

长牡蛎 3 种壳色家系间杂交子代生长和存活比较

葛建龙, 李琪*, 于红, 孔令锋, 于瑞海

(中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003)

摘要: 为了利用杂种优势培育长牡蛎优良新品种, 实验以 3 种不同壳色长牡蛎家系(白色/W、黑色/B、紫色/P)为材料, 采用 3×3 完全双列杂交法, 建立了 3 个自交组合和 6 个正反杂交组合, 分析了各实验组幼虫期和养成期的生长、存活以及杂交子代的杂种优势。结果表明, 浮游幼虫期, 杂交组 PB 表现出显著的生长优势; 与自交组相比, 各杂交组均有着较高的幼虫存活率; 在幼虫存活率方面, 所有杂交组均有较高的杂种优势率。在养成期, 紫壳色自交组的壳高显著大于白壳色和黑壳色自交组; 6 个杂交组中, PB 的壳高生长最快, BP 次之, PW、WP 的生长最慢; 各杂交组与自交组的成活率差异均不显著; 杂交组 BP 及其反交组 PB 的壳高、壳长、总重和存活率的杂种优势率分别介于 3.71%~15.27%、-2.00%~13.10%、11.23%~41.56%、-2.77%~9.83%, 其他 4 个杂交组在整个养成阶段没有表现出杂种优势。

关键词: 长牡蛎; 壳色; 杂交; 杂种优势

中图分类号: Q 321; S 968.3

文献标志码: A

长牡蛎(*Crassostrea gigas*)又称太平洋牡蛎, 是一种世界性的水产养殖种类, 在世界所有水产养殖动物中, 长牡蛎的产量居于首位^[1]。我国是牡蛎养殖大国, 2012 年全国牡蛎的总产量超过 394 万 t, 占我国贝类养殖总产量的 32.7%^[2], 取得了显著的经济效益和社会效益。随着养殖规模的扩大和养殖环境的变化, 长牡蛎开始出现生长慢、死亡率增高等性状退化现象, 严重影响了牡蛎养殖业的发展。从长远来看, 深入研究牡蛎的种质资源, 培育生长快、品质好的长牡蛎优良品种是确保牡蛎养殖产业可持续发展的关键。

杂交是动植物遗传改良的重要手段之一, 其主要作用是直接利用杂种优势。杂种优势是指两个遗传背景不同的亲本杂交产生的杂种 F₁ 在生长势、生活力、生殖力、抗逆性、产量和品质上比亲本的一方或双亲优越的现象^[3]。目前, 在海湾扇贝(*Argopecten irradians* Lamarck)^[4-5]、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)^[6]、皱纹盘鲍

(*Haliotis discus hannai*)^[7]、杂色鲍(*Haliotis diversicolor*)^[8]等多种经济贝类中都开展了杂交育种研究, 绝大多数研究表明了杂种 F₁ 在生长速度和生活力方面优于双亲或亲本一方。牡蛎的杂交育种是贝类杂交育种中研究最早、最多的, Newkirk^[9]报道了美洲牡蛎(*C. virginica*) 4 个种群杂交子代在存活和生长方面优于亲本; Mallet 等^[10-11]研究了美洲牡蛎地理种群间杂交子代的存活及生长情况, 分析了种群间配合力; 在国内, 孔令锋等^[12]和宋盛亮等^[13]分别利用长牡蛎第一代和第二代群体选育材料, 研究了不同地理群体的杂交效应。然而这些研究多以牡蛎种群间的杂交为主, 很少有利用近交系进行杂交的研究。

贝类具有丰富的壳色多态性, 大量的研究表明, 贝类壳色是受遗传控制的^[14-17], 同时也发现贝类壳色与其生长、存活等性状相关^[18-20], 丰富的壳色多态性为贝类的遗传育种提供了宝贵材料。长牡蛎的壳色多态性主要表现为着色程度的

收稿日期:2014-08-21 修回日期:2015-01-07

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA10A405-6);国家自然科学基金(31372524);山东省农业良种工程

通信作者:李琪, E-mail:qili66@ouc.edu.cn

差异及颜色类型变异,长牡蛎左壳着色程度具有很高的遗传力,可以进行有效的人工选育^[21-22]。丛日浩等^[23]比较了不同壳色长牡蛎品系的生长发育情况,结果显示长牡蛎壳色与其生长和存活性状显著相关,与白壳色和黑壳色家系相比,紫壳色家系有着显著的生长优势。这表明不同壳色长牡蛎家系间存在遗传差异,利用不同壳色长牡蛎家系进行杂交有可能产生杂种优势。

本研究利用3种壳色长牡蛎的第二代近交家系进行了杂交实验,比较了各杂交组与自交组幼虫期、养成期的生长、存活,研究了杂交后代的杂种优势,以期筛选出有优势的交配组合,为利用杂种优势培育优良苗种提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 亲贝的来源

2010年从山东省乳山养殖的长牡蛎中筛选出了不同的壳色类型,并构建了第一代全同胞家系,2011年继续构建了第二代全同胞家系。2012年4月下旬,从山东乳山海区养殖的3种壳色长牡蛎(白色、黑色、紫色)的第二代全同胞家系中,挑选个体较大、壳型规则、壳色性状优良的个体作为亲贝,于室内进行人工促熟。

1.2 实验设计

交配设计采用完全双列杂交法,建立了9个不同的交配组合,以字母W、B、P分别表示白色、黑色、紫色3种壳色长牡蛎家系,即建立3个自交组合WW、BB、PP,6个正反杂交组合WB、BW、WP、PW、BP、PB,每个组合中雌亲在前。共建立3个重复组。

1.3 人工授精,孵化及幼虫培育

2012年6月初,亲贝性腺发育成熟,采用解剖法收集精卵,进行人工授精。受精卵置于100L的塑料桶中孵化,孵化密度20~30个/mL,孵化过程中持续微充气。当胚胎发育至D形幼虫时,用300目筛绢选优,置于新的100L塑料桶中进行幼虫培育,幼虫初始密度6个/mL,随幼虫生长定期调整,使各交配组密度保持一致。培育期间水温23~25℃,持续充气,每天换水1次,前期换水1/3,随幼虫生长,逐渐增大换水量,壳顶中期和投附着基前清洗培育容器。饵料以等鞭金藻(*Isochrysis galbana*)为主,后期辅助投喂扁藻(*Platymonas* sp.)和小球藻(*Chlorella vulgaris*),

投饵量根据幼虫摄食和水中残饵情况确定。各实验家系投饵、换水、充气等管理一致。幼虫培育22d后陆续出现眼点,开始投放栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)壳制成的附着基,当每片附着基附着约20个稚贝时结束采苗。

1.4 养成管理

将附着稚贝装入扇贝笼,放于室外沉淀池中暂养2个月,以避免自然海区野生牡蛎苗的污染。2012年9月,调整扇贝笼每层稚贝数量后,将所有稚贝放至山东乳山海阳所海区进行养成,各实验组放养密度和水层深度等环境条件保持一致,养成期间定期进行数据测量以及分苗维护。

1.5 取样和测量

在幼虫期第1、5、10、15、20天随机从每组取样30个,在显微镜下用目微尺测量壳高、壳长,同时测定幼虫密度,计算第5、10、15、20天的存活率。养成期,在第50、110、170、260、350天,各实验组取样30个,用游标卡尺(精度0.02mm)测量壳高、壳长,用电子天平(精度0.01g)称量总重。幼虫存活率根据初始密度、调整后密度及测量密度推算得出,稚贝存活率为当次测量个体数与附着变态稚贝数的百分比。

1.6 数据分析

采用SPSS 16.0统计软件对实验组的生长和存活进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)及Tukey多重比较分析,差异显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

利用Excel计算杂交子代各性状的杂种优势率(H , heterosis):

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

式中, F_1 为杂交子代性状的平均值, P 为两自交组子代性状的平均值。

2 结果

2.1 幼虫期生长的比较分析

幼虫期第1到第10天,各实验组幼虫壳高无显著差异($P > 0.05$);从第10天开始,杂交组PB、BP和BW开始呈现出较快的生长速度;20日龄时,杂交组PB壳高最大,为308.3 μm,其次为BP和BW组,依次为285.5和284.6 μm;方差分析表明,PB组与其他交配组合相比,表现出显著生长优势($P < 0.05$)(表1)。

表 1 幼虫期不同实验组壳高生长的比较
Tab.1 Comparison of shell height among different experimental groups at larval stage

实验组 groups	幼虫壳高/ μm shell height of the larvae				
	1 d	5 d	10 d	15 d	20 d
WW	64.0 \pm 1.8 ^a	89.9 \pm 2.4 ^a	147.8 \pm 5.5 ^a	203.8 \pm 34.5 ^{cd}	264.1 \pm 19.7 ^c
BB	62.8 \pm 2.2 ^a	90.0 \pm 3.0 ^a	153.9 \pm 9.0 ^a	208.3 \pm 22.7 ^{bcd}	267.0 \pm 28.9 ^{bc}
PP	64.3 \pm 2.8 ^a	94.5 \pm 2.4 ^a	153.3 \pm 4.7 ^a	216.0 \pm 15.1 ^{bcd}	276.9 \pm 22.8 ^{bc}
WB	63.8 \pm 1.9 ^a	90.3 \pm 3.4 ^a	151.8 \pm 1.7 ^a	211.7 \pm 20.6 ^{bcd}	272.7 \pm 18.2 ^{bc}
BW	64.0 \pm 2.9 ^a	93.2 \pm 3.3 ^a	159.7 \pm 7.1 ^a	220.3 \pm 17.8 ^{abc}	284.6 \pm 22.0 ^b
WP	63.8 \pm 1.7 ^a	93.1 \pm 1.0 ^a	149.1 \pm 9.5 ^a	202.4 \pm 20.1 ^{cd}	262.1 \pm 23.5 ^c
PW	64.3 \pm 1.7 ^a	91.8 \pm 7.7 ^a	151.5 \pm 4.5 ^a	197.9 \pm 17.6 ^d	259.1 \pm 18.0 ^c
BP	64.0 \pm 3.7 ^a	92.3 \pm 2.1 ^a	158.5 \pm 9.8 ^a	224.0 \pm 34.0 ^{ab}	285.5 \pm 32.0 ^b
PB	63.5 \pm 1.9 ^a	94.4 \pm 4.1 ^a	162.9 \pm 9.1 ^a	234.1 \pm 18.1 ^a	308.3 \pm 26.9 ^a

注:同列标注不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$),下同

Notes: different superscript letters within the same column indicate significant difference among means ($P < 0.05$), the same as below

2.2 幼虫期存活率的比较分析

各实验组幼虫在前 10 天均表现出较高的存活率,并且各组之间差异不显著($P > 0.05$) (图 1)。随培育时间的延长,幼虫死亡率明显增大,与自交组相比,各杂交组幼虫表现出较高的存活

率。15 和 20 日龄时,杂交组 PB、BP 存活率均显著高于它们的自交组 BB 和 PP ($P < 0.05$); 20 日龄时,各杂交组存活率大小次序为 PB > WB > BP > BW > WP > PW > WW > PP > BB。

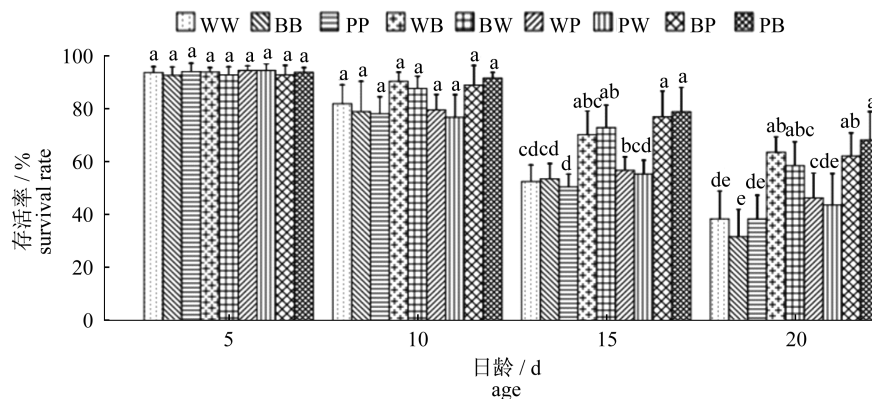


图 1 幼虫期各实验组存活率的比较

同一日龄标注不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$),下同

Fig.1 Comparison of survival rate among different experiment groups at larvae stage

Different superscript letters within the same age indicate significant difference ($P < 0.05$) among means, the same as below

2.3 幼虫期杂种优势率的比较分析

杂交组 BW、PB 在幼虫壳高上具有较高的杂种优势率,并且杂种优势率随日龄增加呈增大趋势;杂交组 WB、BP 在壳高上的杂种优势率较小;杂交组 WP、PW 在壳高上无杂种优势(表 2)。在幼虫存活率上,所有杂交组合均具有较高的杂种优势率,20 日龄时,杂种优势率介于 13.7% ~ 94.16%。在所有杂交组合中,杂交组 PB 在生长和存活率上的平均杂种优势最大;6 个正反交组合中,每组正反交(WB 与 BW, WP 与 PW, BP 与 PB)表现出相同方向的杂种优势。

2.4 养成期生长比较

各实验组的壳高和壳长均随着日龄增加呈上升趋势,其中,50 ~ 170 日龄以及 260 ~ 350 日龄,壳高和壳长的增长较快,而 170 ~ 260 日龄时即当年 11 月底到次年 2 月,生长基本停滞(表 3)。3 种壳色家系的自交组中,紫壳色自交组的壳高生长最快,显著地大于白壳色、黑壳色自交组($P < 0.05$),白壳色与黑壳色在壳高上差异不显著($P > 0.05$);50、110 及 260 日龄时,紫壳色自交组壳长显著地大于白壳色和黑壳色自交组($P < 0.05$);260 和 350 日龄时,3 种壳色自交组总重差异不显著($P >$

0.05)。养成期间 3 组正反交组合(WB 与 BW, WP 与 PW、BP 与 PB)的壳高、壳长及总重均无显著差异。6 个杂交组中,PB 的壳高生长最快,BP 次之,PW、WP 的生长最慢,方差分析显示 PB、BP 的壳高显著大于 PW、WP($P < 0.05$)。

2.5 养成期存活率比较

随着日龄增加,各实验组存活率均呈下降趋势;暂养阶段(即 110 d 前)的死亡率较高,海上养成时死亡率较低。方差分析显示,各杂交组与自交组在养成期的成活率差异均不显著(图 2)。

表 2 各杂交组幼虫生长和存活的杂种优势率
Tab.2 Heterosis of growth and survival during larval stage in different hybrid crosses

实验组 groups	性状 trait	杂种优势率/% heterosis				
		1 d	5 d	10 d	15 d	20 d
WB	壳高 shell height	0.59	0.37	0.68	2.75	2.70
	存活率 survival rate		0.78	12.35	32.33	80.89
BW	壳高 shell height	0.99	3.64	5.87	6.91	7.17
	存活率 survival rate		-0.40	8.98	37.40	66.64
WP	壳高 shell height	-0.58	0.96	-0.92	-3.60	-3.10
	存活率 survival rate		0.69	-0.55	10.14	20.54
PW	壳高 shell height	0.19	-0.42	0.64	-5.72	-4.20
	存活率 survival rate		0.65	-4.00	7.47	13.70
BP	壳高 shell height	0.79	0.12	3.17	5.60	4.97
	存活率 survival rate		-0.54	13.25	47.81	77.13
PB	壳高 shell height	0.00	2.40	6.07	10.36	13.38
	存活率 survival rate		0.52	16.64	51.41	94.16

表 3 养成期杂交组与自交组生长性状(壳高、壳长和总重)平均值
Tab.3 Growth traits(shell height, shell length and the whole body weight) value in reciprocal and parental crosses at grow-out stage

实验组 groups	50 d		110 d		170 d		260 d		350 d			
	壳高/ mm shell height	壳长/ mm shell length	壳高/ mm shell height	壳长/ mm shell length	壳高/ mm shell height	壳长/ mm shell length	壳高/ mm shell height	壳长/ mm shell length	总重/ g total weight	壳高/ mm shell height	壳长/ mm shell length	总重/ g total weight
	WW	7.39 ± 1.14 ^{ab}	4.16 ± 0.70 ^e	16.56 ± 3.66 ^{bcd}	10.63 ± 1.97 ^{cd}	35.96 ± 5.96 ^{abc}	24.21 ± 4.29 ^{bc}	38.40 ± 5.42 ^{cde}	26.04 ± 5.90 ^{abc}	8.94 ± 3.96 ^{ab}	51.22 ± 8.17 ^{bc}	34.00 ± 6.74 ^{abc}
BB	7.44 ± 1.04 ^{ab}	4.81 ± 0.69 ^{bcd}	14.66 ± 3.06 ^d	9.94 ± 2.02 ^d	34.50 ± 7.58 ^{bcd}	23.93 ± 4.41 ^{bc}	37.53 ± 5.55 ^{cde}	24.23 ± 3.67 ^{cd}	7.70 ± 2.88 ^b	50.42 ± 9.30 ^{bc}	32.53 ± 5.08 ^{bc}	15.09 ± 4.63 ^{bcd}
PP	7.58 ± 1.34 ^{ab}	5.63 ± 0.81 ^a	18.90 ± 5.46 ^{ab}	12.55 ± 4.07 ^a	37.03 ± 7.68 ^{abc}	25.51 ± 5.47 ^{ab}	41.72 ± 6.92 ^{ab}	27.82 ± 5.05 ^a	9.46 ± 4.72 ^{ab}	56.87 ± 12.46 ^a	36.68 ± 6.75 ^{ab}	19.12 ± 8.11 ^{abc}
WB	7.30 ± 1.43 ^{ab}	4.54 ± 0.62 ^{cde}	15.04 ± 2.62 ^d	10.79 ± 3.16 ^{bcd}	34.01 ± 5.61 ^{bcd}	23.03 ± 4.99 ^{bc}	37.81 ± 5.69 ^{cde}	24.53 ± 3.67 ^{bcd}	8.02 ± 3.76 ^b	50.41 ± 9.36 ^{bc}	32.05 ± 6.15 ^{bc}	15.83 ± 5.76 ^{bcd}
BW	7.39 ± 1.08 ^{ab}	4.48 ± 0.71 ^{de}	16.32 ± 4.16 ^{cd}	9.87 ± 2.30 ^d	35.93 ± 6.89 ^{abc}	23.83 ± 5.25 ^{bc}	38.60 ± 7.40 ^{cde}	24.13 ± 4.84 ^{cd}	7.93 ± 2.69 ^b	50.59 ± 11.28 ^{bc}	30.95 ± 8.28 ^c	15.22 ± 5.31 ^{bcd}
WP	6.18 ± 1.08 ^{cd}	4.12 ± 0.56 ^e	15.59 ± 3.60 ^d	10.49 ± 3.46 ^{cd}	33.23 ± 6.35 ^{cd}	22.83 ± 3.35 ^{bc}	34.72 ± 7.55 ^e	24.94 ± 5.97 ^{bcd}	7.68 ± 4.26 ^b	48.32 ± 8.88 ^c	32.29 ± 6.45 ^{bc}	14.53 ± 6.27 ^{cd}
PW	6.06 ± 0.92 ^d	4.53 ± 0.62 ^{de}	14.98 ± 3.64 ^d	9.79 ± 1.99 ^d	32.02 ± 5.97 ^d	22.24 ± 4.44 ^c	36.03 ± 5.44 ^{de}	23.16 ± 4.50 ^d	7.40 ± 3.45 ^b	47.19 ± 6.41 ^c	30.90 ± 5.13 ^c	12.86 ± 5.33 ^d
BP	8.15 ± 1.54 ^a	5.11 ± 0.69 ^{abc}	18.31 ± 5.71 ^{abc}	11.66 ± 3.01 ^{abc}	37.69 ± 6.47 ^{ab}	25.46 ± 5.16 ^{ab}	41.94 ± 7.07 ^{ab}	27.36 ± 4.99 ^{ab}	9.54 ± 3.33 ^{ab}	60.05 ± 9.10 ^a	37.05 ± 5.34 ^{ab}	20.34 ± 6.70 ^{ab}
PB	7.79 ± 1.16 ^{ab}	5.24 ± 0.90 ^{ab}	19.11 ± 6.18 ^a	12.34 ± 3.78 ^a	38.84 ± 8.40 ^a	28.23 ± 6.50 ^a	43.13 ± 8.79 ^a	28.72 ± 5.96 ^a	10.38 ± 4.33 ^a	61.84 ± 8.47 ^a	39.14 ± 7.04 ^a	24.21 ± 9.84 ^a

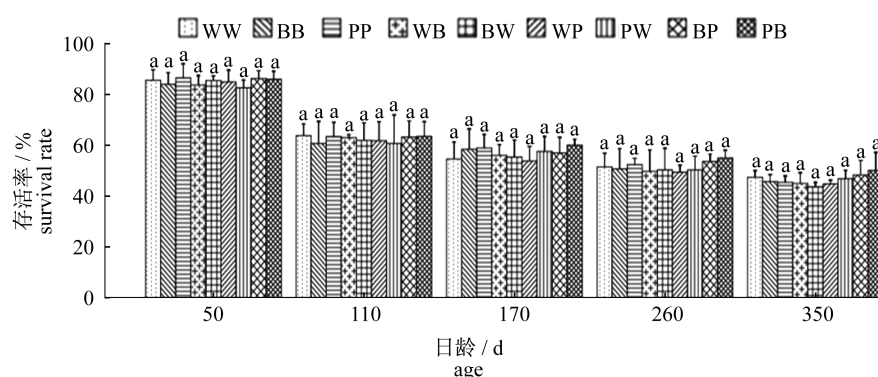


图 2 养成期不同实验组存活率的比较

Fig. 2 Comparison of survival rate of different experimental crosses at grow-out stage

2.6 养成期杂种优势率的比较分析

在养成期,杂交组 WB 及其反交组 BW 的壳高、壳长及总重的杂种优势率分别介于 $-3.66\% \sim 4.52\%$ 、 $-6.96\% \sim 1.24\%$ 、 $-4.98\% \sim -1.18\%$,无显著杂种优势;杂交组 WP、PW 的壳高、壳长及总重的杂种优势率基本为负值,表现为负杂种优势;杂交组 BP 及其反交组 PB 的壳高、壳长及总重均

有较高的杂种优势,壳高的杂种优势率介于 $3.71\% \sim 15.27\%$,壳长的杂种优势率介于 $-2.00\% \sim 13.10\%$,总重的杂种优势率介于 $11.23\% \sim 41.56\%$ (表 4)。在存活率方面,只有杂交组 BP 和 PB 有一定的杂种优势($-2.77\% \sim 9.83\%$),其他 4 个杂交组合在整个养成阶段没有表现出杂种优势。

表 4 养成期各杂交组生长和存活的杂种优势率

Tab. 4 Heterosis for growth and survival of hybrid crosses at grow-out stage

生长阶段 stage	性状 trait	杂种优势率/% heterosis					
		WB	BW	WP	PW	BP	PB
50 d	壳高 shell height	-1.52	-0.30	-17.34	-19.03	8.48	3.71
	壳长 shell length	1.24	-0.04	-15.78	-7.46	-2.00	0.42
	存活率 survival rate	-1.33	0.75	-1.35	-4.03	1.10	0.81
110 d	壳高 shell height	-3.66	4.52	-12.07	-15.51	9.11	13.85
	壳长 shell length	-3.95	-0.55	-9.52	-15.50	3.67	9.78
	存活率 survival rate	1.20	-0.57	-2.81	-4.56	1.83	2.34
170 d	壳高 shell height	-3.48	1.97	-8.96	-12.27	5.38	8.61
	壳长 shell length	-4.31	-1.00	-8.14	-10.54	3.02	14.21
	存活率 survival rate	-0.87	-1.96	-5.18	1.45	-2.77	2.35
260 d	壳高 shell height	-0.40	1.67	-13.11	-9.84	6.11	9.12
	壳长 shell length	-2.35	-3.98	-7.35	-13.97	5.12	10.33
	总重 total weight	-3.60	-4.68	-16.50	-19.54	11.23	21.05
	存活率 survival rate	-2.63	-1.46	-4.82	-3.02	4.02	6.75
	壳高 shell height	-0.81	-0.44	-10.60	-12.69	11.94	15.27
350 d	壳长 shell length	-3.65	-6.96	-8.63	-12.55	7.07	13.10
	总重 total weight	-1.18	-4.98	-19.45	-28.68	18.92	41.56
	存活率 survival rate	-3.37	-6.17	-3.49	0.89	5.97	9.83

注:在牡蛎生长早期(50~170 d),牡蛎个体较小、壳薄易碎无法很好地剥离成单个个体,因此未测量总重

Notes: the total weight was not recorded during 50~170 d, because the oyster spats were difficult to be exfoliated intactly from the substrate

3 讨论

在农作物育种中,通过家系选育,进而在家系

间进行杂交,以利用杂种优势,是应用最为广泛的一种育种方法^[24-25]。目前在海洋贝类遗传育种研究中,杂种优势的利用多局限于不同野生群体

间的杂交,由于野生群体的遗传背景复杂,这种杂交模式的效率是较低的,仅为纯系杂交效率的一半^[3]。本研究分析比较了3种颜色长牡蛎近交家系间杂交后代的生长、存活情况,结果显示部分杂交组在生长、生命力上表现出显著的杂种优势;如幼虫期20日龄时,杂交组幼虫存活率杂种优势介于13.70%~94.16%,养成期350日龄时,杂交组PB壳高、壳长和总重的杂种优势分别达15.27%、13.10%和41.56%。这表明了利用长牡蛎不同壳色近交家系间杂交获得杂种优势的可行性。国外,Hedgecock等^[26-27]利用雌雄同体构建的家系为材料,也报道了近交系间的杂交优势。

两个特定的系群或群体之间进行杂交的杂种优势大小取决于群体间基因频率的差异。如果用于杂交的群体基因频率没有差异,就不会有杂种优势^[28]。本研究结果以及丛日浩等^[23]对于第一代壳色家系比较分析的结果均表明长牡蛎的不同壳色家系表现不一样的生长存活情况,与白壳色和黑壳色家系相比,紫壳色家系有着显著的生长存活优势,暗示了紫壳色家系与白壳色、黑壳色家系存在明显的遗传差异。本研究中杂交实验显示,在养成阶段,紫色与黑色的正反交配组合子代有明显的杂种优势,紫色与白色的交配组合表现为负杂种优势,而白色与黑色交配基本无杂种优势。因此,杂交育种中,合理选择杂交亲本是获得杂种优势的关键。

本实验中,各杂交组在幼虫阶段,在存活率上都表现出明显的杂种优势,而在养成阶段,存活率的杂种优势不明显或者为负值。这种不同阶段表现出不同的杂种优势的现象,在其他贝类的杂交育种中也有报道^[8]。在幼虫期,由于室内培育的原因,水质、水温、饵料等各种因素保持在较适宜的条件下,水中敌害生物较少,整个生长环境对于幼虫来说,比较适宜,因此幼虫的存活率高低主要取决于幼虫本身的遗传特性。而海上养成阶段,水温、水质、饵料、敌害等环境因子随着季节变化处在不停的变化之中,环境变化对长牡蛎生长存活的影响非常大^[12]。因此,在选育长牡蛎优良品种时,应重视基因与环境的共同作用。

总之,本研究报道了长牡蛎壳色家系间的杂交效应,揭示了长牡蛎壳色近交系间的杂种优势,发现紫壳色与黑壳色的交配组合具有明显的杂种优势,为进行长牡蛎杂种优势机理的研究以及利

用杂种优势培育长牡蛎优质品种提供了参考依据。

参考文献:

- [1] FAO (Food and Agriculture Organization). World aquaculture production of fish, crustaceans, molluscs, etc., by principal species [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- [2] Ministry of Agriculture Fisheries. 2013 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013. [农业部渔业局. 2013 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2013.]
- [3] 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. [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. 海洋科学, 2004, 28 (7): 54 - 60.]
- [4] Zhang S D, Li L, Wu F C, et al. Yield trait improvement of bay scallops following complete diallel crosses between different scallop stocks [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32 (1): 1 - 7.
- [5] Zheng H P, Zhang G F, Guo X M, et al. Heterosis between two stocks of the bay scallop, *Argopecten irradians* Lamarck (1819) [J]. Journal of Shellfish Research, 2006, 25 (3): 807 - 812.
- [6] 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. [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. 水产学报, 2008, 32 (6): 864 - 875.]
- [7] Deng Y W, Liu X, Zhang G F, et al. Heterosis and combining ability: A diallel cross of three geographically isolated populations of Pacific abalone *Haliotis discus hannai* Ino [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28 (6): 1195 - 1199.
- [8] You W W, Ke C H, Luo X, et al. Growth and survival of three small abalone *Haliotis diversicolor* populations and their reciprocal crosses [J]. Aquaculture Research, 2009, 40 (13): 1474 - 1480.
- [9] Newkirk G F. Interaction of genotype and salinity in larvae of the oyster *Crassostrea virginica* [J]. Marine

- Biology,1978,48(3):227-234.
- [10] Mallet A L, Haley L. Growth rate and survival in pure population matings and crosses of the oyster *Crassostrea virginica* [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1983, 40 (7): 948-954.
- [11] Mallet A L, Haley L. General and specific combining abilities of larval and juvenile growth and viability estimated from natural oyster populations[J]. Marine Biology, 1984, 81(1): 53-59.
- [12] 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. [孔令锋, 滕爽, 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. 海洋科学, 2013, 37(8): 78-84.]
- [13] Song S L, Li Q, Kong L F. Larval growth and survival of hybrid between different geographic populations of Pacific oyster *Crassostrea gigas* [J]. Periodical of Ocean university of China; Natural Science, 2012, 41(12): 30-35. [宋盛亮, 李琪, 孔令锋. 不同地理群体长牡蛎杂交子代的早期生长发育. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 41(12): 30-35.]
- [14] Kobayashi T, Kawahara I, Hasekura O, et al. Genetic control of bluish shell color variation in the Pacific abalone, *Haliotis discus hannai* [J]. Journal of Shellfish Research, 2004, 23(4): 1153-1156.
- [15] Peignon J M, Gerard A, Naciri Y, et al. Analysis of shell colour determination in the Manila clam *Ruditapes philippinarum* [J]. Aquatic Living Resources, 1995, 8(2): 181-189.
- [16] Winkler F M, Estevez B F, Jollan L B, et al. Inheritance of the general shell color in the scallop *Argopecten purpuratus* (Bivalvia: Pectinidae) [J]. Journal of Heredity, 2001, 92(6): 521-525.
- [17] Zheng H P, Zhang T, Sun Z W, et al. Inheritance of shell colours in the noble scallop *Chlamys nobilis* (Bivalve: Pectinidae) [J]. Aquaculture Research, 2013, 44(8): 1229-1235.
- [18] Wada K T, Komaru A. Effect of selection for shell coloration on growth rate and mortality in the Japanese pearl oyster, *Pinctada fucata martensii* [J]. Aquaculture, 1994, 125(1-2): 59-65.
- [19] Zheng H F, Zhang G F, Liu X. Comparison of growth and survival of larvae among different shell color stocks of bay scallop *Argopecten irradians irradians* (Lamarck 1819) [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2005, 23(2): 183-188.
- [20] Brand E, Kijima A, Fujio Y. Shell color polymorphism and growth in the Japanese scallop, *Patinopekten yessoensis* [J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1994, 44(1-4): 67-76.
- [21] Brake J, Evans F, Langdon C. Evidence for genetic control of pigmentation of shell and mantle edge in selected families of Pacific oysters, *Crassostrea gigas* [J]. Aquaculture, 2004, 229(1-4): 89-98.
- [22] Evans S, Camara M D, Langdon C J. Heritability of shell pigmentation in the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* [J]. Aquaculture, 2009, 286(3-4): 211-216.
- [23] Cong R H, Li Q, Ge J L, et al. Comparison of phenotypic traits of four shell color families of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(3): 494-502. [丛日浩, 李琪, 葛建龙, 等. 长牡蛎 4 种壳色家系子代的表型性状比较. 中国水产科学, 2014, 21(3): 494-502.]
- [24] Zhang T Z. Crop breeding [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003. [张天真. 作物育种学总论. 北京: 中国农业出版社, 2003.]
- [25] Li J M, Yuan L P. Hybrid rice: Genetics, breeding, and seed production [J]. Plant Breeding Reviews, 2010, 17: 15-158.
- [26] Hedgecock D, McGoldrick D J, Bayne B L. Hybrid vigor in Pacific oysters: An experimental approach using crosses among inbred lines [J]. Aquaculture, 1995, 137(1-4): 285-298.
- [27] Hedgecock D, McGoldrick D J, Manahan D T, et al. Quantitative and molecular genetic analyses of heterosis in bivalve molluscs [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1996, 203(1): 49-59.
- [28] Falconer D S, Mackay T F. Introduction to quantitative genetics [M]. 4th ed. Essex: Longman, 1996.

Comparison of growth and survival among the hybrid offspring of three different shell color families of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)

GE Jianlong, LI Qi*, YU Hong, KONG Lingfeng, YU Ruihai

(Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: A 3 × 3 diallel crosses of three different shell color families of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) (white/W, black/B, purple/P) were conducted. Three parental groups and six reciprocal hybrid crosses were established. The growth, survival rate and heterosis of hybrid crosses at larval and grow-out stages were compared among all experimental groups. The results showed that at the larval stage, hybrid cross PB presented significant growth superiority than other experimental groups. The larval survival rates of all the hybrid crosses were higher than that of parental crosses. All the hybrid crosses showed obvious larval survival heterosis. At the grow-out stage, the shell height of parental group PP was significantly greater than that of WW and BB. The grow of hybrid PB was the fastest among the six hybrid crosses, followed by hybrid BP, then hybrid WP and PW were the slowest. The survival rates were not different significantly among all the hybrid crosses and parental crosses during the grow-out stage. The heterosis of shell height, shell length, total weight and survival rate of hybrid cross BP and its reciprocal cross PB were between 3.71% – 15.27%, –2.00% – 13.10%, 11.23% – 41.56% and –2.77% – 9.83%, respectively. The other four hybrid groups had no heterosis during the grow-out stage.

Key words: *Crassostrea gigas*; shell color; crossbreeding; heterosis

Corresponding author: LI Qi. E-mail: qili66@ouc.edu.cn