	173.0±3.4 <sup>e</sup>	
21	195.0±13.0 <sup>b</sup>	220.0±9.2 <sup>a</sup>	184.5±7.4 <sup>e</sup>	

余各组间差异不显著( $P>0.05$ )。采用Duncan法进行多重比较结果显示, 随着发育时间的推移, 各组之间的生长存在显著差异( $P<0.05$ ), PY♀×PC♂杂交组生长最快, 出现眼点最早。

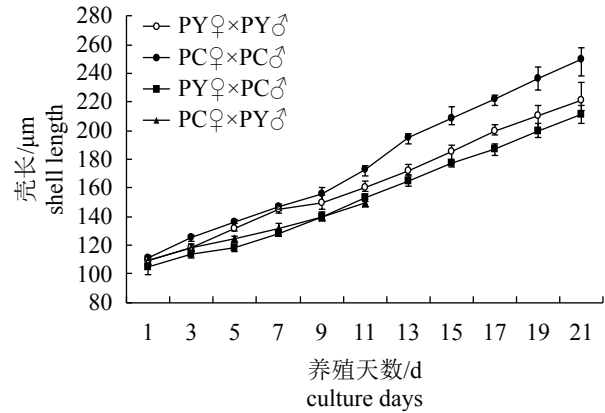


图 1 各组合幼虫期壳长的生长

Fig. 1 Growth in shell length of each cohort at larval stage

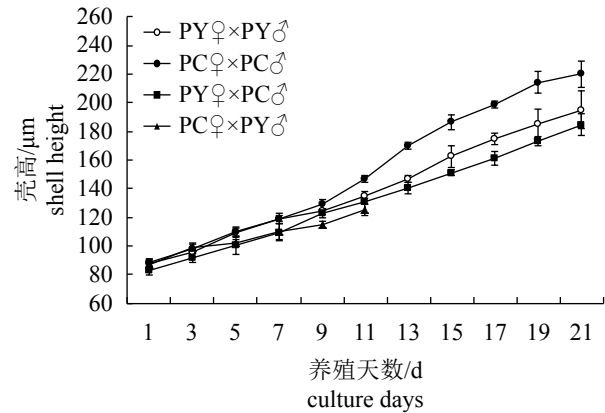


图 2 各组合幼虫期壳高的生长

Fig. 2 Growth in shell height of each cohort at larval stage

### 2.4 各组幼虫存活率比较

从自交和杂交各组的存活率结果可以看出, 虾夷扇贝自交组的存活率最高, 投附着基前存活率为80.69%, PY♀×PC♂杂交组和PC♀×PC♂自交组存活率分别为71.70%和70.67%。PC♀×PY♂杂交组幼虫因在第11天数量急剧下降而舍弃(图3)。

### 2.5 幼虫期生长杂种优势率

在幼虫期, PY♀×PC♂杂交一代的杂种优势率结果显示, 其壳长和壳高生长杂种优势率呈逐渐上升的趋势, 其中壳高生长杂种优势率在第13天最大(15.73%), 壳长生长的杂种优势率在第19天最大(19.55%)(表6)。

### 2.6 稚贝期的生长及其杂种优势率

比较PY♀×PC♂杂交一代及虾夷扇贝和风向标扇贝稚贝在养殖当年年底(2017年12月2日)的生长指标可以看出, PY♀×PC♂杂交一代的壳高、

壳长、壳宽和体质量显著高于虾夷扇贝和风向标扇贝, 其壳高、壳长、壳宽和体质量的杂种优势率分别为9.14%, 10.32%, 8.52%和26.02% (图4, 图5)。

表 6 虾夷扇贝♀×风向标扇贝♂杂交组幼虫阶段的杂种优势  
Tab. 6 Heterosis in growth of PY♀×PC♂ at larval stage

生长指标 body sizes	1 d	3 d	5 d	7 d	9 d	11 d	13 d	15 d	17 d	19 d	21 d
壳长 shell length	3.74	7.76	8.80	7.13	7.24	10.54	15.73	15.47	14.73	15.12	15.47
壳高 shell height	4.12	4.81	5.01	4.16	4.50	10.53	18.47	18.98	18.15	19.55	15.94

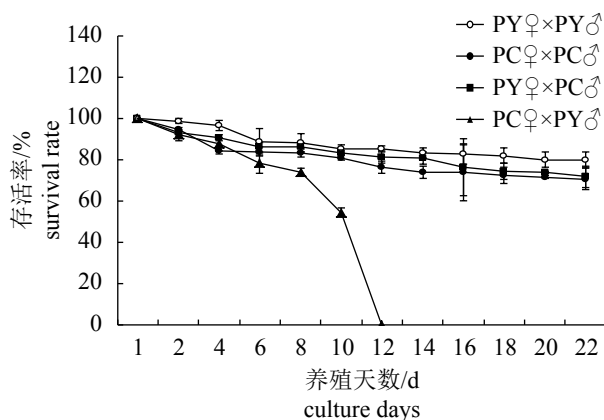


图 3 不同组合在幼虫阶段的存活率

Fig. 3 The survival rates of different cohorts at larval stage

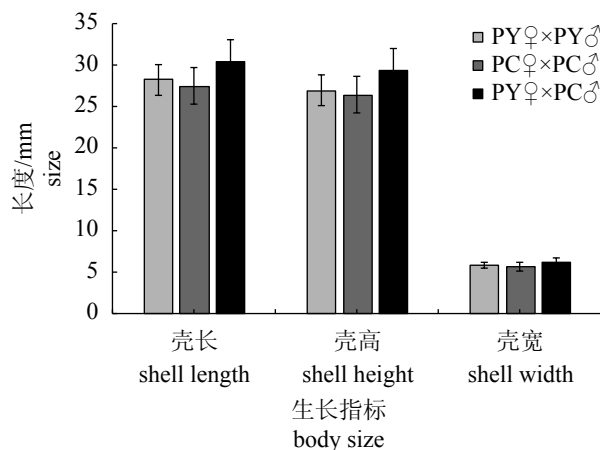


图 4 杂交和自交1龄稚贝的体尺生长指标比较  
Fig. 4 Comparison of the body sizes of 1-year-old juveniles of the inbred and crossbred cohorts

### 3 讨论

#### 3.1 风向标扇贝与虾夷扇贝种间杂交的可行性

虾夷扇贝自20世纪八十年代引进我国以后, 已在辽宁、山东展开大规模的育苗及养殖, 但随着虾夷扇贝累代近交以及病害暴发等原因, 出现了种质退化、病害频发、商品规格降低等问题<sup>[2]</sup>, 虽然通过引种复壮和改进养殖技术等手段取得了一定的成果<sup>[25-28]</sup>, 但是依然没有从根本上解决问题, 因此需要通过遗传育种培育新品种来提高其抗逆性, 从根本上解决问题。

风向标扇贝和虾夷扇贝都为*Patinopecten*属的优良养殖品种, 二者都属于大型扇贝, 与虾夷扇贝相比, 风向标扇贝具有个体更大、闭壳肌更肥大、出肉率更高等优点, 市场前景更广阔, 但是由于其温度适应范围较窄, 无法保证其能够在我国海域正常生长, 因此, 利用风向标扇贝与虾夷扇贝在个体大小和温度适应范围

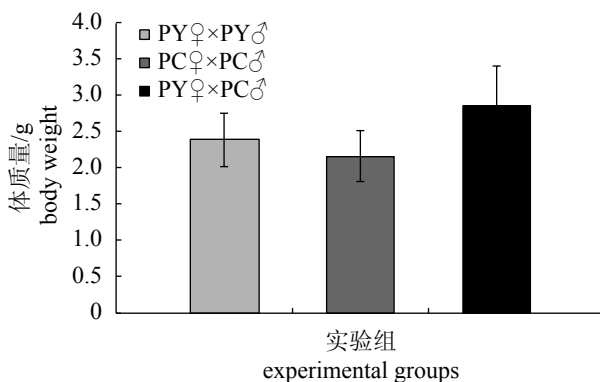


图 5 杂交和自交1龄稚贝的体质量比较  
Fig. 5 Comparison of the body weights of 1-year-old juveniles of the inbred and crossbred cohorts

等方面性状互补的特点, 通过杂交育种技术培育出一种个体大、生长快且适温广的杂交扇贝, 是有效利用风向标扇贝种质资源的最佳途径。类似的工作已在其他扇贝品种的育种中取

得了成功, 例如中国海洋大学包振民教授团队利用栉孔扇贝(*Chlymys farreri*)为母本、华贵栉孔扇贝(*C. nobilis*)为父本, 通过种间杂交培育出“蓬莱红”栉孔扇贝, 新品种具有生长快、出肉率高、耐高温、抗病力强等优点, 成为北方的主要养殖品种之一, 并已在浙江海域成功养殖<sup>[29]</sup>。青岛农业大学王春德团队利用紫扇贝与海湾扇贝杂交, 经多代选育, 培育出杂交扇贝新品种“渤海红”, 比普通海湾扇贝湿重提高38%以上, 已在北方大规模推广养殖, 并已在南方海域成功试养<sup>[30]</sup>。

本实验研究表明, 无论风向标扇贝与虾夷扇贝正交或反交, 其受精率和孵化率均较高, 胚胎发育和幼虫生长基本正常, 尤其重要的是,  $PY_{\text{♀}} \times PC_{\text{♂}}$ 杂交一代无论在幼虫期还是稚贝期均显示出比亲本更大的生长优势, 说明在风向标扇贝与虾夷扇贝之间进行种间杂交是可行的, 因此有可能通过种间杂交的方法用风向标扇贝的基因资源改良虾夷扇贝的种质。

### 3.2 卵源对受精、孵化和幼虫生长的影响

在本实验中, 以虾夷扇贝为母本的自交和杂交组合的受精率、孵化率及幼虫期和稚贝期的生长率、存活率均高于以风向标扇贝为母本的自交或杂交组合, 而南乐红等<sup>[23]</sup>在紫扇贝与墨西哥湾扇贝(*A. irradians concentricus*)杂交子代的研究中发现杂交组的受精率和孵化率与自交组无明显差异, 甚至部分杂交组的受精率和孵化率高于自交组, 造成本实验此现象的原因可能与不同种类精卵的识别机制有关。此外,  $PC_{\text{♀}} \times PY_{\text{♂}}$ 组在第11天之前生长基本正常, 但在第11天出现大量死亡, 有可能是一种母系效应的表现。一方面, 由于风向标扇贝亲贝经历了漫长的运输过程, 干露和低温可能对卵细胞造成胁迫, 因而对其自交和杂交后代均造成了不良影响。另一方面, 由于用于实验的雌性风向标扇贝平均壳长在16 cm以上, 贝龄普遍偏高, 因此卵子质量有可能下降, 这种现象已经在紫贻贝中报道过<sup>[31]</sup>。

### 3.3 杂交1代的杂种优势

在种内杂交和种间杂交过程中, 育种学家主要关注的是杂交是否会产生正向的杂种优势。许多关于贝类远缘杂交的研究表明, 杂交

过程中出现配子不兼容、幼虫存活率低和幼虫不变态等远交衰退现象<sup>[32]</sup>, 杂交后代表现出明显的杂种劣势。张跃环等<sup>[32-33]</sup>将长牡蛎与近江牡蛎(*C. rivularis*)进行种间杂交, 结果发现, 在生长和存活率方面, 以长牡蛎为母本的杂交组具有显著的优势, 而反交则表现为劣势。

在本实验中, 通过比较杂交一代在幼虫期和稚贝期的生长及幼虫期存活曲线可以看出,  $PY_{\text{♀}} \times PC_{\text{♂}}$ 的生长速率高于双亲, 幼虫期存活率介于双亲之间, 而 $PC_{\text{♀}} \times PY_{\text{♂}}$ 无论是生长还是存活率均低于双亲, 杂交结果表现为单向杂种优势或不对称现象。这种正交、反交杂交优势相反的现象除了在牡蛎种间杂交中有过报道外, 在其他贝类中也出现过, 例如对贻贝(*Mytilus* sp.)的种间杂交研究中出现了正、负杂种优势和没有杂种优势3种结果<sup>[9-11]</sup>。正交、反交存在显著差异的原因或许是因为存在母本效应, 需通过进一步分析“卵源”和“交配策略”对生长的影响<sup>[18]</sup>才能得出结论。

### 参考文献:

- [1] 王如才, 王邵萍, 张建中. 海水贝类养殖学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1993.  
Wang R C, Wang S P, Zhang J Z. Marine Shellfish Culture[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 1993 (in Chinese).
- [2] 张明明, 赵文. 我国虾夷扇贝死亡原因的探讨及控制对策[J]. 中国水产, 2008(2): 65-66, 74.  
Zhang M M, Zhao W. Discussion on the cause of death and control measures of the *Patinopecten yessoensis* in China[J]. China Fisheries, 2008(2): 65-66, 74(in Chinese).
- [3] 桂建芳. 鱼类遗传育种研究的现状与展望[C]//鱼类种子工程与可持续发展科技论坛论文集. 青岛: 中国工程院, 中国水产科学研究院, 2012.  
Gui J F. Status and prospects for studies on fish genetic breeding[C]//Fish Seed Engineering and Sustainable Development Technology BBS. Qingdao: Chinese Academy of Engineering, Chinese Academy of Fishery Sciences, 2012 (in Chinese).
- [4] 潘光碧, 唐刚胜, 杜森英, 等. 鲤鲫移核鱼与散鳞镜鲤杂交优势及遗传性状的研究[J]. 水产学报, 1989, 13(3): 230-238.  
Pan G B, Tang G S, Du S Y, et al. On some characterist-

- ics of the hybrid of Scattered mirror carp crossed with CyCa hybrid[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1989, 13(3): 230-238(in Chinese).
- [5] 张起信, 牛明宽, 刘光穆, 等. 鲍的杂交育种高产技术研究[J]. *海洋科学*, 2000, 24(3): 11-13.  
Zhang Q X, Niu M K, Liu G M, *et al.* Study on high production of hybridization breeding of abalone[J]. *Marine Science*, 2000, 24(3): 11-13(in Chinese).
- [6] 吕豪, 魏若飞, 吕典壮, 等. 太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)与大连湾牡蛎(*Ostrea talienwhamensis*)杂交实验[J]. *水产科学*, 1994(6): 8-11.  
Lü H, Wei R F, Lü D Z, *et al.* The hybrid experiment of the pacific oyster (*Crassostrea gigas*) and the Dalian Bay oyster (*Ostrea talienwhamensis*)[J]. *Fisheries Science*, 1994(6): 8-11(in Chinese).
- [7] Allen Jr S K, Gaffney P M. Genetic confirmation of hybridization between *Crassostrea gigas* (Thunberg) and *Crassostrea rivularis* (Gould)[J]. *Aquaculture*, 1993, 113(4): 291-300.
- [8] 魏贻尧, 姜卫国, 李刚. 合浦珠母贝、长耳珠母贝和大珠母贝种间人工杂交的研究. I. 人工杂交和杂交后代的观察[J]. *热带海洋*, 1983, 2(4): 309-315, 337.  
Wei Y Y, Jiang W G, Li G. Studies on the cultivated interspecific hybridizations between pairs of *Pinctada fucata*, *P. maxima* (Mollusca, Bivalvia). I. Cultivated hybridizations and observations on the hybrids[J]. *Tropic Oceanology*, 1983, 2(4): 309-315, 337(in Chinese).
- [9] Bierne N, David P, Boudry P, *et al.* Assortative fertilization and selection at larval stage in the mussels *Mytilus edulis* and *M. galloprovincialis*[J]. *Evolution*, 2002, 56(2): 292-298.
- [10] Beaumont A R, Abdul-Razzak A, Seed R. Early development, survival and growth in pure and hybrid larvae of *Mytilus edulis* and *M. galloprovincialis*[J]. *Journal of Molluscan Studies*, 1993, 59(1): 120-123.
- [11] Beaumont A R, Turner G, Wood A R, *et al.* Hybridisations between *Mytilus edulis* and *Mytilus galloprovincialis* and performance of pure species and hybrid veliger larvae at different temperatures[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 302(2): 177-188.
- [12] 张安国, 李太武, 苏秀榕. 不同花纹文蛤杂交育种初步研究[J]. *水产科学*, 2010, 29(7): 403-407.  
Zhang A G, Li T W, Su X R. Hybridization of different decorative pattern on clam *Meretrix meretrix* Linnaeus[J]. *Fisheries Science*, 2010, 29(7): 403-407(in Chinese).
- [13] 常亚青, 刘小林, 相建海, 等. 栉孔扇贝中国种群与日本种群杂交一代的早期生长发育[J]. *水产学报*, 2002, 26(5): 385-390.  
Chang Y Q, Liu X L, Xing J H, *et al.* The juvenile growth and survival of hybrid between Chinese population and Japanese population of *Chlamys farreri*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2002, 26(5): 385-390(in Chinese).
- [14] 刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 栉孔扇贝不同种群杂交效果的研究 II. 中国种群和俄罗斯种群及其杂种F1中期生长发育[J]. *海洋学报*, 2005, 27(2): 135-140.  
Liu X L, Chang Y Q, Xiang J H, *et al.* Studies on hybridization effects of the different geographic population of *Chlamys farreri* II. The medium-term growth and development of Chinese population and Russian population and their reciprocal crosses[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 135-140(in Chinese).
- [15] 杨爱国, 王清印, 刘志鸿, 等. 虾夷扇贝×栉孔扇贝人工受精过程的荧光显微观察[J]. *海洋水产研究*, 2002, 23(3): 1-4.  
Yang A G, Wang Q Y, Liu Z H, *et al.* Cytological observation on cross fertilization of *Chlamys farreri* and *Patinopekten yesoensis* with fluorescent microscope[J]. *Marine Fisheries Research*, 2002, 23(3): 1-4(in Chinese).
- [16] 于瑞海, 包振民, 王昭萍, 等. 栉孔扇贝×虾夷扇贝的杂交技术[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(1): 85-88, 56.  
Yu R H, Bao Z M, Wang Z P, *et al.* A study on hybridization between scallops *Chlamys farreri* and *Patinopekten yesoensis*[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(1): 85-88, 56(in Chinese).
- [17] Kraeuter J, Adamkewicz L, Castagna M, *et al.* Rib number and shell color in hybridized subspecies of the Atlantic bay scallop, *Argopecten irradians*[J]. *Nautilus*, 1984, 98: 17-20.
- [18] 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.
- [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(in Chinese).
- [20] 张海滨. 海湾扇贝近交生物学效应和遗传改良研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.  
Zhang H B. Study on inbreeding effects and genetic improvement of bay Scallop[D]. Qingdao: the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2005 (in Chinese).
- [21] 张国范, 刘晓, 阙华勇, 等. 贝类杂交及杂种优势理论和技术研究进展[J]. 海洋科学, 2004, 28(7): 54-60.  
Zhang G F, Liu X, Que H Y, *et al.* The theory and application of hybridization and heterosis in marine mollusks[J]. Marine Sciences, 2004, 28(7): 54-60(in Chinese).
- [22] 王春德, 刘保忠, 李继强, 等. 紫扇贝与海湾扇贝种间杂交的研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(10): 84-87, 91.  
Wang C D, Liu B Z, Li J Q, *et al.* Inter-specific hybridization between *Argopecten purpuratus* and *Argopecten irradians irradians*[J]. Marine Sciences, 2009, 33(10): 84-87, 91(in Chinese).
- [23] 南乐红, 张金盛, 丰玮, 等. 紫扇贝和墨西哥湾扇贝种间杂交的初步研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 131-135.  
Nan L H, Zhang J S, Feng W, *et al.* Inter-specific hybridization between *Argopecten purpuratus* and *Argopecten irradians concentricus*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(20): 131-135(in Chinese).
- [24] Saunders R, Heath W. New developments in scallop farming in British Columbia[J]. Bulletin of the Aquaculture Association of Canada, 1994, 94: 3-7.
- [25] 常亚青, 相建海, 张国范, 等. 虾夷扇贝三倍体诱导与培育技术的研究[J]. 中国水产科学, 2001, 8(1): 18-22.  
Chang Y Q, Xiang J H, Zhang G F, *et al.* Induced triploidy in scallop *Patinopecten yessoensis* and the larval cultivation[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2001, 8(1): 18-22(in Chinese).
- [26] 傅强, 王师, 赵亮, 等. 不同近交系数的虾夷扇贝近交衰退研究[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(11): 43-48.  
Fu Q, Wang S, Zhao L, *et al.* Analysis of inbreeding depression in *Patinopecten yessoensis* based on different inbreeding coefficient[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(11): 43-48(in Chinese).
- [27] 傅强. 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)近交衰退的生物学效应及遗传机理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
Fu Q. Biological Effects and genetic mechanism of inbreeding depression in Japanese scallop (*Patinopecten yessoensis*)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [28] 王庆志, 李石磊, 付成东, 等. 虾夷扇贝耐高温育种家系的建立与早期筛查[J]. 水产学报, 2014, 38(3): 371-377.  
Wang Q Z, Li S L, Fu C D, *et al.* Establishment of high temperature resistance families and use of laboratory assays to predict subsequent survival in juvenile stage of the Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(3): 371-377(in Chinese).
- [29] 孙建璋, 王孟兴, 褚长建. “蓬莱红”栉孔扇贝养殖试验[J]. 渔业现代化, 2003(4): 18-19.  
Sun J Z, Wang M X, Zhu C J. Experiment on "Peng Lai Hong" scallop culture[J]. Fishery Modernization, 2003(4): 18-19(in Chinese).
- [30] Wang C D, Liu B, Liu X, *et al.* Selection of a new scallop strain, the Bohai Red, from the hybrid between the bay scallop and the Peruvian scallop[J]. Aquaculture, 2017, 479: 250-255.
- [31] Sukhotin A A, Flyachinskaya L P. Aging reduces reproductive success in mussels *Mytilus edulis*[J]. Mechanisms of Ageing and Development, 2009, 130(11-12): 754-761.
- [32] 张跃环, 王昭萍, 喻子牛, 等. 养殖牡蛎种间杂交的研究概况与最新进展[J]. 水产学报, 2014, 38(4): 612-623.  
Zhang Y H, Wang Z P, Yu Z N, *et al.* A recent review of interspecific hybridization among cultivated oysters[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(4): 612-623(in Chinese).
- [33] 张跃环, 王昭萍, 闫喜武, 等. 太平洋牡蛎与近江牡蛎的种间杂交[J]. 水产学报, 2012, 36(8): 1215-1224.  
Zhang Y H, Wang Z P, Yan X W, *et al.* Interspecific hybridization between two oysters *Crassostrea gigas* and *C. ariakensis*[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(8): 1215-1224(in Chinese).



## Inter-specific hybridization between *Patinopecten yessoensis* and *P. caurinus*

LIU Guilong<sup>1</sup>, LIN Jiliang<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>2</sup>, CHEN Yin<sup>1</sup>, MA Bin<sup>3</sup>,  
WEI Zhenlu<sup>4</sup>, ZHANG Jinsheng<sup>5</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, WANG Chunde<sup>1\*</sup>

(1. Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. Qingdao Airport Inspection and Quarantine Bureau, Qingdao 266108, China;

3. Qingdao Oceanwide BioTech Co., Ltd., Qingdao 266101, China;

4. Dalian Changhai Zhenlu Aquaculture Co., Ltd., Dalian 116504, China;

5. Xiadian Agricultural Technology Promotion Station of Zhaoyuan, Yantai 265415)

**Abstract:** In order to solve the problems in the cultivation of the *Patinopecten yessoensis*, a crossbreeding experiment was carried out between *P. yessoensis* and *P. caurinus*. Two hybrids, *P. yessoensis*(♀)×*P. caurinus*(♂) (PY♀×PC♂) and *P. caurinus*(♀)×*P. yessoensis*(♂)(PC♀×PY♂), together with purebred *P. yessoensis* and *P. caurinus* were produced. The PY♀×PC♂ cohort outperformed both pure-bred parental cohorts in both larval and juvenile growth with medial performance in fertilization rate, hatching rate and larval survival rate between two pure-bred cohorts. The PC♀×PY♂ exhibited negative heterosis in fertilization rate, hatching rate and larval growth, as well as in survival rate. It seems that the origin of eggs had significant influence on performance of hybrids. The results thus suggest that it is possible to improve the stock of the local Japanese scallops by hybridizing them with *P. caurinus*.

**Key words:** *Patinopecten yessoensis*; *Patinopecten caurinus*; hybridization; heterosis

**Corresponding author:** WANG Chunde. E-mail: Chundewang2007@163.com

**Funding projects:** Introduction of Overseas Advanced Agricultural Technologies Project (2015-z61), Ministry of Agriculture, China; the Earmarked Fund for Shandong Modern Agro-Industry Technology Research System (SDAIT-14)