

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16243

墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝的远缘杂交

潘奕达, 封杰, 刘行, 王文杰, 潘英

广西大学 动物科学技术学院, 广西 南宁 530004

摘要: 为进一步研究扇贝属间远缘杂交的可行性, 以墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*)与华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)作为亲本, 建立了两种扇贝的正交组 MH、反交组 HM、墨西哥湾扇贝自交组 MM 和华贵栉孔扇贝自交组 HH。对各实验组的胚胎发育速度、受精率、孵化率、D 形幼虫发生率和幼虫生长速度进行比较, 分析了不同温度、盐度和精子浓度对各实验组配子亲和力及合子育性的影响, 并尝试运用 BP 神经网络模型预测杂交组浮游幼虫的生长趋势。结果表明, 两种扇贝的正反杂交均可获得早期杂交子代(F_1)。从胚胎发育情况看, 正反杂交组幼虫发育到 D 形幼虫的时间均少于两个自交对照组; 其受精率、孵化率、D 形幼虫发生率也低于两个自交对照组; 即使在不同温度、盐度和不同精子浓度下正反交组的受精率和孵化率也均低于两个自交组。从浮游幼虫生长情况看, 正反交组 D 形幼虫的壳长和壳高均高于两个自交组, 具有显著的差异性($P < 0.01$), 表现出较明显的杂种优势。运用 BP 神经网络模型对正反交组的浮游幼虫进行预测, 其预测值与实测值的误差率均小于 4%。

关键词: 墨西哥湾扇贝; 华贵栉孔扇贝; 远缘杂交; 胚胎发育; 幼虫生长; BP 神经网络模型; 预测比较

中图分类号: Q96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)04-0698-12

杂交是获得具有优良性状和较高生产性能新品种的重要途径。在种植业和畜牧业中运用杂交的方法已经获得了许多优良品种, 如玉米杂交种能提高产量 4 倍以上^[1], 杂交鲤在生长速度、适应性、抗病力与亲本相比具有较大优势^[2]。随着海洋贝类人工育苗的逐渐成熟, 20 世纪 60 年代国外有人开始了海洋贝类的杂交研究, 起初主要是围绕牡蛎开展种间杂交实验^[3-4]。在扇贝方面, 由于种内群体间或系群间杂交可操作性强, 种内杂交的相关研究较多^[5-6]。

墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*)原产自美国大西洋沿岸, 是海湾扇贝(*A. irradians irradians*)的热带亚种。因其具有生长快、生产周期短、肉柱得率高, 且适合我国南方海域环境养殖等特点, 受到业界青睐。自 1991 年引入中国大陆后, 墨西哥湾扇贝先后在广西、海南、广东等地进行育苗养成实验及推广, 目前已形成

规模化养殖, 成为北部湾贝类养殖的主要产业^[7]。墨西哥湾扇贝引种至今已有 20 余年, 随着养殖世代的增加, 由于近交和瓶颈效应, 养殖群体性状退化严重, 个体小型化、死亡率升高、出肉率降低^[8], 这些问题一直没有得到根本解决。因此, 通过杂交以改良养殖群体的经济性状, 甚至育成优质高产抗逆的新品种, 将可能有利于产业的困境突围。华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)是中国南方海域的主要养殖对象, 在中国分布区常见于闽粤桂琼海域, 属暖水性贝类, 营底栖生活^[9], 为中大型扇贝, 但养殖周期长、肉柱得率偏低。目前华贵栉孔扇贝在粤桂琼海域已形成一定的产业规模。

墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝在分类学上分别隶属于不同的属, 但它们的染色体数目都是 $2n=32$ ^[10], 且存在互补的表型性状(表 1), 如果能通过杂交实现两种扇贝优势性状基因的聚合, 将利于个体大、生长快、适应性强的优良新品种的培育。

收稿日期: 2016-08-11; 修订日期: 2016-10-11.

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 14121006-2-5).

作者简介: 潘奕达(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水生经济动物遗传育种与繁育.

通信作者: 潘英, 教授, 博士生导师. E-mail: yingpan@gxu.edu.cn

表 1 墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝的主要生物学特征比较

Tab. 1 Comparison of biological characteristics between *Argopecten irradians concentricus* and *Chlamys nobilis*

项目 item	墨西哥湾扇贝 <i>A. irradians concentricus</i>	华贵栉孔扇贝 <i>C. nobilis</i>
分类 classification	扇贝科, 海湾扇贝属 <i>Pectinidae, Argopecten</i>	扇贝科, 栉孔扇贝属 <i>Pectinidae, Chlamys</i>
染色体数 no. of chromosome	32	32
性别 gender	雌雄同体 androgyny	雌雄异体 dioecism
性腺颜色 color of gonad	乳白色♂/粉红色♀ ivory-white♂/pink♀	乳白色♂/橙黄色♀ ivory-white♂/orange-yellow♀
适应性 adaptability	适温性广, 低盐耐受性较强 wide range in temperature, strong low salt tolerance	适温范围较小, 低盐耐受性弱 narrow range in temperature, weak low salt tolerance
生长特性 growth	个体较小, 生长快, 养殖周期短 small individuals, fast in growth	个体大, 生长较慢, 养殖周期较长 large individuals, slow in growth

目前国内外学者已对多种扇贝进行过种间杂交研究, 如海湾扇贝与虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)^[11]、虾夷扇贝与栉孔扇贝(*C. farreri*)^[12-13]、栉孔扇贝与华贵栉孔扇贝^[14-15]、紫扇贝(*A. purpuratus*)与海湾扇贝^[16-17]以及华贵栉孔扇贝与虾夷扇贝^[18]等, 对墨西哥湾扇贝的研究主要集中在生态习性^[19-22]、人工育苗及养殖^[7, 23-24]、选择育种^[8]、亚种和种间杂交^[25-26]等方面, 而有关墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝的属间远缘杂交研究尚未见报道。本实验首次对墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝属间远缘杂交的可行性进行初步探索, 以期为今后两种扇贝性状的遗传改良提供科学依据, 并为贝类遗传解析、基础生物学及进化等领域研究提供实验材料。

1 材料与方法

1.1 扇贝的采集和暂养

2014 年 8 月至 2015 年 3 月初, 分别从广东省遂溪县草潭镇银浪水产种苗场和广东省雷州市流沙港扇贝养殖区购进墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝各 200 个, 皆为性成熟个体。实验扇贝运至实验场地后清洗入池, 饲以湛江叉鞭金藻(*Dicratera zhanjiangensis*)和亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*), 微充气培养。暂养 5 d 后, 选择性腺饱满微亮、生殖管脉路清晰、卵粒明显可辨的个体作为实验待产亲贝。

1.2 精卵收集和授精

用阴干升温的方法对亲贝进行催产, 分别获得华贵栉孔扇贝和墨西哥湾扇贝的精卵。收集两种扇贝的精液在显微镜下观察, 如无混入卵子,

则用于实验。收集的墨西哥湾扇贝卵子静置 20 min 后在显微镜下观察是否受精发育, 如无发育者, 则用于实验。将获得的墨西哥湾扇贝卵子与华贵栉孔扇贝和墨西哥湾扇贝的精子分别进行授精, 获得杂交组 MH(正交)和自交组 MM(作为正交组的对照); 将华贵栉孔扇贝的卵子与墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝的精子分别进行授精, 获得杂交组 HM(反交)和自交组 HH(作为反交组的对照)。然后将各实验组受精卵转移到水温(28±0.5)℃、盐度 24~25 的容器中进行培养。

1.3 配子亲和力和合子育性的分析

在生产中, 墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝的养殖环境条件, 水温为(28±0.5)℃、盐度为 24~25^[27]。本实验设计了 5 个不同的温度梯度(19℃、22℃、25℃、28℃和 31℃)和不同的盐度梯度(17、21、25、29 和 33), 实验共分 3 组, 每组实验进行 5 次重复。在温度实验中, 用海水冰和加热棒将海水水温分别调至所需温度, 控制盐度为 25; 在盐度实验中, 盐度用海水晶和地下水进行配制, 控制水温为 28℃。记录不同温度和盐度下各实验组的受精率和孵化率。

参照测定牡蛎^[28-29] 种间配子亲和性的精子浓度梯度, 实验设定 10⁰个/μL、10¹个/μL、10²个/μL、10³个/μL 和 10⁴个/μL 5 个精子密度, 实验分 3 组, 每组进行 5 次重复。卵子密度控制在 40~50 个/mL, 通过血球计数板来调控精子密度。在温度 28℃、盐度 25 的条件下, 分别记录不同精子浓度下各实验组的受精率和孵化率。

1.4 幼虫的培养和管理

各实验组授精之后, 将受精卵移至相同温度

和盐度的培养池中继续培养,并使培养水体的水温保持在 $(28\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$,盐度 24~25。培养期间投喂金藻和扁藻,微充气培养。定期取样观察,测定 D 形幼虫壳长、壳高。其他培育条件按照常规方法进行^[8]。

1.5 性状观察与测定

1.5.1 胚胎发育不同阶段所需时间 杂交受精之后,定时取样观察胚胎的发育情况。用光学显微镜对杂交组 and 对照组各发育时期的胚胎进行观察,用三星 SM-8508s 相机拍照并记录胚胎发育各时期所需时间。

1.5.2 受精率的观察测量 以受精卵出现第一极体统计受精率,采用五点取样的方法^[15],每点取样水体 10 mL,在授精后 15 min、20 min、25 min 3 个时间点分别取样,300 目筛绢收集受精卵后用光学显微镜进行观察,统计样本中所有细胞数和出现第一极体的受精卵数。

1.5.3 孵化率的观察测量 以发育到具有纤毛且能够旋转运动的担轮幼虫进行统计孵化率,采用五点取样的方法^[15],每点取样水体 10 mL,在授精后 18 h、21 h、24 h 这 3 个时间点分别取样,300 目筛绢收集受精卵后用光学显微镜进行观察,统计样品中所有细胞数和担轮幼虫数。

1.5.4 D 形幼虫发生率的观察测量 授精后 24 h 用光学显微镜分别统计取样水体的担轮幼虫和 D 形幼虫个数,并计算 D 形幼虫发生率。

$$\text{D形幼虫发生率} = \frac{\text{D形幼虫}}{\text{担轮幼虫} + \text{D形幼虫}} \times 100\%$$

1.5.5 D 形幼虫生长的测量 D 形幼虫达 2 日龄后,每日(从第 2 日始至 11 日龄)定时对 4 个实验组取样并在光学显微镜下测量其壳长和壳高。每次测量将五点取样水体混合,随机测量 30 个幼虫。

1.5.6 杂种优势的计算与比较 正反交组杂种优势的比较参考 Cruz^[30]的计算方法,用下面 4 个公式来评价各组的杂种优势率:

$$H_{\text{MH} \times \text{MM}} = \frac{\text{MH} - \text{MM}}{\text{MM}} \times 100\% \quad (1)$$

$$H_{\text{MH} \times \text{HH}} = \frac{\text{MH} - \text{HH}}{\text{HH}} \times 100\% \quad (2)$$

$$H_{\text{HM} \times \text{MM}} = \frac{\text{HM} - \text{MM}}{\text{MM}} \times 100\% \quad (3)$$

$$H_{\text{HM} \times \text{HH}} = \frac{\text{HM} - \text{HH}}{\text{HH}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, MH、HM、MM、HH 分别表示 4 个实验组在同日龄生长(壳长、壳高)的表观值;公式(1)表示正交组对自交组 MM 的杂种优势率;公式(2)表示正交组对自交组 HH 的杂种优势率;公式(3)表示反交组对自交组 MM 的杂种优势率;公式(4)表示反交组对自交组 HH 的杂种优势率。

1.5.7 杂交子代浮游幼虫生长趋势的预测 运用 BP 神经网络模型对墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝杂交子代生长趋势进行预测,先对模型进行检验后再对杂交子代生长趋势进行预测。杂交预测过程分为 6 个模块进行处理:

(1) 原始数据(正交组、反交组、自交组 MM、自交组 HH 的受精后日龄为 2 d、3 d、4 d、5 d、6 d、7 d、8 d、9 d 的浮游幼虫的壳长和壳高)的输入。

(2) 对输入数据矩阵和目标矩阵的数据进行归一化。

(3) 利用处理好的数据对网络进行训练。

(4) 利用训练好的数据对网络进行仿真。

(5) 用原始数据仿真的结果与已知数据进行比对测试。

(6) 输入新的数据(自交组 MM、HH 的日龄为 10 d、11 d 的浮游幼虫的壳长和壳高)进行仿真。

1.6 数据处理

利用 Excel 2015 和 SPSS 22.0 统计软件分别计算受精率、孵化率、D 形幼虫发生率,不同温度、盐度和精子浓度下各实验组的受精率和孵化率以及 D 形幼虫壳长、壳高等生物指标的平均值、标准差,并检验各实验组的差异显著性,用 MATLAB 2015 对杂交子代浮游幼虫生长趋势进行预测。

2 结果与分析

2.1 正反交组和自交对照组的胚胎发育比较

在水温 $(28\pm 0.5)^{\circ}\text{C}$ 、盐度 24~25 的条件下,正反交组与自交对照组的胚胎发育过程见表 2。正反交组和反交组的胚胎发育过程的光镜观察如图 1、图 2 所示。由表 2 可知,在 27~28 $^{\circ}\text{C}$ 环境条件下,正反交组发育到 D 形幼虫所需要的时间均小于自交对照组(MH 为 18 h, HM 为 19 h, MM 为 21 h、HH 为 22 h)。

成熟的墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝的卵子呈球形(如图 1a, 图 2a), 卵径为 70~80 μm 。授精约 15 min 后, 受精卵的动物极半球出现第一极体(图 1b, 图 2b); 23 min 后, 在受精卵紧挨第一极体处出现第二极体(图 1c, 图 2c)。细胞质继续向植物极流动, 在植物极端出现极叶(图 1d, 图 2d)。授精 50 min 后, 植物极开始收缩, 细胞纵裂为两个分裂半球, 即 2 细胞期(图 1e, 图 2e)。授精后 1 h 20 min, 杂交胚胎开始第二次分裂, 即 4 细胞期(图 1f, 图 2f)。授精后约 2 h 10 min, 杂交胚胎再次分裂, 胚胎分裂为 8 个小细胞, 即 8 细胞期(图 1g, 图 2g)。授精后约 150 min, 受精卵进入多细胞期(图 1h, 图 2h)。胚胎开始上浮并转动, 即到达囊胚期(图 1i, 图 2i)。授精 9 h 后, 达原肠胚期(图 1j, 图 2j), 此时在胚胎的表面可观察到明显的短而小的纤毛, 胚胎转动更加明显。授精 11 h 50 min 后, 发育成担轮幼虫, 胚胎出现鞭毛, 具有较强的运动能力。授精后 18 h, 受精卵发育到 D 形幼虫期(图 1k, 图 2k)。环状的口前纤毛轮变为游泳盘(面盘), 具游泳和取食的功能, 即为浮游面盘幼虫(图 1l, 图 2l)。

2.2 各实验组的受精率、孵化率和 D 形幼虫发生率比较

由表 3 可知, 正交组最终受精率比两个自交

组(MM 和 HH)平均低 17.60%, 最终孵化率比两个自交组平均低 18.40%; 反交组最终受精率比两个自交组(MM 和 HH)平均低 12.06%, 最终孵化率比两个自交组平均低 25.91%。正反交组的 D 形幼虫发生率分别比两个自交组平均低 33.90%、19.56% (表 4)。

2.3 正反交组和自交对照组面盘幼虫的生长比较

浮游面盘幼虫时期正反交组与自交对照组壳长和壳高的生长曲线如图 3 所示。两个杂交组的壳长从 4 日龄开始与两个自交组出现显著性差异($P<0.01$), MH 为 $(145.43\pm 4.34) \mu\text{m}$, HM 为 $(147.23\pm 4.44) \mu\text{m}$, MM 为 $(141.14\pm 3.83) \mu\text{m}$, HH 为 $(142.04\pm 3.61) \mu\text{m}$ 。而两个杂交组的壳长从 6 日龄开始与两个自交组出现显著性差异($P<0.01$), MH 为 $(104.84\pm 3.83) \mu\text{m}$, HM 为 $(106.51\pm 3.53) \mu\text{m}$, MM 为 $(97.75\pm 3.24) \mu\text{m}$, HH 为 $(102.69\pm 2.57) \mu\text{m}$ 。面盘幼虫生长到 11 日龄时, 杂交组 HM 的壳长和壳高最大, 分别为 $(201.55\pm 3.95) \mu\text{m}$ 和 $(190.29\pm 4.03) \mu\text{m}$ 。

正反交组杂种优势的比较可采用公式(1)~(4)所示的杂种优势率方程进行比较分析, 通过正反两个杂交组分别对两个自交组进行杂交优势分析, 可得到 2~11 日龄幼虫杂交优势的生长优势比较如图 4 所示。两个杂交组对自交组 MM 壳长和壳高的生长优势总体大于两个杂交组对自交组 HH 的生

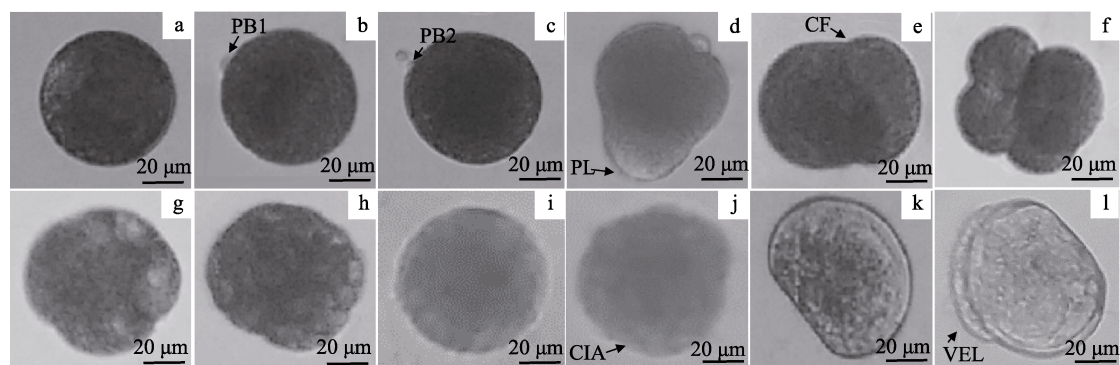


图 1 墨西哥湾扇贝(♀)与华贵栉孔扇贝(♂)杂交的胚胎发育

a. 未受精的卵子; b. 排出第一极体; c. 排出第二极体; d、e. 第一次卵裂(2 细胞期); f. 第二次卵裂(4 细胞期); g. 第三次卵裂(8 细胞期); h. 多细胞期; i. 囊胚期; j. 原肠期; k. D 形幼虫; l. 面盘幼虫. PB1: 第一极体; PB2: 第二极体; PL: 极叶; CF: 卵裂沟; CIA: 纤毛; VEL: 面盘。

Fig. 1 Embryonic and larval development and juvenile growth hybrid between *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂)
a. unfertilized mature egg; b. release of the first polar body; c. release of the second polar body; d and e. the first cleavage; f. the second cleavage; g. the third cleavage; h. multi-cell stage; i. blastula stage; j. gastrula stage; k. D-shaped larve; l. veliger larva. PB1: the first polar body; PB2: the second polar body; PL: polar lobe; CF: the cleavage furrow; CIA: ciliary; VEL: velizer.

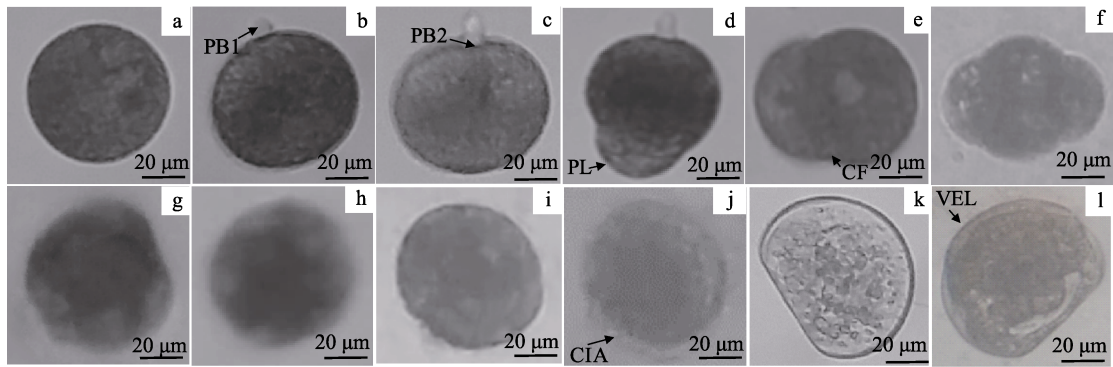


图 2 华贵栉孔扇贝(♀)与墨西哥湾扇贝(♂)杂交的胚胎发育

a. 卵子; b. 排出第一极体; c. 排出第二极体; d、e. 第一次卵裂(2 细胞期); f. 第二次卵裂(4 细胞期); g. 第三次卵裂(8 细胞期); h. 多细胞期; i. 囊胚期; j. 原肠期; k. D 形幼虫; l. 面盘幼虫。CIA: 纤毛; CF: 卵裂沟; PB1: 第一极体; PB2: 第二极体; PL: 极叶; VEL: 面盘。

Fig. 2 Embryonic and larval development and juvenile growth of hybrid between *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂)
a. unfertilized mature egg; b. release of the first polar body; c. release of the second polar body; d and e. the first cleavage; f. the second cleavage; g. the third cleavage; h. multi-cell stage; i. blastula stage; j. gastrula stage; k. D-shaped larve; l. veliger larva. CIA: ciliary; CF: cleavage furrow; PB1: first polar body; PB2: second polar body; PL: polar lobe; VEL: velizer.

表 2 墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交和自交的胚胎发育比较

Tab. 2 Embryonic and larval development of the reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

发育阶段	developmental stage	MH	HM	MM	HH
第一极体	first polar body	15 min	15 min	15 min	17 min
第二极体	second polar body	23 min	25 min	25 min	30 min
2 细胞期	two-cell stage	50 min	50 min	55 min	1 h
4 细胞期	four-cell stage	1 h 20 min	1 h 20 min	1 h 25 min	1 h 30 min
8 细胞期	eight-cell stage	2 h 10 min	2 h 15 min	2 h 15 min	2 h 20 min
多细胞期	multicellular stage	2 h 40 min	2 h 45 min	2 h 50 min	2 h 55 min
囊胚期	blastula stage	4 h 50 min	5 h	5 h 10 min	5 h 30 min
原肠期	gastrula stage	9 h	9 h 15 min	9 h 35 min	9 h 50 min
担轮幼虫	trochophore larva	11 h 50 min	12 h 10 min	12 h 40 min	13 h 30 min
D 形幼虫	D-shaped larva	18 h	19 h	21 h	22 h

注: MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂; MM: 墨西哥湾扇贝自交组; HH: 华贵栉孔扇贝自交组。
Note: MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂); MM: *A. irradians concentricus* inbred group; HH: *C. nobilis* inbred group.

表 3 墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交胚胎与自交组的受精率和孵化率比较

Tab. 3 Fertilization rate and hatching rate of the reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

n=15; $\bar{x} \pm SD$; %

项目	授精后时间	MH	HM	MM	HH
item	time after fertilization				
受精率	15 min	31.57±22.58 ^{bc}	38.76±21.49 ^{ab}	45.50±10.32 ^a	49.33±8.81 ^c
	20 min	53.76±17.43 ^b	60.04±20.65 ^b	81.56±12.84 ^a	83.50±5.73 ^a
	25 min	75.36±21.95 ^b	80.43±18.83 ^b	92.17±10.74 ^a	90.75±6.26 ^a
孵化率	18 h	50.29±16.67 ^b	45.01±19.15 ^b	23.37±8.53 ^a	17.33±6.94 ^a
	21 h	69.50±16.30 ^b	56.61±19.38 ^c	79.01±10.19 ^a	64.71±8.57 ^b
	24 h	72.15±19.95 ^b	65.51±21.09 ^b	87.33±7.37 ^a	89.50±6.34 ^a

注: 上标字母不同者表示两两比较差异显著($P<0.05$)。MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂; MM: 墨西哥湾扇贝自交组; HH: 华贵栉孔扇贝自交组。
Note: The superscript footnote marker indicate there are significant difference between two groups ($P<0.05$). MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂); MM: *A. irradians concentricus* inbred group; HH: *C. nobilis* inbred group.

表 4 墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交组
与自交组的 D 形幼虫发生率

Tab.4 The rate of D-shaped larvae of the reciprocal
crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

n=15; %		
实验组 experimental group	平均值 average value	SD
MH	54.84	0.83
HM	66.74	1.20
MM	85.58	0.15
HH	80.35	0.45

注: MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂; MM: 墨西哥湾扇贝自交组; HH: 华贵栉孔扇贝自交组。

Note: MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂); MM: *A. irradians concentricus* inbred group; HH: *C. nobilis* inbred group.

长优势, 表明与自交组 HH 相比, 两个杂交组面盘幼虫壳长生长比自交组 MM 具有更大的生长优势。

2.4 不同温度、盐度和精子浓度对各实验组配子亲和力及合子育性的影响

不同温度、盐度和精子浓度下各实验组的配子亲和力及合子育性的情况见图 5~图 7。正反交与两个自交对照组的受精率和孵化率随着温度、盐度和精子浓度的升高均出现先上升后下降的现象, 两个杂交组在不同温度、盐度及精子浓度条件下其受精率和孵化率均小于两个自交对照组, 并且正反交组与两个自交对照组在不同温度、盐度及精子浓度的条件下均表现出极显著性差异($P<0.01$)。在温度 25℃、盐度 25、精子浓度 10^3 个/ μL 的

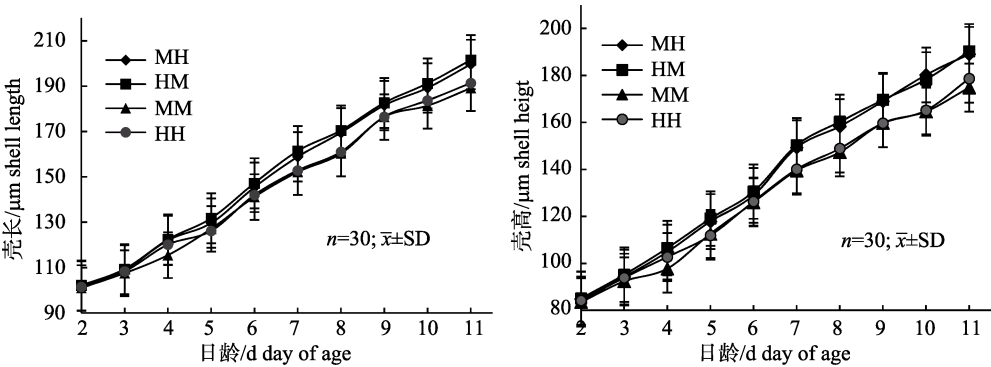


图 3 墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交与自交组面盘幼虫的壳长和壳高的生长比较

MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂;

MM: 墨西哥湾扇贝自交组; HH: 华贵栉孔扇贝自交组。

Fig. 3 The growth of shell length and height of the reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂);

MM: *A. irradians concentricus* inbred group; HH: *C. nobilis* inbred group.

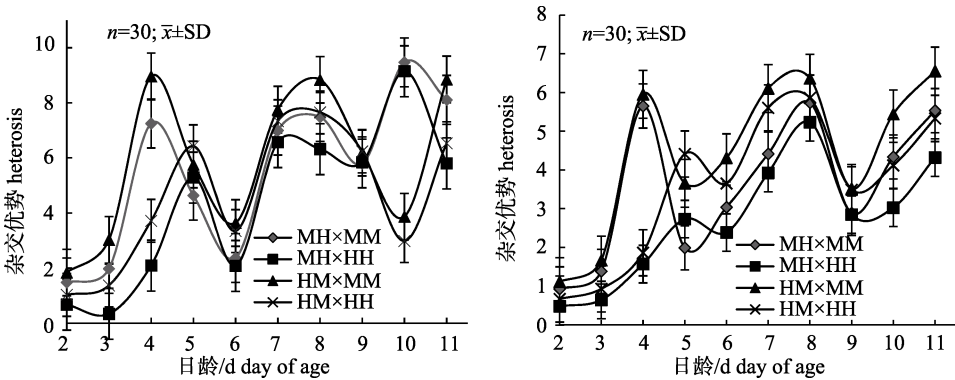


图 4 墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交与自交组面盘幼虫壳长和壳高生长优势的比较

MH×MM: 杂交组 MH 对自交组 MM 的杂交优势; MH×HH: 杂交组 MH 对自交组 HH 的杂交优势;

HM×MM: 杂交组 HM 对自交组 MM 的杂交优势; HM×HH: 杂交组 HM 对自交组 HH 的杂交优势。

Fig. 4 The heterosis of shell length and shell height of the reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

MH×MM: heterosis between MH and MM; MH×HH: heterosis between MH and HH; HM×MM: heterosis

between HM and MM; HM×HH: heterosis between HM and HH.

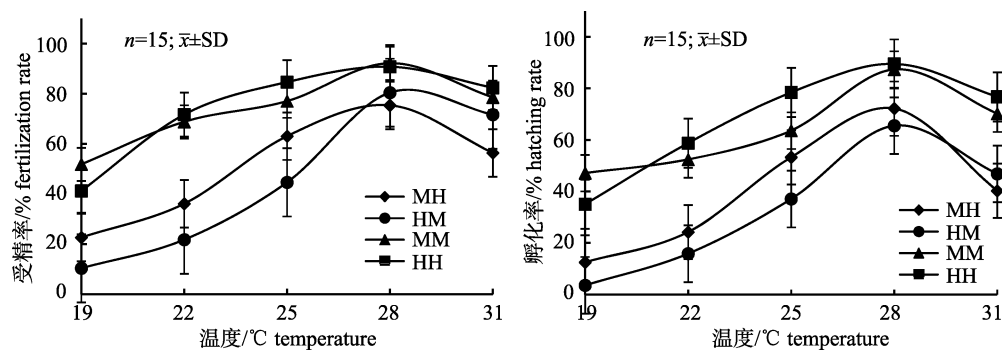


图 5 不同温度对墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交和自交组的配子亲和力及合子育性的影响

MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂;

MM: 墨西哥湾扇贝自交组; HH: 华贵栉孔扇贝自交组.

Fig. 5 Effect of temperature on gamete compatibility and zygote fertility of the reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂);

MM: *A. irradians concentricus* inbred group; HH: *C. nobilis* inbred group.

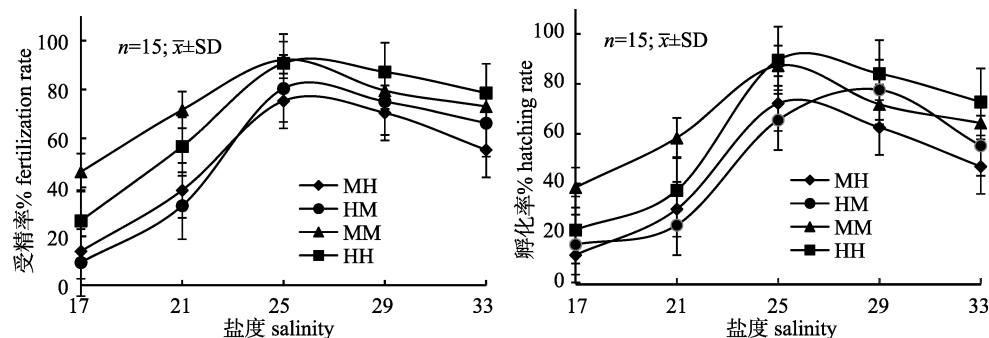


图 6 不同盐度对墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交和自交组的配子亲和力及合子育性的影响

MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂;

MM: 墨西哥湾扇贝自交组; HH: 华贵栉孔扇贝自交组.

Fig. 6 Effect of salinity on gamete compatibility and zygote fertility of the reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂);

MM: *A. irradians concentricus* inbred group; HH: *C. nobilis* inbred group.

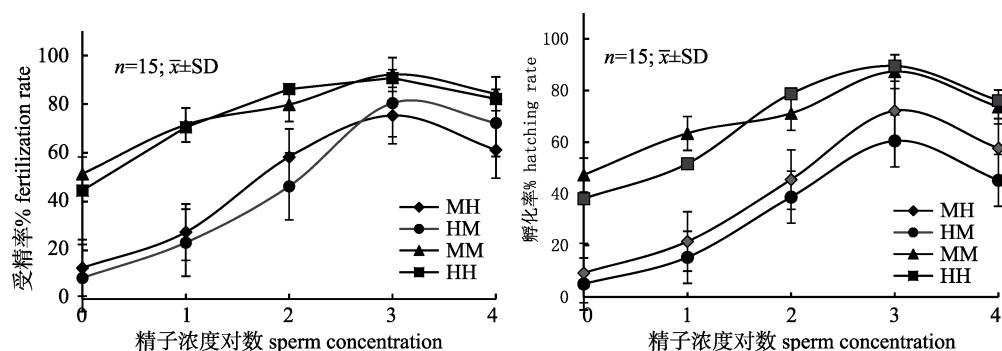


图 7 不同精子浓度对墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝正反交和自交组的配子亲和力及合子育性的影响

MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂;

MM: 墨西哥湾扇贝自交组; HH: 华贵栉孔扇贝自交组.

Fig. 7 Effect of sperm concentration on gamete compatibility and zygote fertility of the reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂);

MM: *A. irradians concentricus* inbred group; HH: *C. nobilis* inbred group.

条件下正反交组的配子亲和力和合子育性为最佳。

2.5 墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝杂交子代生长趋势的预测比较

2.5.1 墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝杂交子代(F₁)生长趋势的预测检测 通过神经网络对正反交组的生长进行了预测检验。结果表明, 正交组和反交组生长预测的迭代次数分别是 6 次和 7 次, R² 分别为 0.99945 和 0.99954 (表 5), 表明使用神经模型预测出的生长趋势与实际情况具有较高的符合度, 可以使用该模型进行预测。

2.5.2 墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝杂交子代生长趋势的预测检测 对授精后 10、11 日龄的正反组的壳长和壳高进行预测, 其与实际值比对见表 6。结果表明, 运用 BP 神经网络模型对授精后 10、11 日龄的正反交组的子代浮游幼虫的壳长和壳高的预测值与实际值比较, 其预测值均小于实际值, 但误差率均小于 4%。

3 讨论

杂交育种是遗传育种的主要手段之一, 是改良遗传性状、培育优良品种的可靠途径, 已在贝类的遗传改良中得到广泛的应用。将不同种群和

基因型的个体间进行杂交, 可使其杂交子代在生长势、生活力、繁殖力、抗逆性、产量和品质等方面优于原先亲本的性状^[31]。利用杂种优势可以对动植物遗传进行改良, 从而获得新的具有优势性状的杂种个体, 并为育种制备提供中间材料^[32]。以往在扇贝中的杂交主要侧重于种内不同群体间杂交。

研究表明, 墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝可以进行正向和反向的杂交。墨西哥湾扇贝的卵子能够与华贵栉孔扇贝的精子正常授精, 受精率较高; 受精卵能够正常发育, 孵化率不低于墨西哥湾扇贝自交对照组; 所获得的杂交子代(暂称墨华扇贝) (F₁)在幼虫期的生长速度均显著高于墨西哥湾扇贝自交群体。正反交组发育到 D 形幼虫的时间均小于两个自交对照组, 表明墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝的杂交具有较为明显的胚胎发育生长优势。王春德等^[16]在紫扇贝与海湾扇贝的杂交中发现其杂交组 D 形幼虫的发育时间短于自交组, 说明在一定程度上扇贝种间杂交 D 形幼虫发育快于自交组, 这与本研究中的结果一致。但本研究中的正反交组合在其配子亲和力和合子育性方面存在一定的阻隔现象, 具体表现为两个

表 5 墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝正反交组合预测模型的检测比较
Tab. 5 Comparison of growth prediction test of reciprocal crosses between *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

实验组 experimental group	迭代次数 iterations	平均方差 average variance	梯度(最佳) gradient	错误次数 error	R ²
MH	6	0.00060796	0.026705	0	0.99945
HM	7	0.00046975	0.040214	0	0.99954

注: MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂。
Note: MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂)。

表 6 墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝正反交组的壳长和壳高预测值与实际值比较
Tab. 6 Comparison of prediction and reality on shell length and height of reciprocal crosses of *A. irradians concentricus* and *C. nobilis*

杂交组 hybrid group	日龄/d days of age	壳长 shell length			壳高 shell height		
		实际值/μm reality	预测值/μm prediction	误差率/% error rate	实际值/μm reality	预测值/μm prediction	误差率/% error rate
MH	10	189.25	184.5837	2.466	180.21	173.8233	3.544
	11	199.62	193.5362	3.048	188.99	184.1717	2.502
HM	10	191.26	185.2739	3.130	178.27	172.2835	3.358
	11	201.55	194.8517	2.976	190.29	185.7165	2.403

注: MH: 墨西哥湾扇贝♀和华贵栉孔扇贝♂; HM: 华贵栉孔扇贝♀和墨西哥湾扇贝♂。
Note: MH: *A. irradians concentricus* (♀) and *C. nobilis* (♂); HM: *C. nobilis* (♀) and *A. irradians concentricus* (♂)。

杂交组的受精率和孵化率均低于两个自交组。而在紫扇贝与墨西哥湾扇贝^[26]和紫扇贝与海湾扇贝^[17]等扇贝种间杂交中,其杂交组的受精率和孵化率与自交组相比差异不显著,甚至有的杂交组的受精率和孵化率高于其自交组。这一结果与本研究有所不同,说明亲缘关系较远的亲本之间进行杂交,其配子之间的亲和性和合子的育性受到一定的限制导致,这可能与精卵的识别机制有关^[33]。

研究表明,在浮游面盘幼虫生长方面,正反交组合与两个自交对照组相比,在壳长和壳高上存在显著的差异性($P<0.01$),表明杂交组具有明显的杂种优势,并且正反交组对自交组 MM 壳长和壳高的生长优势总体大于正反交组对自交组 HH 的生长优势,表明正交组合对墨西哥湾扇贝遗传改良方面优势更为明显。李朝霞等^[34]研究发现海湾扇贝种群间杂交后代性状改良方面产生了一定的效果,杂交子代在养殖一段时间后在壳高、壳宽以及壳重方面均表现出生长优势。刘宪杰等^[18]也发现杂交后代在生长后期比其母本发育速度快。这些与我们研究中的杂交组浮游幼虫的生长结果一致。本研究在杂交子一代中观察到极其显著的种间杂种优势($P<0.01$),从幼虫的壳长、壳高的生长速度中可以看出正反交组合已表现出一定的杂种优势。

在以牡蛎为代表的双壳贝类的杂交研究中,其配子亲和性和合子育性具有一定的局限性,具体表现为单向受精^[35-36]以及配子、合子不育的现象^[37]。本研究表明墨西哥湾扇贝与华贵栉孔扇贝其双向均可以进行授精,而且杂交后可以获得正常的 D 形幼虫,这与海湾扇贝和墨西哥湾扇贝杂交^[38]的结果一致。同时,以温度、盐度以及精子浓度对墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝配子亲和力及合子育性影响的研究表明,发现三者对于杂交子代的形成具有显著性影响,并通过实验论证,确定最佳杂交条件为温度 28℃、盐度 25、精子浓度为 10^3 个/ μL 。

对杂交优势进行预测一直是杂交育种科研工作者的梦想,但由于对亲本的遗传物质无法做出准确而精细的划分,使杂交预测变得非常困难。随着神经网络已经在经济、工程方面的大数据预

测有了较大的发展,在实践中发挥着越来越重要的作用。本研究首次运用 BP 神经网络模型预测授精后 10、11 日龄正反交子代浮游幼虫的壳长和壳高,为杂交优势的预测提供新的思路。结果发现其预测值均小于实际值,但误差率均小于 4%。BP 神经网络虽然具有较强的适应能力,但各种参数的选择也会严重影响预测结果,有待于今后更深入的研究。从本实验结果来看,墨西哥湾扇贝和华贵栉孔扇贝杂交子代具有显著的生长优势,但如何应用到产业还需要进一步研究。本实验只对杂交子代早期发生过程进行了观察,中培育和养成期的性状表现还有待进一步研究。

致谢: 感谢广东湛江银浪水产种苗场提供的实验场地和技术支持。

参考文献:

- [1] Lamkey K R, Edwards J W. The quantitative genetics of heterosis[C]//Coors J G, Pandey S. Proceedings of the International Symposium on the Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops. Mexico City, Mexico: CIMMYT, 1999: 31-48.
- [2] Lou Y D, Li X Q. Distant hybridization of fish and its application in aquaculture in China[J]. Journal of Fishery Science of China, 2006, 13(1): 151-158. [楼允东, 李小勤. 中国鱼类远缘杂交研究及其在水产养殖上的应用[J]. 中国水产科学, 2006, 13(1): 151-158.]
- [3] Imai T, Sakai S. Study of breeding of Japanese oyster, *Crassostrea gigas*[J]. Tohoku J Agr Res, 1961, 12(2): 125-171.
- [4] Stiles S. Conventional and experimental approach to hybridization and inbreeding research in the oyster[C]. Proceedings of the Ninth Annual Meeting of the World Mariculture Society, 1978: 557-586.
- [5] Chang Y Q, Liu X L, Xiang 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. [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.]
- [6] Li Z X, Wang C D. Comparison of growth and path analyses of inbred and cross-bred populations in the bay scallop *Argopecten irradians irradians*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(8): 282-285. [李朝霞, 王春德. 海湾扇贝自交与杂交子代的生长比较和通径分析[J]. 中国

- 农学通报, 2009, 25(8): 282–285.]
- [7] Zhang F S, He Y C, Qi L X, et al. Introduction and spat-rearing of the F_1 generation of *Argopecten irradians concentricus* Say[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1994, 25(4): 372–377. [张福绥, 何义朝, 齐铃欣, 等. 墨西哥湾扇贝的引种和子一代苗种培育[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(4): 372–377.]
- [8] Liu Z G, Wang H, Zheng Y L. The effect of parental selection on inbred first filial generation of *Argopecten irradians concentricus* Say[J]. Journal of Fisheries of China, 2007, 31(4): 443–451. [刘志刚, 王辉, 郑云龙. 墨西哥湾扇贝亲代选择对自交子一代的影响[J]. 水产学报, 2007, 31(4): 443–451.]
- [9] Ou Y Y. Polymorphism of body-color and AFLP analyses of the scallop *C. nobilis*[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012. [欧燕燕. 华贵栉孔扇贝体色多态性研究及 AFLP 分析[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.]
- [10] Hu L P, Huang X T, Zhang L L, et al. Progress of study on pectinidae chromosome: a review[J]. Marine Science, 2013, 37(8): 130–136. [胡丽萍, 黄晓婷, 张玲玲, 等. 扇贝科染色体研究进展[J]. 海洋科学, 2013, 37(8): 130–136.]
- [11] Chen L Z, Wang Z C. Effect of temperature on the fertilization and embryonic development of *Argopecten irradians Lamarck*, *Patinopecten yessoensis* Jay and their hybrids[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1994, 9(4): 1–9. [陈来钊, 王子臣. 温度对海湾扇贝与虾夷扇贝及其杂交受精、胚胎和早期幼体发育的影响[J]. 大连水产学院学报, 1994, 9(4): 1–9.]
- [12] Yu R H, Bao Z M, Wang Z P, et al. A study on hybridization between scallops *Chlamys farreri* and *Patinopecten yessoensis*[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2006, 36(1): 85–88. [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: 自然科学版, 2006, 36(1): 85–88.]
- [13] Yu T, Yang A G, Zhou L Q, et al. Genetic variation of *Chlamys farreri*, *Patinopecten yessoensis* and their hybrids[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(3): 574–580. [于涛, 杨爱国, 周丽青, 等. 栉孔扇贝、虾夷扇贝及其杂交子代的群体遗传多样性分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(3): 574–580.]
- [14] Bi K, Bao Z M, Huang X T, et al. Cytological observation on cross fertilization and the development of early embryos of *Chlamys farreri*♀×*C. nobilis*♂ with fluorescent microscope[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2005, 35(2): 283–286. [毕克, 包振民, 黄晓婷, 等. 栉孔扇贝♀×华贵栉孔扇贝♂受精及早期胚胎发育过程的细胞学荧光显微观察[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2005, 35(2): 283–286.]
- [15] Sun C S, Bao Z M, Wang S, et al. Primary study on embryogenesis and growth of distant hybrid larvae of *Chlamys farreri* × *C. nobilis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(3): 227–233. [孙长森, 包振民, 王师, 等. 栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)与华贵栉孔扇贝(*C. nobilis*)远缘杂交子代的胚胎发生及幼虫生长发育的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(3): 227–233.]
- [16] Wang C D, Liu B Z, Li J Q, et al. Inter-specific hybridization between *Argopecten purpuratus* and *Argopecten irradians irradians*[J]. Marine Science, 2009, 33(10): 84–87. [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.]
- [17] Feng W, Li J L, Cai D Q, et al. Comparison of development and growth of the F_1 and F_2 hybrids between the *Peruvian* and bay scallop[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(20): 118–124. [丰玮, 李建立, 蔡德泉, 等. 紫扇贝与海湾扇贝杂交后代生长发育的比较研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 118–124.]
- [18] Liu X J, Chang Y Q. The feasibility of the hybridization in four species of scallop and the early development of their offsprings[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2006, 21(4): 346–349. [刘宪杰, 常亚青. 扇贝种间杂交的可行性及幼体早期发育的初步研究[J]. 大连水产学院学报, 2006, 21(4): 346–349.]
- [19] Liu Z G, Wang H, Li Z M, et al. Effect of temperature on growth of *Argopecten irradians concentricus* of various sizes[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(5): 47–52. [刘志刚, 王辉, 栗志民, 等. 温度对不同大小墨西哥湾扇贝生长的影响[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(5): 47–52.]
- [20] He Y C, Zhang F S, Li B Q, et al. Effect of temperature on embryo and larval development of the scallop *Argopecten irradians concentricus* Say[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1999, 30(3): 372–376. [何义朝, 张福绥, 李宝泉, 等. 温度对墨西哥湾扇贝胚胎和幼虫发育的影响[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(3): 372–376.]
- [21] Yang H S, Zhang T, Wang P, et al. Effect of temperature on oxygen consumption and ammonia-N excretion of the Southern Bay scallop *Argopecten irradians concentricus*[J]. Journal of Oceanography, 1998, 20(4): 91–96. [杨红生, 张涛, 王萍, 等. 温度对墨西哥湾扇贝耗氧率及排泄率的影响[J]. 海洋学报, 1998, 20(4): 91–96.]
- [22] You Z J, Lu T X, Ma B, et al. Influences of some environmental factors on growth and survival of *Argopecten irradians concentricus* larvae and juveniles[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 22–29. [尤仲杰, 陆彤霞, 马斌, 等. 几种环境因子对墨西哥湾扇贝幼虫和稚贝生长与存

- 活的影响[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 22–29.]
- [23] You Z J, Chen Q J, Ma B, et al. Artificial large scale breeding of *Argopecten irradians concentricus* in East China Sea[J]. Marine Science, 2001, 25(2): 18–19. [尤仲杰, 陈清建, 马斌, 等. 墨西哥湾扇贝东海海域人工育苗规模化实验[J]. 海洋科学, 2001, 25(2): 18–19.]
- [24] Li Z M, Liu Z G, Liu F S M, et al. Cultured density of new *Argopecten irradians concentricus* line in nursery and adult culture stage[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(6): 1557–1565. [栗志民, 刘志刚, 刘付少梅, 等. 中培期和养成期墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*) 新品系养殖密度的研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1557–1565.]
- [25] Zhang H B, Liu X, Zhang G F, et al. Growth and survival of reciprocal crosses between two bay scallops, *Argopecten irradians concentricus* Say and *A. irradians irradians* Lamarck[J]. Aquaculture, 2007, 272(S1): 88–93.
- [26] Nan L P, 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. [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.]
- [27] Zhang Q Z, Liu Z G, Wang H. Study on adaptability of juveniles of *Chlamys nobilis* (Reeve) to salinity[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2008, 28(1): 40–43. [章启忠, 刘志刚, 王辉. 华贵栉孔扇贝稚贝盐度适应性的研究[J]. 广东海洋大学学报, 2008, 28(1): 40–43.]
- [28] Banks M A, McGoldrick D J, Borgeson W, et al. Gametic incompatibility and genetic divergence of Pacific and Kumamoto oysters, *Crassostrea gigas* and *C. sikamea*[J]. Mar Biol, 1994, 121(1): 127–135.
- [29] Lyu S, Allen S K. Effect of sperm density on hybridization between *Crassostrea virginica*, Gemelin and *C. gigas* (Thunberg)[J]. J Shellfish Res, 1999, 18(2): 459–464.
- [30] Cruz P, Ibarra A M. Larval growth and survival of two *tarina* scallop (*Argopecten circularis*, Sowerby, 1835) populations and their reciprocal crosses[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1997, 212(1): 95–110.
- [31] Lou Y D. Fish Breeding [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 40–63. [楼允东. 鱼类育种学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 40–63.]
- [32] Zhang G F, Liu X. Theory and method of genetic improvement in mariculture mollusks: a review[J]. Journal of Fisheries of China, 2006, 30(1): 130–137. [张国范, 刘晓. 关于贝类遗传改良几个问题的讨论[J]. 水产学报, 2006, 30(1): 130–137.]
- [33] 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. [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.]
- [34] Li Z X, Wang C D. Comparison of growth and path analyses of inbred and cross-bred populations in the bay scallop *Argopecten irradians irradians*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(8): 282–285. [李朝霞, 王春德. 海湾扇贝自交与杂交子代的生长比较和通径分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(8): 282–285.]
- [35] Zhang Y, Wang Z, Yan X, et al. Laboratory hybridization between two oyster species, *Crassostrea gigas* and *Crassostrea hongkongensis*[J]. J Shellfish Res, 2012, 31(3): 619–625.
- [36] Zhang Y, Zhang Y, Wang Z, et al. Phenotypic trait analysis of diploid and triploid hybrids from female *Crassostrea hongkongensis* × male *C. gigas*[J]. Aquaculture, 2014, 434(10): 307–314.
- [37] Palumbi S R. Marine speciation on a small planet[J]. Trends Ecol Evol, 1992, 7(4): 114–118.
- [38] Zhang H, Liu X, Zhang G F, et al. Growth and survival of reciprocal crosses between two bay scallops, *Argopecten irradians concentricus* Say and *A. irradians irradians* Lamarck[J]. Aquaculture, 2007, 272 (2): 88–93.

Reciprocal crosses between *Argopecten irradians concentricus* and *Chlamys nobilis*

PAN Yida, FENG Jie, LIU Xing, WANG Wenjie, PAN Ying

College of Animal Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: In this study, two scallops, *Argopecten irradians concentricus* and *Chlamys nobilis*, were used to investigate the possibility of intergeneric distant hybridization in scallops. Using *A. irradians concentricus* as the female parent and *C. nobilis* as male parent, we established four experimental groups—an orthogonal group MH, a reciprocal group HM, an *A. irradians concentricus* inbred group MM, and a *C. nobilis* inbred group HH—to investigate the fertilization, early development, and growth and survival of reciprocal crosses between the two scallops. The results show that reciprocal crosses of *A. irradians concentricus* and *C. nobilis* can derive hybrids. For reciprocal cross groups MH and HM, the time required for the embryos to develop into D-shaped larva was less than that required for embryos in the inbred groups MM and HH (MH 18 h, HM 19 h, MM 21 h, and HH 22 h). The average fertilization rate and average hatching rate of the MH and HM groups were lower than those of the MM and HH groups. Under different temperature, salinity, and sperm concentration, the fertilization rate and hatching rate of reciprocal cross groups MH and HM were lower than those of the MM and HH groups. A comparison of the growth of planktonic larvae among four experimental groups from day 2 to day 11 revealed that the shell length and height of the MH and HM groups were significantly higher than those of the MM and HH groups, with both showing obvious heterosis ($P < 0.01$). Experiments designed to predict the larvae of the orthogonal and reciprocal groups on the basis of the inbred group in shell length and height revealed that the growth tendency of hybrid scallop can be predicted using the BP neural network model method, and the error rate of the predicted values was less than 4%.

Key words: *Argopecten irradians concentricus*; *Chlamys nobilis*; reciprocal crosses; embryo development; larval growth; BP neural network; comparison of prediction

Corresponding author: PAN Ying. E-mail: yingpan@gxu.edu.cn