

文章编号: 1000-0615(2018)11-1711-08

DOI: 10.11964/jfc.20171011011

菲律宾蛤仔福建与广东群体的双列杂交

郭香, 郑雅友, 曾志南*, 巫旗生, 宁岳, 祁剑飞

(福建省水产研究所, 福建厦门 361000)

摘要: 2015年9月–12月, 以菲律宾蛤仔福建养殖群体和广东野生群体子一代为亲本, 开展了双列杂交实验, 建立了两个自交组和两个杂交组, 研究了杂交子代幼虫和稚贝的生长与存活的杂种优势。结果显示, 各实验组均有较高的受精率和孵化率, 但无显著差异。总体上, 幼虫期的生长受母体效应影响显著, 稚贝期的生长杂交效应主要受交配方式影响。相反, 幼虫期的存活受配对方式影响最显著, 稚贝期的存活受卵源影响显著。在幼虫期, 杂交组与自交组在生长和存活方面差异不显著。在稚贝期, 生长表现出明显的杂种优势, 壳长和壳高在30日龄以后, 正反交组的平均生长速率显著快于自交组。在40日龄时, 壳高和壳长总杂交优势值达到最大, 分别为25.64和27.00。这可能是因为杂种优势的表达具有时期差异性。在幼虫期, 福建自交组表现出最高的存活率, 为 $36.45\% \pm 1.85\%$; 稚贝期, 广东自交组存活率最高, 为 $52.27\% \pm 2.13\%$ 。在幼虫期和稚贝期的存活率方面, 未观测到杂种优势, 这可能是由于两个杂交亲本群体与存活相关的基因频率无差异或者检测次数较少所致。

关键词: 菲律宾蛤仔; 地理群体; 生长; 杂种优势; 存活

中图分类号: S 968.3

文献标志码: A

菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)是我国四大养殖贝类之一, 广泛分布于我国南北沿海地区, 其生长快、适应性强(广温、广盐)、养殖周期短, 是一种适合高密度养殖的优良贝类。菲律宾蛤仔个体虽小, 但肉质鲜美, 可生食, 也可加工为即食食品或海鲜调味剂, 是一种深受大众喜爱的高蛋白、低脂肪的海产品。我国是蛤类养殖大国, 2014年全国蛤类年产量为397万t, 约占全国海水养殖贝类总产量的30%^[1], 其中菲律宾蛤仔是最重要的组成部分。自从20世纪八十年代福建菲律宾蛤仔池塘人工育苗技术的突破, 21世纪初垦区人工育苗技术的推广, 实现了菲律宾蛤仔苗种产业化生产, 目前全国90%以上的苗种都产自福建省。但是, 近年来, 随着菲律宾蛤仔养殖规模的快速扩大, 开始出现养殖的蛤仔生长慢、出肉率低、夏季死

亡率高等问题, 严重制约了其养殖产业的健康发展。

杂交育种是在动植物遗传改良中广泛应用的手段之一, 利用两个遗传背景不同的亲本, 通过实现优良显性基因的互补, 增加群体中的杂合子频率, 获得在生长、存活或繁殖等方面表现出杂种优势的杂交子代^[2]。目前, 贝类的杂交育种研究主要集中在牡蛎、扇贝、鲍鱼和珠母贝^[3]上。绝大多数的研究都表明, 杂交子代在生长速率和存活力上都优于双亲或者亲本一方。作为重要的海水养殖贝类之一, 菲律宾蛤仔的杂交育种研究也备受重视, 大连水产学院菲律宾蛤仔课题组多次报道了不同家系菲律宾蛤仔的杂交实验^[4-7], 其中高鑫等^[8]开展了菲律宾蛤仔南北方养殖群体的双列杂交实验。但不同地理群体菲律宾蛤仔的杂交育种研究鲜有报道。

收稿日期: 2017-10-26 修回日期: 2018-03-08

资助项目: 国家科技基础条件平台建设运行项目(2017DKA30470); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-49)

通信作者: 曾志南, E-mail: xmznn@sina.com

迄今,多种分子标记技术如AFLP^[9]、微卫星^[10]和COI^[11-12]等被用于菲律宾蛤仔种群遗传学研究,结果都表明中国沿海菲律宾蛤仔种群可以划分为不同的谱系。其中, Mao等^[11]基于线粒体COI标记的研究,将中国沿海菲律宾蛤仔划分为3个谱系,且遗传结构差异极显著($P < 0.01$),需要指出的是,在东海和南海同时存在2个谱系,这种遗传差异可能是由更新世冰期引起的海平面降低造成西北太平洋的边缘海隔离导致的。在菲律宾蛤仔养殖过程中,经常出现夏季高温死亡现象,因此培育生长快、抗逆性强的优良新品种是保证菲律宾蛤仔养殖业健康可持续发展的关键。在生产中,已观测到广东饶平群体具有更佳的抗逆性,而福建本地群体生长速率更快。本研究以生长快的福建群体和抗逆性高的广东群体为材料,构建菲律宾蛤仔双列杂交群体,分析比较两个群体杂交幼虫和稚贝的早期生长发育情况,评定其杂交效应,旨在推动菲律宾蛤仔的良种选育研究,为实现蛤仔养殖业的健康可持续发展奠定基础。

1 材料与方法

1.1 亲贝来源

2015年9月,从广东饶平同片海域采集1龄的菲律宾蛤仔广东野生群体(养殖子1代)和福建养殖群体各200个作为亲贝。

1.2 实验设计

于2015年9月18日将性腺成熟的亲贝运至福建漳浦泽康水产育苗场进行催产和人工育苗。采用含0.01 mg/L氨水的水浸泡蛤仔0.5~1 h后,待贝壳张开挑选并分开雌雄,阴干8 h后诱导产卵排精。选取来自广东(G)和福建群体(F)的菲律宾蛤仔群体作为亲本,分别收集精卵,实验设计采用双列杂交法,构建GG和FF两个自交组,GF和FG两个正反交组,共4个实验组。采用150目筛绢网过滤去除杂质,然后将受精卵转入容量为10 L的水桶中孵化,孵化密度为30~40个/mL,孵化期间持续充气。在水温29.5 °C、盐度29、pH 8.0的条件下,受精卵经4.5 h左右发育为担轮幼虫,经20 h左右发育为D形幼虫。

1.3 幼虫培育

在10 L的水桶中培育幼虫,密度为7~8个/mL,

每个实验组设3个平行,培育用水为沙滤海水,幼虫阶段不换水。每日投饵2次,投饵量视幼虫摄食情况而定。幼虫培育期间,水温为28.2~29.5 °C, pH为7.80~8.24,盐度为29。在培育期间,定期对幼虫养殖密度进行监测调整,以确保各个实验组的幼虫密度保持一致。实验过程中,实验器具严格隔离,并在淡水中浸泡5 min以上,彻底杀死所有残留幼虫,以防止各实验组的相互污染。

1.4 稚贝培育

幼虫培育9 d后出现次生壳,进入壳顶后期,开始变态附着,用150目筛绢网袋收集幼虫,移入同一稚贝培育池的不同网箱中,网箱底部铺有1 mm厚的经高温消毒并用150目筛绢网过滤的海泥。稚贝培育期间,水温为23~28 °C, pH为7.80~8.24,盐度为29。幼虫变态后附底,营底栖生活,摄食量增加,日投饵2~3次,依摄食情况酌情确定,每日换水50%。

1.5 指标测定

卵径、幼虫大小和壳长小于300 μm的稚贝采用显微镜测量,壳长为2~5 mm的稚贝用直尺测量,所有测量数据均用数码相机拍摄记录,然后用软件 DIGIMIZER 3.2.1.0 (<http://www.Digimizer.com>)测量。亲贝总重采用电子天平称量(精度为0.01 g)。每个平行组随机取50个个体进行测量。采用Excel计算各性状均值(mean)和标准差(SD)。

受精率为卵裂胚胎数与总卵数之比;孵化率为初始D形幼虫数与受精卵数之比。幼虫存活率以D型幼虫数作为100%。室内稚贝培育期存活率以刚刚完成变态稚贝数作为100%。

1.6 杂种优势的计算

杂交子代性状的杂种优势(Heterosis)计算参照以下公式^[13]:

$$H(\%) = \frac{(GF + FG) - (GG + FF)}{GG + FF} \times 100 \quad (1)$$

$$HGF(\%) = \frac{GF - GG}{GG} \times 100 \quad (2)$$

$$HFG(\%) = \frac{FG - FF}{FF} \times 100 \quad (3)$$

式中, G 、 F 分别代表广东和福建群体, GG 、 GF 、 FG 、 FF 分别表示各实验组的子代在同一日龄的表型值。公式(1)表示中亲杂种优势;公式

(2)、(3)表示正反交组的杂种优势。

1.7 数据处理

各实验组间的数据比较采用SPSS 18.0软件^[14]中的单因素方差分析方法完成, 差异显著性设置为 $P<0.05$, 使用Excel作图。利用双因素方差分析模型检测卵源和配对方式对个体生长和存活的影响^[15]:

$$Y_{ijk} = u + EO_i + MS_j + (EO \times MS)_{ij} + e_{ijk}$$

式中, Y_{ijk} 表示 k 个重复下, 第 i 个卵源, 第 j 种配对方式下的壳长(或存活率), u 为总体均值;

EO_i 为壳长(或存活率)的卵源效应($i=1, 2, 3$), MS_j 为壳长(或存活率)的配对效应($j=1, 2, 3$), $(EO \times MS)_{ij}$ 表示卵源和配对方式的交互影响, e_{ijk} 为随机观察误差($k=1, 2, 3$)。

2 结果

2.1 两个1龄群体亲本形态比较

两个1龄群体的亲本在壳长和总重上存在显著差异($P<0.05$)。福建群体的卵径为 $(70.59 \pm 2.12) \mu\text{m}$, 大于广东群体的 $(68.14 \pm 1.86) \mu\text{m}$, 二者差异显著($P<0.05$)(表1)。

表 1 菲律宾蛤仔两个亲本群体的形态比较

Tab. 1 Morphological comparison of two parental stocks of *R. philippinarum*

群体 populations	壳长/mm shell length	壳高/mm shell height	壳宽/mm shell width	总重/g total weight	卵径/ μm egg diameter
广东(G) Guangdong (G)	$32.15 \pm 3.64^*$	21.16 ± 2.61	14.10 ± 1.88	$6.07 \pm 2.19^*$	$68.14 \pm 1.86^*$
福建(F) Fujian (F)	$28.73 \pm 3.59^*$	20.02 ± 2.98	13.54 ± 2.24	$5.40 \pm 2.00^*$	$70.59 \pm 2.12^*$

Notes: *. $P<0.05$

2.2 受精率和D型幼虫孵化率

自交组和杂交组的受精率均在99%以上, 孵化率约为65%。4个实验组的受精率和孵化率均无显著差异($P>0.05$)(表2)。

表 2 菲律宾蛤仔各实验组的受精率和孵化率

Tab. 2 The rates of fertilization and hatching for different experimental groups %

实验组 experimental groups	受精率 fertilized rate	孵化率 hatching rate
GG	99.18 ± 0.83	65.81 ± 5.42
FF	99.48 ± 0.46	66.13 ± 2.53
GF	99.23 ± 0.13	66.52 ± 3.46
FG	99.42 ± 0.35	65.78 ± 4.67

2.3 幼虫的生长、存活与杂种优势

在浮游幼虫期, 生长尚未表现出明显的杂种优势。仅在5日龄时, 正反交组的壳长均优于福建自交组, 且差异显著($P<0.05$); 杂交组FG的壳长显著优于广东自交组($P<0.05$)(表3)。在3日和8日龄时, 自交组和杂交组的壳长和壳高差异均不显著($P>0.05$)(表4)。4个实验组FG、GG、GF和FF幼虫在第8天的存活率分别为 $30.78\% \pm 3.42\%$ 、 $32.81\% \pm 1.58\%$ 、 $35.66\% \pm 1.93\%$ 和 $36.45\% \pm$

1.85%。方差分析表明, 幼虫期的壳长和壳高均受卵源(母本效应)影响最大, 配对方式以及卵源和配对方式的交互作用影响均较小(表5)。幼虫8日龄时, 存活率受配对方式影响极显著, 其方差值为0.051($P=0.000$)。

2.4 稚贝的生长、存活与杂种优势

室内稚贝培育期间, 随着日龄的延长, 生长表现出明显的杂种优势。壳长和壳高在30日龄以后, 正反交组的平均生长速率显著快于自交组($P<0.05$)(表6)。4个实验组FF、FG、GF和GG在幼虫第40天的存活率分别为 $38.72\% \pm 1.62\%$ 、 $40.68\% \pm 1.85\%$ 、 $45.75\% \pm 3.26\%$ 和 $52.27\% \pm 2.13\%$ 。

稚贝室内培育期, 除了20日龄时, GF组的壳高表现为负杂种优势($HGF=-8.94$), 其他均表现为正杂种优势。总体上, 随着时间的推移, 壳高和壳长的总杂种优势逐渐增大, 在40日龄时, 壳高和壳长总杂种优势值达到最大, 分别为25.64和27.00(表7)。但40日龄时, 存活率的总杂种优势为-0.05。方差分析表明, 稚贝的生长受配对方式的影响较大, 卵源和配对方式的交互作用其次, 卵源(母本效应)的影响最小(表8)。40日龄时, 稚贝的存活受卵源影响最显著($MS=0.140, P=0.000$)。

表 3 菲律宾蛤仔幼虫各实验组壳长和壳高的生长比较
Tab. 3 Comparison of larval shell length and shell height among different experimental groups during planktonic period

实验组 groups	性状 traits	幼虫日龄/d age of larvae		
		3	5	8
GG	壳长 shell length	165.31±15.35	177.60±19.23 ^A	205.86±17.26
	壳高 shell height	144.54±12.26	165.15±17.83	186.65±16.19
FF	壳长 shell length	162.62±15.47	174.06±16.39 ^a	201.07±20.56
	壳高 shell height	141.33±21.18	165.46±15.94	183.85±24.43
GF	壳长 shell length	168.58±16.11	186.04±15.31 ^b	203.64±28.14
	壳高 shell height	147.10±14.66	160.97±14.59	179.53±28.18
FG	壳长 shell length	167.41±17.26	190.16±15.83 ^{bb}	202.46±19.77
	壳高 shell height	144.96±16.34	162.78±15.67	184.47±16.16

注：同列标注不同字母表示组间差异显著，大小写表示不同比较组合，(P<0.05)，下同
 Notes: different superscript letters within the same column indicate significant difference among means, capital and lowercase letters indicate different combinations among means, (P<0.05), the same below

表 4 杂交组幼虫壳长和壳高的杂种优势
Tab. 4 Heterosis of larval shell length and shell height during planktonic period

性状 traits	幼虫日龄/d age of larvae	%		
		H	HGF	HFG
壳高 shell height	3	1.16	1.08	1.62
	5	1.48	-1.45	5.81
	8	-0.94	-3.07	2.21
壳长 shell length	3	0.98	0.57	1.34
	5	5.88	4.75	9.21
	8	0.27	-0.42	1.87

表 5 幼虫阶段卵源(EO)和交配方式(MS)对壳长和壳高影响的方差分析

Tab. 5 Two-Way analysis of variance for the effects of egg origin and mating strategy on shell height and shell length during larval stage

来源 source	自由度 df	壳高 shell height	壳长 shell length		
		均方差MS mean square	P	均方差MS mean square	P
第3天 3rd day					
EO	2	0.006	0.092	0.002	0.396
MS	2	0.001	0.441	0.045	0.000
EO×MS	4	0.006	0.024	0.016	0.000
第5天 5th day					
EO	2	0.009	0.048	0.039	0.000
MS	2	0.009	0.050	0.000	0.757
EO×MS	4	0.007	0.042	0.082	0.000
第8天 8th day					
EO	2	0.001	0.661	0.001	0.661
MS	2	0.004	0.269	0.064	0.000
EO×MS	4	0.004	0.267	0.001	0.693

3 讨论

3.1 两个亲本群体的比较

杂交育种是自然界中普遍存在的生物现象，它通过杂交基因异性的双亲，促使基因组重组、互作和累积，创造各种新变异，为育种提供了更多的材料选择^[16]。尽管现代生物技术已经在育种领域中大量应用，但杂交育种仍然是迄今应用最为广泛、效果最为显著的育种手段之一^[17]。在本研究中，菲律宾蛤仔福建和广东群体在卵径、壳长和总重上存在显著差异(P<0.05)，并且广东群体幼虫变态时间比福建群体平均长3~4 d，说明存在显著的地理群体间差异。同时，实验中也观测到两个自交组和两个杂交组的受精率和孵化率均较高，分别约为

99%和65%，且组间差异不显著(P>0.05)。这表明菲律宾蛤仔东海和南海不同地理群体间进行杂交时，不存在种间杂交常出现的受精时配子不亲和和胚胎发育障碍。

3.2 杂种优势

人工杂交所获得的子代一般在生长性能、抗逆性、适应性或者繁殖力方面优于亲本，即

表 6 菲律宾蛤仔稚贝各实验组壳长和壳高的生长比较

Tab. 6 Comparison of juvenile shell length and shell height among different experimental groups

实验组 groups	性状 traits	稚贝日龄/d age of juvenile			
		10	20	30	40
GG	壳长 shell length	312.54±54.16 ^{ba}	317.71±46.85 ^a	986.44±269.78 ^a	2 094.36±634.68 ^b
	壳高 shell height	347.94±56.25 ^b	343.75±58.33 ^a	845.83±224.25 ^b	1 587.46±476.48 ^b
FF	壳长 shell length	325.25±61.46 ^b	312.50±56.26 ^a	913.53±259.38 ^a	1 901.36±498.51 ^b
	壳高 shell height	292.71±55.52 ^{ab}	281.26±51.46 ^{ba}	777.11±213.54 ^{ba}	1 451.86±358.68 ^b
GF	壳长 shell length	410.42±92.68 ^a	370.08±80.20 ^{ab}	1 073.96±248.95 ^b	2 158.61±607.52 ^b
	壳高 shell height	359.47±77.25 ^{ba}	309.36±80.07 ^b	915.63±208.33 ^b	1 611.62±456.63 ^b
FG	壳长 shell length	359.36±58.34 ^{bb}	364.25±61.04 ^{ab}	1 182.29±273.96 ^{bb}	2 672.25±464.28 ^a
	壳高 shell height	324.06±55.52 ^b	333.75±57.29 ^b	971.88±215.61 ^{ab}	2 102.82±663.12 ^a

表 7 杂交组稚贝壳高和壳长的杂种优势
Tab. 7 Heterosis of juvenile shell height and shell length

性状 traits	日龄/d age of juvenile	shell length %		
		H	HGF	HFG
壳高 shell height	10	8.61	6.49	14.03
	20	3.66	-8.94	21.77
	30	20.86	13.98	33.66
	40	25.64	13.21	56.64
壳长 shell length	10	22.38	34.33	14.10
	20	17.84	18.27	19.57
	30	23.90	15.39	40.15
	40	27.00	18.91	34.36

表 8 稚贝阶段卵源(EO)和交配方式(MS)对壳高和壳长影响的方差分析

Tab. 8 Two-Way analysis of variance for the effects of egg origin and mating strategy on shell height and shell length during juvenile stage

来源 source	自由度 df	壳高 shell height		壳长 shell length	
		均方差MS mean square	P	均方差MS mean square	P
第10天 10th day					
EO	2	0.186	0.000	0.017	0.148
MS	2	0.040	0.019	0.317	0.000
EO×MS	4	0.080	0.000	0.132	0.000
第20天 20th day					
EO	2	0.029	0.049	0.002	0.603
MS	2	0.007	0.357	0.201	0.000
EO×MS	4	0.078	0.000	0.068	0.000
第30天 30th day					
EO	2	0.001	0.737	0.001	0.851
MS	2	0.249	0.000	4.346	0.000
EO×MS	4	0.100	0.000	0.131	0.000
第40天 40th day					
EO	2	0.080	0.040	0.061	0.037
MS	2	0.330	0.000	0.016	0.290
EO×MS	4	0.222	0.000	0.026	0.141

“杂种优势”^[18]。杂种优势的产生是显性效应、超显性效应和上位效应共同作用的结果,其大小与父母本群体的基因频率差和显性程度相关^[19]。实验采用的广东亲本群体具有更强的抗逆性,夏季高温时,个体存活率更高,而福建亲本群体生长速率更快,但夏季高温死亡率高。本研究拟通过种群间的杂交,选育出生长快、耐高温的杂交优势组合,促进菲律宾蛤仔养殖产业的健康发展。

双因素方差分析表明,在幼虫培育期,卵源对幼虫生长影响最大,说明存在显著的母体效应($P < 0.05$)。本实验中,杂交组和自交组在幼虫阶段生长差异不明显,未检测到显著的杂种优势,暗示了母体效应可能掩盖了杂种优势的存在。这一现象在其他贝类,如硬壳蛤(*Mercenaria mercenaria*)^[20]和卡塔琳娜扇贝(*Argopecten circul-*

aris)^[21]的杂交研究中也观测到。这可能是由于母本的卵径差异显著,导致其为子代在幼虫前期的生长提供的营养亦存在显著差异。但是,

在稚贝培育后期,两个杂交组在生长方面均表现出明显优于亲本的杂种优势($P < 0.05$)。杂交组 and 自交组的差异在生长后期体现,这可能因为基因的差异表达需要较长的过程才能体现出来,即杂种优势的表现具有时期差异性。在玉米和水稻等农作物中,已有学者发现,与产量性状和杂种优势的形成密切相关的基因具有时期差异性^[22]。

存活率在幼虫和稚贝期的优势均为负值,未表现出杂种优势,自交组和杂交组差异不显著。广东群体的抗高温性能优于福建群体,但是在稚贝期,正反交组的存活率仅优于亲本之一福建群体,低于广东亲本组,总杂交优势均为负值,未表现出杂种优势。同时,双因素方差分析也表明稚贝的存活受卵源(母体效应)影响最大,这暗示了可以使用广东群体作为母本提高稚贝的存活率。杂种优势的大小与父母本群体的基因频率差异密切相关,理论上,当亲本群体在某一经济性状上的基因频率相差越大,子代在这一性状上的杂交优势才会愈加显著。如果两个杂交群体的基因频率没有差异,杂交子代将不会表现出杂种优势^[19]。本研究中,未观测到杂交组在幼虫期或者稚贝期具有存活总杂种优势,这可能归因于两个杂交亲本群体与存活相关的基因频率无差异,而且存活率的检测次数较少,需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业年鉴-2015[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 32-33.
Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture. China Fisheries Yearbook 2015[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 32-33(in Chinese).
- [2] 官俊良, 张跃环, 苏家齐, 等. 两个地理群体香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)杂交子代早期生长发育的杂种优势研究[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(1): 182-187.
Guan J L, Zhang Y H, Su J Q, et al. Heterosis in early growth stage of Hong Kong oyster *Crassostrea hongkongensis* hybridids from two geographical populations[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(1): 182-187(in Chinese).
- [3] 张玉勇, 常亚青, 宋坚. 杂交育种技术在海水养殖贝类中的应用及研究进展[J]. 水产科学, 2005, 24(4): 39-41.
Zhang Y Y, Chang Y Q, Song J. Application and recent research advancement of cross-breeding in marine shellfish culture[J]. Fisheries Science, 2005, 24(4): 39-41(in Chinese).
- [4] 闫喜武, 张跃环, 霍忠明, 等. 不同壳色菲律宾蛤仔品系间的双列杂交[J]. 水产学报, 2008, 32(6): 864-875.
Yan X W, Zhang Y H, Huo Z M, et al. The study on diallel cross of different shell color strains of Manila clam *Ruditapes philippinarum*[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(6): 864-875(in Chinese).
- [5] 闫喜武, 张跃环, 金晶宇, 等. 大连群体两种壳型菲律宾蛤仔的双列杂交[J]. 水产学报, 2009, 33(3): 389-395.
Yan X W, Zhang Y H, Jin J Y, et al. The diallel cross of Manila clam *Ruditapes philippinarum* of two shell shapes of Dalian population[J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(3): 389-395(in Chinese).
- [6] 张跃环, 闫喜武, 王艳, 等. 不同壳型菲律宾蛤仔杂交家系的建立及早期生长发育比较[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(2): 71-77.
Zhang Y H, Yan X W, Wang Y, et al. Establishment of hybrid families of Manila clam *Ruditapes philippinarum* with different shell shapes and comparison of their early stage development[J]. Progress in Fishery Sciences, 2009, 30(2): 71-77(in Chinese).
- [7] 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.
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(in Chinese).
- [8] 高鑫, 闫喜武, 张辉, 等. 蛤仔南北方养殖群体杂交子代早期生长发育的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2013, 28(1): 39-43.
Gao X, Yan X W, Zhang H, et al. Early growth and development of hybrid Manila clam *Ruditapes philippinarum* cultured in north and south China[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2013, 28(1): 39-43(in Chinese).
- [9] Liu X Q, Bao Z M, Hu J J, et al. AFLP analysis revealed differences in genetic diversity of four natural populations of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 26(1): 150-158.
- [10] Nie H T, Niu H B, Zhao L Q, et al. Genetic diversity and

- structure of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) populations from Liaodong peninsula revealed by SSR markers[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, 59: 116-125.
- [11] Mao Y L, Gao T X, Yanagimoto T, *et al.* Molecular phylogeography of *Ruditapes philippinarum* in the Northwestern Pacific Ocean based on COI gene[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, 407(2): 171-181.
- [12] Sekine Y, Yamakawa H, Takazawa S, *et al.* Geographic variation of the COX1 gene of the short-neck clam *Ruditapes philippinarum* in coastal regions of Japan and China[J]. *Venus: Journal of the Malacological Society of Japan*, 2006, 65(3): 229-240.
- [13] Zheng H P, Zhang G F, Guo X M, *et al.* Heterosis between two stocks of the bay scallop, *Argopecten irradians irradians* Lamarck (1819)[J]. *Journal of Shellfish Research*, 2006, 25(3): 807-812.
- [14] Coakes S J, Steed L. SPSS Version 14.0 for Windows: Analysis Without Anguish[J]. Milton: John Wiley & Sons, 2007.
- [15] Zheng H P, Zhang G F, Guo X M, *et al.* Inbreeding depression for various traits in two cultured populations of the American bay scallop, *Argopecten Irradians Irradians* Lamarck (1819) introduced into China[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 364(1): 42-47.
- [16] 邓华凤, 何强, 舒服, 等. 中国杂交粳稻研究现状与对策[J]. *杂交水稻*, 2006, 21(1): 1-6.
- Deng H F, He Q, Shu F, *et al.* Status and technical strategy on development of Japonica hybrid rice in China[J]. *Hybrid Rice*, 2006, 21(1): 1-6(in Chinese).
- [17] 王清印. 海水养殖生物的细胞工程育种[M]. 北京: 海洋出版社, 2007: 38-47.
- Wang Q Y. Cell Engineering Breeding of Marine Aquaculture Organisms[M]. Beijing: China Ocean Press, 2007: 38-47 (in Chinese).
- [18] 张媛媛, 杨艳华, 陈克平. 杂种优势的研究进展[J]. *生命科学研究*, 2016, 20(5): 447-454.
- Zhang Y Y, Yang Y H, Chen K P. Advances in heterosis research[J]. *Life Science Research*, 2016, 20(5): 447-454(in Chinese).
- [19] 王金玉, 陈国宏. 数量遗传与动物育种[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004: 107-110.
- Wang J Y, Chen G H. Quantitative Genetics and Animal Breeding[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004: 107-110 (in Chinese).
- [20] Manzi J J, Hadley N H, Dillon R T J. Hard clam, *Mercenaria mercenaria*, broodstocks: Growth of selected hatchery stocks and their reciprocal crosses[J]. *Aquaculture*, 1991, 94(1): 17-26.
- [21] 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.
- [22] Wang X J, Cao H H, Zhang D F, *et al.* Relationship between differential gene expression and heterosis during ear development in Maize (*Zea mays* L.)[J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2007, 34(2): 160-170.

The diallel cross of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) populations from Fujian and Guangdong Provinces

GUO Xiang, ZHENG Yayou, ZEN Zhinan*, WU Qisheng, NING Yue, QI Jianfei

(Institute of Fisheries of Fujian, Xiamen 361000, China)

Abstract: In 2015, from September to December, a diallel cross was conducted using two populations of Manila clam *Ruditapes philippinarum* from cultured Fujian stock and wild Guangdong stock which was F₁ progeny. The growth, survival rate and heterosis at larval and juvenile periods were compared among the two reciprocal hybrid crosses and two parental crosses. The results indicated that all the four experimental groups had high fertilization and hatching rates, and did not show significant difference between each other. Totally, at larval period, maternal origin had significant effect on growth. While mating strategy was the major factor for growth hybrid effect during juvenile. In contrast, at larval period, mating strategy had significant effect on survival, while maternal origin was the major factor for survival during juvenile. This showed that gamete incompatibility and embryonic development disorders did not exist in interspecific hybridization between different geographical populations of *R. philippinarum*. At larval period, no growth or survival heterosis was observed between two hybrid crosses and the two parental groups. In contrast, at juvenile period, the growth performances of two hybrid crosses were superior to the two parental groups, showing heterosis in the characteristics of shell height and shell length after 30 days of age. Especially, at 40 days of age, heterosis values of shell height and shell length reached maximum, which were 25.64 and 27.00, respectively. This perhaps attributed to development difference of expression of heterosis. For survival rate, at larval period, the Fujian parental cross had the best performance which was 36.45%±1.85%. And the juvenile survival rate of the Guangdong parental cross was 52.27%±2.13%, which was higher than other three experimental crosses. In total, survival heterosis was not observed during the study. This was attributed to the fact that survival-related gene frequency of two geographic parental populations had no difference or detection was less often.

Key words: *Ruditapes philippinarum*; geographic population; growth; heterosis; survival

Corresponding author: ZEN Zhinan. E-mail: xmzzn@sina.com

Funding projects: National Science and Technology Infrastructure Platform Construction (2017DKA30470); Special Funds for the Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-49)