

DOI: 10.12264/JFSC2023-0245

马氏珠母贝黑壳色选育系 F5 和对照群体生产性状的比较

陈琨^{1,2}, 张林浩¹, 姚子航¹, 廖永山^{3,4}, 邓岳文^{1,3,4}, 王庆恒^{1,3,4}

1. 广东海洋大学水产学院, 广东 湛江 524088;
2. 广西科学院广西海洋科学院(广西红树林研究中心), 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西 北海 536007;
3. 广东省珍珠养殖与加工工程技术研究中心, 广东 湛江 524088;
4. 广东省珍珠科技创新中心, 广东 湛江 524088

摘要: 以贝壳棱柱层放射肋条纹颜色与生长性状为育种目标, 结合家系选择与群体选择培育了马氏珠母贝(*Pinctada fucata martensii*)黑色放射肋选育品系(简称黑壳色系, black shell color line, BF)。为了探究黑壳色系的生产性能, 本研究比较了选育系 F5 (BF5)和对照群体(control group, CG)在不同生长阶段的多项生产性能指标, 包括受精率、孵化率、变态率、生长性状、对低温和高盐的耐受性以及育珠性能。结果显示 BF5 群体的受精率、孵化率、幼虫第 10 天和第 20 天的存活率以及变态率均大于 CG 群体, 差异不显著($P>0.05$); 在 20 日龄以后, BF5 群体的平均壳长均显著大于 CG 群体($P<0.05$), 其中 BF5 群体 240 日龄、330 日龄和 600 日龄的平均壳长分别比 CG 群体提高了 17.47%、21.34%和 20.28%。33 °C 高温胁迫 30 d 后, BF5 和 CG 群体的存活率分别为 84.4%和 63.9%, 差异显著($P<0.05$); 16‰低盐胁迫 30 d 后, BF5 和 CG 群体的存活率分别为 69.2%和 56.7%, 群体间差异显著($P<0.05$)。植核后 150 d 至育珠期结束(270 d), BF5 的存活率显著高于 CG 群体($P<0.05$), BF5 最终存活率比 CG 提高了 18.92%; BF5 和 CG 的商品珠率和优质珠率差异不显著($P>0.05$); BF5 的留核率、珍珠层厚度显著高于 CG ($P<0.05$), 提高率分别达到 18.97%和 22.61%, 表明 BF5 具有更好的育珠性能。本研究表明, BF5 具有更好的生长、抗逆和育珠性能, 为马氏珠母贝育种和产业应用提供了基础数据。

关键词: 马氏珠母贝; 黑壳色选育系; 生产性能; 育珠性能

中图分类号: S968

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2023)11–1293–08

贝类的壳色与其生长、存活、营养等多种性状具有相关性, 因此利用壳色作为遗传标记为种质改良奠定了基础。Brake 等^[1]发现长牡蛎(*Crassostrea gigas*)中浅色个体相比深色个体软体部重量更轻, 存活率偏低。Zheng 等^[2]发现华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)橙色品系性腺、外套膜、闭壳肌和鳃中的类胡萝卜素含量均显著高于棕色品系。武祥伟等^[3]报道了熊本牡蛎(*Crassostrea sikamea*)成贝期的壳金品系较壳黑品系具有较高的存活率优势和较全面的生长优势。朱怡静等^[4]

报道了壳黑、壳紫、壳橙、壳金和壳白 5 种壳色长牡蛎间的部分营养指标存在差异。魏敏等^[5]研究发现, 青蛤(*Cyclina sinensis*)的紫壳和白壳在生长和营养上存在一定差异, 紫壳性状与其生长和营养具有正向关联关系。

马氏珠母贝(*Pinctada fucata martensii*)主要用于培育海水珍珠, 是我国重要的经济贝类。2000 年后, 马氏珠母贝养殖群体生产性能发生退化, 加上养殖区域受到不同程度的污染、自然灾害频发等综合影响, 珍珠养殖的范围及其产量急剧下

收稿日期: 2023-10-10; 修订日期: 2023-11-19.

基金项目: 国家贝类产业技术体系项目(CARS-49); 广东省普通高校重点领域专项(2020ZDZX1045); 广东省现代农业产业技术体系贝藻类产业创新团队项目(KJ146).

作者简介: 陈琨(1995–), 男, 硕士, 实习研究员, 研究方向为海洋生物学. E-mail: chenkun@mangrove.org.cn

通信作者: 王庆恒, 教授, 研究方向为海产无脊椎动物生物学及增养殖技术. E-mail: wangqh@gdou.edu.cn

降。因此培育优质、高产、抗逆的养殖新品种是促进珍珠产业发展的核心途径。马氏珠母贝具有较为丰富的壳色多样性^[6]。Wada 等^[7]最早培育出了马氏珠母贝白壳色系,育珠实验表明,以白壳色系为小片贝所培育的珍珠中,黄色珍珠的比例显著低于棕色小片贝。Wei 等^[8]研究表明,马氏珠母贝不同壳色系在干露胁迫后多项生化指标差异显著,30℃干露 12 h 后黑壳色系的成活率显著高于金壳色系。本课题组从 2003 年开始以贝壳棱柱层颜色与生长性状为育种目标,结合家系选择与群体选择,进行马氏珠母贝壳色系的选育工作。研究表明,马氏珠母贝黑、红、黄、白 4 个壳色系 F1 稚贝的生长速度存在显著差异,其中黑色放射肋选系(简称黑壳色系, black shell color line, B)具有最大的壳长和壳高^[9]; 4 个壳色系选育系 F3 经过 325 d 的养殖后, BF3 具有最大壳长^[10]; 将 4 个壳色系 F3 交叉作为小片贝和育珠贝进行育珠实验,结果显示黑壳色系具有最大的育珠绩效值^[11]。进一步的分析发现黑壳色系类胡萝卜素含量较高,植核后的免疫相关酶的比活力、抗氧化能力以及免疫相关基因的表达均显著高于对照群体^[12-13]。

育珠产能是珍珠贝最根本的生产性能评价指标。植核会对育珠贝造成严重的机体创伤;珍珠的生长也会对贝体造成很大负担。因此,对于珍珠贝而言,育珠生产是一种强烈而长期的胁迫因子和选择压力。为了快速提升黑壳色选系的抗逆和育珠性能,课题组以育珠后存活的 BF4 为候选群体,按照壳色和生长性状优选前 5%为亲本,构建了黑壳色选育系 F5 (BF5)。本研究比较了 BF5 和对照群体在胚胎期和幼虫期的受精率、孵化率、变态率,幼虫、稚贝和成贝期的生长性状,成贝的温度和盐度耐受性,以及育珠产能,以准确评估 BF5 的生产性能,为马氏珠母贝育种工作和产业应用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 种苗培育及指标测定

从育珠期后存活的黑壳色选育系 F4 取样 2000 个体,从中选择 100 个黑色放射肋明显、生

长旺盛的个体作为亲本(雌:雄为 54:46)繁育 BF5 (如图 1); 同时随机从选育系 F4 取 100 个成熟个体(雌:雄为 58:42)为亲本繁育对照群体 CG。解剖性腺进行人工授精,按照常规育苗技术进行种苗培育。在授精后 2 h 测算受精率; 32 h 测算孵化率。从 BF5 和 CG 各收集部分 D 型幼虫,分别养殖于 3 个 300 L 大白桶中,分别在第 10 天和第 20 天(壳顶幼虫期)测算幼虫存活率,在显微镜下用目微尺测量壳长; 第 28 天测算变态率。

受精率(fertilization rate, %)=(受精卵/总卵数)×100%;

孵化率(hatching rate, %)=(D 形幼虫数/受精卵数)×100%;

变态率(metamorphosis rate, %)=(稚贝数/壳顶幼虫数)×100%



图 1 马氏珠母贝黑壳色选育系 F5 的右壳和左壳
Fig. 1 The right and left shell of black shell color breeding line F5 of *Pinctada fucata martensii*

1.2 稚贝和成贝生长指标测定

第 55 天,稚贝出池后按照常规生产方式在海区养殖,分别在第 5 月龄、8 月龄、11 月龄和 20 月龄时测定 BF5 和 CG 群体各 50 个个体壳长;壳长采用精度为 0.02 mm 游标卡尺测量。

1.3 高温和低盐胁迫实验

从 20 月龄的 BF5 和 CG 群体各随机取 900 只贝,在实验室暂养,设置水温 27℃,盐度 28,并每天足量投喂两次小球藻,一周后用于实验。

胁迫实验设高温组(33℃)和对照组(27℃);低盐胁迫实验设低盐组(盐度 16)和对照组(盐度 28)。以 300 L 大白桶为养殖容器,每个桶内放入 BF5 和 CG 群体各 135 只贝,养殖 30 d,逐日记录死亡率,实验设 3 个平行组。

实验期间,分别利用控温器控制水温,利用海水或淡水调节盐度;每天及时清理死亡个体,

足量投喂两次小球藻, 换水 30% (水温 and 盐度提前调节到设定条件)。

1.4 育珠实验

从 21 月龄的 BF5 和 CG 群体各随机取 10000 只进行插核手术, 每只贝植入 2 个珠核, 按照常规生产方式进行术后休养和育珠期管理。育珠期 9 个月, 期间抽样统计 2 个群体育珠贝在不同时间段的存活率, 育珠期结束后采收珍珠, 从每个群体随机取 3 组存活贝, 每组 30 只, 统计留核率、商品珠率和优质珠率。商品珠和优质珠由企业技术员按目前的生产要求代为确定。即商品珠为农户采收的原珠中, 去除了素珠(没有珍珠层)、骨珠(棱柱层珠)、污珠(有机质珠)和薄层珠(目测珍珠珠层厚度不足 200 μm)之后, 可作为通货由珍珠公司收购的珍珠; 优质珠标准为珍珠形状正圆, 表面光滑细腻, 没有瑕疵或仅有极少点状瑕疵, 反射光明亮均匀, 珍珠层厚度大于 300 μm。随机取 30 粒珍珠, 利用光学相干层析成像技术(OCT)测量珍珠层厚度^[14]。

存活率(survival rate, %)=(存活贝数量/育珠贝数量)×100%;

留核率(retention rate, %)=(采收到的珠核数/2)/存活的育珠贝数量]×100%

商品珠率(commodity pearl rate, %)=(商品珠数/采收到的珠核数)×100%

优质珠率(high quality pearl rate, %)=(优质珠数/商品珠数)×100%

1.5 统计与分析

利用 SPSS 26.0 统计软件采用 t-检验比较 BF5 与 CG 群体的各项指标, 差异显著性水平设置为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 受精率、孵化率和变态率的比较

如表 1 所示, BF5 群体的受精率、孵化率、幼虫第 10 天和第 20 天的存活率以及变态率与 CG 群体没有显著性差异($P>0.05$), 其中 BF5 群体第 20 天存活率和变态率分别比 CG 群体提高了 13.51%和 17.14%。

表 1 黑壳色选育系 F5 和对照群体受精率、孵化率及幼虫的存活率和变态率的比较

Tab. 1 Fertilization rate, hatching rate and metamorphosis rate of BF5 and CG populations of *Pinctada fucata martensii*

指标 item	黑壳色选育系 F5 (BF5) black shell color line 5 (BF5)	对照群体 (CG) control group (CG)
受精率/% fertilization rate	95.45±3.87	95.23±1.22
孵化率/% hatching rate	85.18±7.16	84.84±6.62
第 10 天存活率/% survival rate on day 10	82.67±6.66	78.33±4.04
第 20 天存活率/% survival rate on day 20	61.67±8.50	54.33±10.60
变态率/% metamorphosis rate	13.67±2.08	11.67±3.06

2.2 壳长性状的比较

BF5 和 CG 群体在不同养殖阶段的壳长性状见表 2。两个群体 10 日龄时, 壳长没有显著性差异($P>0.05$), 在 20 日龄以后, BF5 群体的平均壳长均显著大于 CG 群体($P<0.05$); 其中 BF5 群体 240 日龄、330 日龄和 600 日龄的平均壳长分别比 CG 群体提高了 17.47%、21.34%和 20.28%。

表 2 黑壳色选育系 F5 和对照组壳长的比较

Tab. 2 Shell length performance of black shell color line 5 and control group populations of *Pinctada fucata martensii*
 $n=100$; $\bar{x}\pm SD$

养殖阶段 culture stage	日龄/d days	黑壳色选育系 F5 (BF5) black shell color line 5 (BF5)	对照群体 (CG) control group (CG)
浮游期/μm planktonic period	10	107.48±9.52 ^a	101.48±8.76 ^a
	20	203.37±11.25 ^a	183.46±12.32 ^b
养成期/mm nurturing period	55	2.63±0.38 ^a	2.31±0.27 ^b
	150	18.27±2.52 ^a	15.70±1.77 ^b
	240	35.44±1.78 ^a	30.17±3.66 ^b
	330	43.49±3.90 ^a	35.84±4.23 ^b
	600	62.76±6.77 ^a	52.18±8.52 ^b

注: 同一日龄不同小写字母表示各组间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different superscript letters within the same day of age indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 高温和低盐胁迫存活率的比较

20 月龄的 BF5 和 CG 群体在适温(27 ℃)和高温胁迫(33 ℃)下各时间点的存活率见图 2。15 d 内, BF5 和 CG 群体在 27 ℃和 33 ℃下的存活率

均在 96% 以上, 群体间差异不显著 ($P > 0.05$)。15~30 d 内, BF5 和 CG 群体的存活率均降低, 其中在 27 °C 下, 存活率分别为 87.5% 和 79.4%, 群体间差异不显著 ($P > 0.05$); 在 33 °C 下, BF5 和 CG 群体的存活率分别为 84.4% 和 63.9%, 群体间差异显著 ($P < 0.05$)。

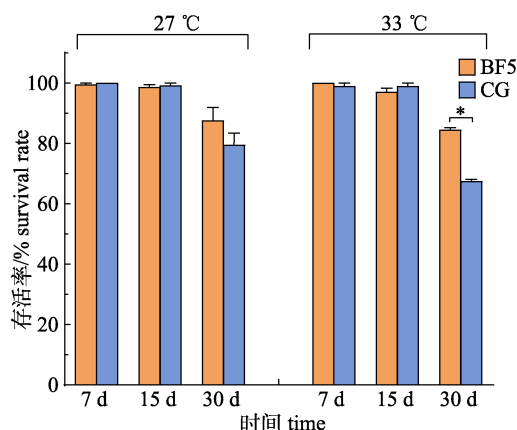


图 2 黑壳色选育系 F5 (BF5) 和对照群体 (CG) 温度胁迫存活率的比较

*表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 Survival rate of black shell color line 5 (BF5) and control group (CG) populations of *Pinctada fucata martensii* under temperature stress

* indicates significant difference between BF5 and CG group ($P < 0.05$).

20 月龄的 BF5 和 CG 在适宜盐度 (28) 和低盐胁迫 (16) 条件下各时间点的存活率见图 3。15 d 内, BF5 和 CG 群体在盐度 28 和 16 下的存活率均在 87.3% 以上, 群体间差异不显著 ($P > 0.05$)。15~30 d 内, BF5 和 CG 群体的存活率均有所降低, 其中在盐度 28 下, 存活率分别为 91.5% 和 86.9%, 群体间差异不显著 ($P > 0.05$); 在盐度 16 下, BF5 和 CG 群体的存活率分别为 69.2% 和 56.7%, 群体间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.4 育珠性状的比较

21 月龄的 BF5 和 CG 群体进行植核育珠, 育珠期间的存活率见图 4。植核后第 15~90 天, 两个群体的存活率差异不显著 ($P > 0.05$); 植核后第 150~210 天, BF5 的存活率显著高于 CG 群体 ($P < 0.05$)。育珠期结束后, 与 CG 比较, BF5 存活率提高了 18.92%。

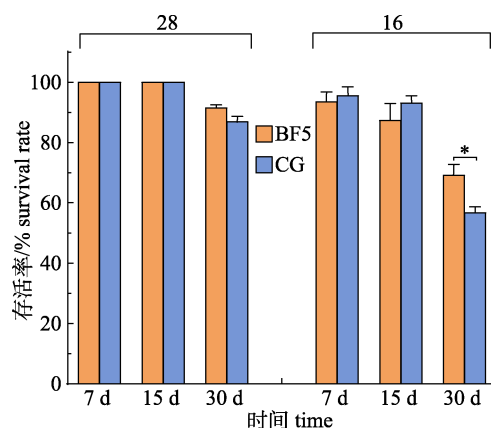


图 3 黑壳色选育系 F5 (BF5) 和对照群体 (CG) 盐度胁迫存活率的比较

*表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 3 Survival rate of black shell color line 5 (BF5) and control group (CG) populations of *Pinctada fucata martensii* under salinity stress

* indicates significant difference between BF5 and CG group ($P < 0.05$).

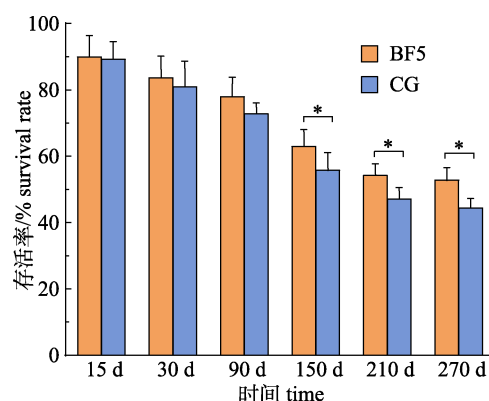


图 4 黑壳色选育系 F5 和对照群体植核后存活率的比较

*表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 4 Survival rate during pearl farming period of black shell color line 5 (BF5) and control group (CG) populations of *Pinctada fucata martensii*

* indicates significant difference between BF5 and CG group ($P < 0.05$).

BF5 和 CG 群体的育珠性能比较见表 3。270 d 育珠期结束后, BF5 的留核率、珍珠层厚度显著高于 CG ($P < 0.05$), 提高率分别达到 18.97% 和 22.61%; BF5 和 CG 的商品珠率和优质珠率差异不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

群体选育操作简单易行, 成功率高, 特别适

表 3 黑壳色选育系 F5 和对照组育珠性状的比较
Tab. 3 The pearl production traits of black shell color line 5 and control group populations of *Pinctada fucata martensii*

	黑壳色选育系 F5 (BF5) black shell color line 5 (BF5)	对照群体 control group (CG)
留核率/% retention rate	52.22±5.10 ^a	43.89±3.85 ^b
商品珠率/% commodity pearl rate	85.96±3.33 ^a	79.95±4.01 ^a
优质珠率/% high quality pearl rate	33.34±4.24 ^a	30.13±2.63 ^a
珍珠层厚度/μm pearl layer thickness	423.50±68.90 ^a	345.40±52.80 ^b

注: 同一指标不同小写字母表示各组间差异显著($P<0.05$).
Note: Different superscript letters within the same index indicate significant difference ($P<0.05$).

合用于容易获得较快的选择反应的性状, 多年来群体选育已广泛应用于水生动物的遗传改良并取得了显著进展^[15-17]。本实验室早期工作显示, 马氏珠母贝 4 个壳色群体中, 黑壳色系具有更好的育珠绩效值^[11], 进而结合家系选择与群体选择, 持续构建了黑壳色选育系 F5。本研究显示, 在早期阶段两个群体的受精率、孵化率及幼虫的存活率和变态率没有显著性差异($P>0.05$), 但在成贝养殖过程中, BF5 的壳长等表型性状显著优于 CG 群体, 这与国内外学者对贝类生长进行群体选育的研究结果相似。例如, 郑怀平等^[18]通过比较不同壳色海湾扇贝的早期发育阶段, 发现其受精卵大小、胚胎孵化率及幼虫的生长速率和存活率之间没有显著性差异($P>0.05$), 但是在养成阶段, 尤其 7、8 月高温时期, 白壳色家系的生长速率和存活率均明显高于橙色和紫色壳色的家系。

双壳贝类是变温动物, 没有体温调节能力, 环境温度直接影响贝类的存活、生长发育、代谢、繁殖、免疫等各个方面。如姜高伟等^[19]报道了温度对长牡蛎和葡萄牙牡蛎(*Crassostrea angulata*)自交和杂交稚贝的生长与存活的影响, 结果显示正反交稚贝的耐热性均大于自交系, 具有显著的生长和存活优势, 其中正交系 GA (长牡蛎♀×葡萄牙牡蛎♂)的优势更为明显。朱星海等^[20]通过周年调查, 确定风信标扇贝(*Patinopecten caurinus*)

性腺发育与海水温度变化相关性显著, 蓬莱海域的风信标扇贝在 4 月上旬达到性腺指数峰值(24.25), 当水温高于 20 ℃时, 性腺指数小于 10。Ericson 等^[21]研究表明, 与 16 ℃组相比, 24 ℃下绿唇贻贝(*Perna canaliculus*)血淋巴中与糖酵解途径相关的代谢产物水平上升, 弧菌感染后发生凋亡的血细胞数量增加。马氏珠母贝生长适温为 15~30 ℃, 最适生长温度为 26~28 ℃^[22-23]。2019 年, 湛江近岸海域发生持续 1 个月的 33 ℃左右的高温灾害, 导致当年流沙湾等珍珠贝主养殖区的育珠贝死亡率达 90%, 造成产业极其重大损失。根据这一实际情况, 本研究比较了 BF5 和 CG 在高温 33 ℃胁迫下的存活率。结果显示, 在 33 ℃胁迫温度下 BF5 和 CG 的早期(15 d 内)存活率均高达 96%以上, 在 15~30 d 内, 两组的存活率均明显下降, 说明马氏珠母贝对高温胁迫的耐受能力较强, 持续时间较短的高温气候不会对珍珠贝养殖造成严重灾害; 但在长时间高温胁迫下, 珍珠贝长期处于很高的代谢水平, 生理机能逐渐紊乱, 死亡率会逐渐上升。高温胁迫 30 d 时 BF5 的存活率显著高于 CG ($P<0.05$), 表明 BF5 在长期抗逆性方面具有优势。本研究中, BF5 和 CG 组的存活率均明显高于 2019 年的海区养殖生产情况, 可能是本实验在室内开展, 溶氧和饵料充足, 水质较好, 因而实验贝机体强健, 抗逆性较强。

当海水盐度变化超过贝类的耐盐范围, 会使贝类自身渗透压受到损伤破坏, 阻碍免疫系统, 严重会影响贝类的生长和存活, 引起大面积死亡。国内外关于贝类盐度胁迫的研究已有大量报道^[24-27]。如李阳春等^[28]探究低盐诱导对长牡蛎胚胎发育及发育过程中生理生化水平的影响, 结果表明低盐诱导不仅会导致长牡蛎受精卵胚胎发育迟缓, 还可能会使其受到严重的氧化胁迫, 同时阻碍其代谢功能和渗透调节。Kladchenko 等^[29]报道了毛蚶(*Anadara kagoshimensis*)盐度胁迫 48 h 的影响, 结果显示, 低盐度 8 可引起血细胞活性氧和线粒体膜电位水平的升高, 而高盐度 35 则抑制血细胞产生活性氧, 但不影响线粒体膜电位水平。Sui 等^[30]研究结果表明, 在盐度为 15 的环境下, 厚壳贻贝(*Mytilus coruscus*)的滤水率、食物吸

收效率、呼吸速率、以及生长余力相比对照组盐度 25 显著降低($P<0.05$), 而粪便有机干重比却显著增加($P<0.05$)。范超等^[31]利用不同盐度胁迫不同发育时期的菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*), 发现高盐或低盐胁迫对其生长和存活均有显著的影响。Hu 等^[32]报道了岩牡蛎 (*Crassostrea nippona*)和长牡蛎盐度胁迫的差异, 结果显示岩牡蛎和长牡蛎分别在盐度为 17.33 和 16 时开始出现死亡, 直到盐度降至 6 时所有个体死亡; 并且在盐度 10、12 和 16 时, 长牡蛎的存活率要显著高于岩牡蛎($P<0.05$)。本课题组常年监测显示, 珍珠贝核心养殖区流沙湾海域水深 1.5 m 处的正常盐度为 28~33, 非台风的暴雨影响下可低至 16~18 (数据未发表)。本研究结果显示, 第 7 天和第 15 天, BF5 和 CG 群体在低盐胁迫下的存活率均低于对照组, 但分别与对照组差异不显著, 且群体间差异也不显著($P>0.05$); 第 30 天, 在盐度 16 下, BF5 和 CG 群体的存活率分别为 69.2% 和 56.7%, 组间显著差异($P<0.05$), 且分别显著低于对照组($P<0.05$)。结果表明, 马氏珠母贝对短期的低盐胁迫耐受性较强, 但随着胁迫时间延长, 其抵抗能力逐渐下降。经过 30 d 低盐胁迫, BF5 的死亡率显著低于 CG 组, 说明了 BF5 相对于 CG 更能适应长期低盐的胁迫过程。

本研究中, 以育珠后存活的 BF4 为候选群体, 按照壳色和生长性状优选前 5% 为亲本, 构建的 BF5 在植核和育珠方面均明显优于 CG。其中, 植核后 90~210 d, 出现了死亡率高, 这一时期是从 6 月中旬到 10 月中旬, 其中 6 月下旬到 8 月上旬是湛江地区高温季节, 8 月到 9 月中旬是暴雨多发的季节, 高温和盐度胁迫频发。也正是在 90~120 d, BF5 和对照组存活率开始出现显著性差异, 育珠期结束后, 与 CG 比较, BF5 存活率提高了 18.92%, 再次说明了 BF5 具有更强的抗逆性。270 d 育珠期结束后, BF5 的留核率和珍珠层厚度分别比对照组提高了 18.97% 和 22.61%, 说明 BF5 具有更好的育珠性能, 取得了明显的育种进展。

4 结论

与对照组比较, 马氏珠母贝黑壳色选育系 F5

具有明显的生长优势, 在高温和低盐胁迫中表现出了更强的抗逆性; 育珠期, 黑壳色选育系 F5 具有较高的存活率、留核率、珍珠层厚度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zheng H, Liu H, Zhang T, et al. Total carotenoid differences in scallop tissues of *Chlamys nobilis* (Bivalve: Pectinidae) with regard to gender and shell colour[J]. Food Chemistry, 2010, 122(4): 1164-1167.
- [3] Wu X W, Zhang Y H, Xiao S, et al. Characteristics of growth, survival, gonadal development and biochemical component between the golden shell and black shell lines of *Crassostrea sikamea*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(4): 728-735. [武祥伟, 张跃环, 肖述, 等. 熊本牡蛎壳金品系与壳黑品系的生长、存活、性腺发育及生化成分的周期性变化[J]. 水生生物学报, 2020, 44(4): 728-735.]
- [4] Zhu Y J, Li Q, Zhang J X, et al. Analysis and evaluation of nutrient composition in different tissues of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) with five shell colors[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 354-360. [朱怡静, 李琪, 张景晓, 等. 5 种壳色长牡蛎不同组织常规营养成分分析与评价[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 354-360.]
- [5] Wei M, Wu Y C, Chen D, et al. Growth and nutritional differences between two shell-color clams (*Cyclina sinensis*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(8): 1458-1465. [魏敏, 吴雨晨, 陈东, 等. 青蛤不同壳色个体间的生长及营养差异[J]. 水产学报, 2022, 46(8): 1458-1465.]
- [6] Deng Z H, Sun J, Wei H J, et al. Shell colors and microstructures of four pearl oyster species in the South China Sea[J]. Aquaculture Reports, 2022, 25: 101214.
- [7] Wada K T, Komaru A. Color and weight of pearls produced by grafting the mantle tissue from a selected population for white shell color of the Japanese pearl oyster *Pinctada fucata martensii* (Dunker)[J]. Aquaculture, 1996, 142(1-2): 25-32.
- [8] Wei H J, Deng Z H, Zhao W, et al. Effects of air exposure at different temperatures in selected breeding lines of *Pinctada fucata* with different shell color[J]. Aquaculture Reports, 2021, 21: 100879.
- [9] Wang Q H, Deng Y W, Du X D, et al. Growth comparison of F₁ larvae between four shell color lines of pearl oyster *Pinctada martensii*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15(3): 488-492. [王庆恒, 邓岳文, 杜晓东, 等. 马氏珠母贝 4 个壳色选系 F₁ 幼虫的生长比较[J]. 中国水产科学, 2008, 15(3): 488-492.]
- [10] Deng Y W, Fu S, Lu Y Z, et al. Fertilization, hatching, survival, and growth of third-generation colored pearl oyster

- (*Pinctada martensii*) stocks[J]. Journal of Applied Aquaculture, 2013, 25(2): 113-120.
- [11] Fu S, Xie S H, Deng Y W, et al. A study on thick pearls produced by the third generation shell color lines of pearl oyster (*Pinctada martensii*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2012, 36(9): 1418-1424. [符韶, 谢绍河, 邓岳文, 等. 利用马氏珠母贝 4 个壳色系 F₃ 培育厚层优质珍珠[J]. 水产学报, 2012, 36(9): 1418-1424.]
- [12] Adzibbli L, Wang Z M, Li J H, et al. Survival, retention rate and immunity of the black shell colored stocks of pearl oyster *Pinctada fucata martensii* after grafting operation[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2020, 98: 691-698.
- [13] Adzibbli L, Zheng Z, Liao Y S, et al. Characterization of thioredoxin-like PROTEIN-5 (TRXLP-5) and its differential response to grafting challenge in the black coloured selected line and control stocks of *Pinctada fucata martensii*[J]. Developmental & Comparative Immunology, 2020, 106: 103635.
- [14] Li J H, Yang C Y, Wang Q H, et al. Growth and survival of host pearl oyster *Pinctada fucata martensii* (Dunker, 1880) treated by different biofouling-clean methods in China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 207: 104-108.
- [15] Zheng H P, Zhang G F, Liu X, et al. Sustained response to selection in an introduced population of the hermaphroditic bay scallop *Argopecten irradians irradians* Lamarck (1819)[J]. Aquaculture, 2006, 255(1-4): 579-585.
- [16] He M X, Guan Y Y, Yuan T, et al. Realized heritability and response to selection for shell height in the pearl oyster *Pinctada fucata* (Gould)[J]. Aquaculture Research, 2008, 39(8): 801-805.
- [17] You W W, Ke C H, Luo X, et al. Divergent selection for shell length in two stocks of small abalone *Haliotis diversicolor*[J]. Aquaculture Research, 2010, 41(6): 921-929.
- [18] Zheng H P, Zhang G F, Liu X, et al. Establishment of different shell color lines of bay scallop *Argopecten Irradians Irradians* lamarck (1819) and their development[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(6): 632-639. [郑怀平, 张国范, 刘晓, 等. 不同贝壳颜色海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) 家系的建立及生长发育研究[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(6): 632-639.]
- [19] Jiang G W, Li Q, Xu C X, et al. Effects of temperature on the growth and survival of reciprocal hybrids of two oyster species, *Crassostrea gigas* and *Crassostrea angulata*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2021, 28(1): 29-36. [姜高伟, 李琪, 徐成勋, 等. 温度对长牡蛎和葡萄牙牡蛎及其杂交稚贝生长和存活的影响[J]. 中国水产科学, 2021, 28(1): 29-36.]
- [20] Zhu X H, Sun H Z, Yang Z J, et al. Studies on gonadal development and the reproductive cycle of *Patinopekten caurinus*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(2): 52-58. [朱星海, 孙红振, 杨祖晶, 等. 风信标扇贝的性腺发育与繁殖周期规律研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 52-58.]
- [21] Ericson J A, Venter L, Welford M R, et al. Effects of seawater temperature and acute *Vibrio* sp. challenge on the haemolymph immune and metabolic responses of adult mussels (*Perna canaliculus*)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2022, 128: 664-675.
- [22] Wang Q H, Zhang S F, Du X D, et al. A comparative analysis of digestive enzyme activities of first generation yellow shell color and cultivated stocks of *Pinctada martensii* at suitable growth temperatures[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(2): 252-257. [王庆恒, 张善发, 杜晓东, 等. 生长适温下马氏珠母贝黄壳色选系 F₁ 与养殖群体消化酶活力的比较[J]. 中国水产科学, 2010, 17(2): 252-257.]
- [23] Sandip K M. Effect of temperature and body size on food utilization in the marine pearl oyster *Pinctada fucata* (Bivalvia: Ptevidae)[J]. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 2006, 97: 95-100.
- [24] Shen W L, You Z J, Shi X Y. The influence of temperature and salinity on zygote's hatching rate and larval growth of *Scapharca subcrenata*[J]. Marine Sciences, 2009, 33(10): 5-8. [沈伟良, 尤仲杰, 施祥元. 温度与盐度对毛蚶受精卵孵化及幼虫生长的影响[J]. 海洋科学, 2009, 33(10): 5-8.]
- [25] 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.]
- [26] Zhang T, Yang H S, Liu B Z, et al. Effects of environmental factors on the survival and growth of juvenile hard clam *mercenaria mercenaria* (Linnaeus, 1758)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(2): 142-149. [张涛, 杨红生, 刘保忠, 等. 环境因子对硬壳蛤 *Mercenaria mercenaria* 稚贝成活率和生长率的影响[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(2): 142-149.]
- [27] Malagoli D, Casarini L, Sacchi S, et al. Stress and immune response in the mussel *Mytilus galloprovincialis*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2007, 23(1): 171-177.
- [28] Li Y C, Wang Z P, Ma P Z, et al. Effect of hypotonic induction on embryonic development, energy metabolism, oxidation resistant and osmoregulation in Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(10): 19-25. [李阳春, 王昭萍, 马培振, 等. 低盐处理对长牡蛎胚胎发育及氧化应激、能量供应和渗透调节相关酶的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(10): 19-25.]
- [29] Kladchenko E S, Gostyukhina O L, Soldatov A A, et al. Functional changes in hemocytes and antioxidant activity in gills of the ark clam *Anadara kagoshimensis* (Bivalvia:

- Arcidae) induced by salinity fluctuations[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2023, 264: 110810.
- [30] Sui Y M, Xue Z Y, Chen S H, et al. Investigation of physiological energetic response of the thick shell mussel, *Mytilus coruscus*, to microplastics and low salinity: Potential countermeasures to multi-environmental changes[J]. Aquaculture, 2023, 569: 739382.
- [31] Fan C, Wen Z C, Huo Z M, et al. Influence of salinity stress on growth and survival of Manila clam *Ruditapes philippinarum* at various developmental stages[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, 31(5): 497-504. [范超, 温子川, 霍忠明, 等. 盐度胁迫对不同发育时期菲律宾蛤仔生长和存活的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(5): 497-504.]
- [32] Hu Y M, Li Q, Xu C X, et al. A comparative study on the difference in temperature and salinity tolerance of *Crassostrea nippona* and *C. gigas* spat[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(2): 284-295.

Comparison of production traits between the black shell color breeding line F5 and the control population of *Pinctada fucata martensii*

CHEN Kun^{1,2}, ZHANG Linhao¹, YAO Zihang¹, LIAO Yongshan^{3,4}, DENG Yuewen^{1,3,4}, WANG Qingheng^{1,3,4}

1. Fisheries College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Mangrove Conservation and Utilization; Guangxi Academy of Marine Sciences (Guangxi Mangrove Research Center), Guangxi Academy of Sciences, Beihai 536007, China;

3. Guangdong Technology Research Center for Pearl Aquaculture and Process, Zhanjiang 524088, China;

4. Guangdong Science and Innovation Center for Pearl Culture, Zhanjiang 524088, China

Abstract: We developed a black shell color line (BF) based on the color of radiating ribbed stripes in shell prismatic layers and growth characteristics by employing family selection and population selection methods. We aimed to explore the production performance of the selected lines by comparing the performance indicators of the black shell color line F5 (BF5) and the control group (CG), including fertilization rate, hatching rate, metamorphosis rate, growth traits, tolerance to low temperature and high salt content, and pearl production traits. The fertilization, hatching, and survival rates on the 10th and 20th day of larvae and the metamorphosis rate of the BF5 population were higher than those of the CG population, but the difference was not significant ($P>0.05$). Following 20 days post hatching, the average shell length of BF5 group was significantly higher than that of the CG group ($P<0.05$), and the average shell length of the BF5 group was 17.47%, 21.34%, and 20.28% higher than that of CG group at 240, 330, and 600 days after hatching, respectively. Following 30 days of exposure to the heat stress caused at 33 °C, the survival rate of BF5 and CG groups was 84.4% and 63.9%, respectively, and this difference was significant ($P<0.05$). Following 30 days of exposure to 16‰ low salt stress, the survival rate of BF5 and CG groups was 69.2% and 56.7%, respectively, with significant differences being observed between the two groups ($P<0.05$). From 150 days after nuclear implantation to the end of the beading period (270 days), the survival rate of BF5 was significantly higher than that of the CG population ($P<0.05$). The survival rate of BF5 was 18.92% higher than that of CG. There was no significant difference between the commercial bead rate and the high-quality bead rate of BF5 and CG ($P>0.05$). The nucleation retention rate and nacre thickness of BF5 were significantly higher than CG ($P<0.05$), and the increase rates were 18.97% and 22.61%, respectively. Our results indicated that BF5 had better pearl production traits. The findings of this study provide basic data for breeding and industrial application of *Pinctada fucata martensii*.

Key words: *Pinctada fucata martensii*; black shell color line; production performance; pearling production performance

Corresponding author: WANG Qingheng. E-mail: wangqh@gdou.edu.cn