

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16088

缢蛏选育系 F₅ 的生长优势比较及育种效应分析

李炼星, 李浩, 杜文俊, 牛东红, 李家乐, 沈和定

上海海洋大学 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306

摘要: 以 6 个缢蛏(*Sinonovacula constricta*)自然群体(浙江象山群体、浙江乐清群体、福建霞浦群体、福建长乐群体、江苏射阳群体和上海崇明群体)为材料, 构建基础群体 F₀。采用群体选育方法进行多代连续选育(选择强度 2.063), 比较了选育系 F₅ 与对照群体的生长差异, 并估计 F₅ 的选择反应、现实遗传力和遗传获得。结果表明, F₅ 的卵径及受精率与对照组无显著差异($P>0.05$), 但 F₅ 的变态率、存活率及后期壳长生长明显优于对照组($P<0.05$); 7~360 日龄 F₅ 壳长的选择反应、现实遗传力与遗传获得的变化范围分别为 0.30~0.78, 0.14~0.37 和 4.83%~42.18%, 平均为 (0.49±0.06), (0.23±0.08)和(26.49±11.73)%。研究结果表明, 对缢蛏的连续多代选育是有效的, 可以明显提高其存活能力和主要经济性状。

关键词: 缢蛏; 群体选育; 选择反应; 现实遗传力; 遗传获得

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)01-0050-07

缢蛏(*Sinonovacula constricta*)是我国四大贝类海产品之一^[1], 肉质多而壳薄, 味道鲜美, 深受广大沿海居民喜爱。我国在 20 世纪 90 年代初开展了缢蛏的人工育苗并且取得成功, 目前养殖单位主要采用人工苗种进行养殖生产, 且用于繁殖人工苗的亲贝多来自池塘人工养殖, 多年的人工养殖与频繁近交必定会导致缢蛏物种多样性下降, 种质退化^[2]。近年来, 1 龄养殖缢蛏个体普遍较小, 2 龄蛏养殖成本过高, 养殖效益差, 市场上仍未有人工选育的缢蛏良种。因此, 通过人工选育对缢蛏进行遗传性状改良, 培育出生长速度快、品质优良、抗逆性强的新品种将是缢蛏养殖业的主要发展方向。

选择育种方法由于其操作简单易行且效果明显, 在目前的贝类育种工作中被广泛应用, 如在马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)^[3-5]、三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)^[6]、牡蛎(*Ostrea edulis*, *O. chilensis*,

Crassostrea virginica)^[7-8]、皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)^[9]、文蛤(*Meretrix meretrix*)^[10]等都开展了选育且取得了较好的进展, 我国已成功选育出“中科红”、“科浙 1 号”、“蓬莱红”、“中国红”和“东优 1 号”等贝类新品种。关于缢蛏的研究多集中于理化性质以及一些分子层面的研究, 包括饵料利用^[11-13]、家系早期生长发育比较^[14]、体内抗氧化酶与消化酶等活性研究^[15-17]以及缢蛏的分子标记和基因及功能研究^[18-23]等, 对缢蛏优良品种选育及从遗传角度分析缢蛏选育进展仍未见报道。随着贝类人工育苗技术推广与应用, 在产量增加的同时也造成贝类种质退化, 因此, 对缢蛏进行种质资源保护、品质改良研究具有重要意义。本研究以生长为目标性状, 采用连续多代选择育种方法, 计算分析了缢蛏选育系 F₅ 的生长优势及育种效应, 阐明新品种优良性状, 为新品种认定和推广提供资料, 为缢蛏养殖业的可持续发展奠定基础。

收稿日期: 2016-03-06; 修订日期: 2016-07-12.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2012AA10A400-3); 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心项目(ZF1206).

作者简介: 李炼星(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为贝类遗传育种. E-mail: 469687126@qq.com

共同第一作者: 李浩.

通信作者: 沈和定(1964-), 男, 教授, 研究方向为贝类增养殖. E-mail: hdshen@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 缢蛏亲贝的来源与选育操作

2007—2008 年, 收集各地的种质资源, 在浙江乐清、福建宁德对 6 个自然群体(江苏射阳、上海崇明、浙江乐清、浙江象山、福建霞浦、福建长乐)进行群体遗传多样性分析的基础上, 构建优良种质基础群体, 各代繁育时间与培育地点见表 1。

表 1 各代缢蛏亲贝繁育时间与培育地点
Tab. 1 Breeding time and nurturing places of each generation of *Sinonovacula constricta*

	代数 generation		
	F ₀	F ₁ , F ₂ , F ₃	F ₄ , F ₅
繁育年份 breeding time	2008	2009–2011	2013–2014
培育地点 nurturing place	乐清, 宁德 Leqing, Ningde	乐清, 宁德 Leqing, Ningde	宁海, 三门 Ninghai, Sanmen

2008 年 9 月, 从基础群体中随机选取 1200 个个体并测量壳长, 通过对壳长进行大小排列后留取前 120 个个体作为繁殖选育系 F₀ 的后备亲本, 催产繁育成功其中个体较大的亲贝约 60 个(留种率 5%, 选择强度 2.063)。采用阴干流水法进行亲贝催产, 幼苗在苗池中培养 40 d(壳长 4~7 mm)后移入土池中进行中间培育和养成。由于浙闽缢蛏育苗场多采用浙江乐清群体成贝作为育苗用亲贝, 确定温州乐清群体亲贝逐年繁育的缢蛏作为对照系。之后重复 F₀ 的选育方法, 即以上一代作为亲蛏进行繁殖选育, 繁育时间均为 9 月, 分别选育到 F₃。2012 年将选育系与对照系搬迁到浙江宁海和三门继续选育, 2013 年获得 F₄。2014 年 9 月, 在选育系 F₄ 为亲本繁育 F₅ 的同时, 从同一池塘养殖的乐清群体对照系中随机取样 120 个个体作为对照组的后备亲本, 试验设置 3 个重复。选育系 F₄ 与对照组亲本的表型性状见表 2。

表 2 缢蛏选育系 F₄ 与对照组亲本的表型性状比较
Tab. 2 Comparison of parent growth traits of the fourth-generation selected line and the control line of *Sinonovacula constricta*

组别 group	壳长 shell length	壳宽 shell height	壳高 shell width
选系 F ₄ fourth-generation selected line	76.34±5.62	19.82±1.44	26.25±1.73
对照组 control line	55.64±8.31	16.62±1.41	20.74±2.63

1.2 幼虫培育与取样

2014 年 9 月 2 日, 将选育系 F₄ 和对照组的亲本分别在 600 L 白桶中进行催产, 视精子浓度情况进行洗卵操作, 若精子浓度过高则在充分排卵(精)后 30~40 min 洗卵 1 次^[24]。待受精卵充分孵化为 D 形幼虫后, 视幼虫密度情况分放入多个 600 L 白桶中(选育系 F₅ 与对照组分开并编号), 按发育生长情况适量投喂叉鞭金藻(*Dicrateria zhanjiangensis*)、亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)、钙质角毛藻(*Chaetoceros calcitrans*)等单胞藻。分别随机测量选育系 F₅ 与对照组中 60 粒卵子卵径大小; 每月分别随机从选育系 F₅ 与对照组中取样 30 个个体测量并记录个体壳长与日龄(第 1 个月测量第 7、14、27 日龄幼虫或稚贝壳长)。

1.3 数据分析

应用 SPSS17.0 软件进行数据处理分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行差异显著性分析, Turkey HSD 进行多重比较, 差异显著性水平设为 0.05。

1.3.1 卵子受精率、幼虫变态率及成活率 受精率为受精卵密度与受精前卵子密度的百分比, 受精标准为受精卵出现第二极体; 幼体存活率为不同日龄幼体密度与初始 D 形幼体密度的百分比; 变态率为长出斧足、水管的幼体(初期稚贝至双水管期稚贝)与 D 形幼虫数量的百分比^[25]。

1.3.2 选择反应 不同日龄选育系 F₅ 选择反应(SR)计算公式^[26]:

$$SR = \frac{BS - BC}{\sigma_{BC}} \quad (1)$$

式中, BS 表示 F₅ 平均壳长(μm), BC 表示对照组平均壳长(μm), σ_{BC} 表示对照组标准差。

1.3.3 现实遗传力 不同日龄选育系 F₅ 壳长的现实遗传力(h_R²)计算公式^[26]:

$$h_R^2 = \frac{\chi_s - \chi_c}{is_c} \quad (2)$$

式中, χ_s 表示 F₅ 的平均壳长((μm), χ_c 表示对照组平均壳长((μm), s_c 表示对照组标准差, i 表示选择强度。

1.3.4 遗传获得 遗传获得(GG_S)计算公式^[26]:

$$GG_S = \frac{RS - XC}{XC} \times 100\% \quad (3)$$

式中, RS 表示第 n 代平均壳长(mm), XC 表示第 n 代之前某一代或基础群体的平均壳长(mm)。

2 结果与分析

2.1 缢蛏选育系 F₅ 与对照组的受精率、卵径及变态率比较

选育系 F₅ 与对照组的受精率无显著差异($P>0.05$), 均在 99% 以上; 平均卵径分别为(91.53 ± 3.16) μm 和 (90.22 ± 4.75) μm , 统计表明无显著性差异($P>0.05$); 选育系 F₅ 的变态率(67.52 ± 2.28)% 显著高于对照组 (59.72 ± 3.36)% ($P<0.05$)(表 3)。

表 3 缢蛏选育系 F₅ 与对照组的卵径、受精率和变态率
Tab. 3 Egg sizes, fertilization rates and metamorphosis in the fifth-generation selected line and the control line of *Sinonovacula constricta*

组别 group	卵径/ μm egg size	受精率/% fertilization rate	变态率/% metamorphosis rate
选育系 F ₅ fifth-generation selected line	91.53 ± 3.16^a	99.74 ± 0.11^a	67.52 ± 2.28^a
对照组 control group	90.22 ± 4.75^a	99.48 ± 0.37^a	59.72 ± 3.36^b

注: 同一列字母上标不同表明差异显著($P<0.05$)。卵径 $n=30$, 受精率与变态率 $n=3$ 。
Note: The different letter in each column means significant difference ($P<0.05$). Egg size $n=30$; fertilization rate and metamorphosis rate $n=3$.

2.2 缢蛏选育系 F₅ 与对照组的壳长生长比较

选育系 F₅ 的幼体壳长在 27 日龄与 36 日龄时显著大于对照组($P<0.05$), 各日龄选育系 F₅ 的壳长平均值均大于对照组; 选育系 F₅ 的壳长由 $385.33\ \mu\text{m}$ 增长至 $3892.52\ \mu\text{m}$, 日壳长增长率 $120.94\ \mu\text{m}/\text{d}$, 对照组的壳长由 $316.82\ \mu\text{m}$ 增长至 $3076.84\ \mu\text{m}$, 日壳长增长率 $95.17\ \mu\text{m}/\text{d}$ (表 4)。

表 4 不同日龄缢蛏选育系 F₅ 和对照组的壳长比较
Tab. 4 Comparison of shell length of the fifth-generation selected line and the control line of *Sinonovacula constricta* at different ages

贝龄/d age	选育系 F ₅ fifth-generation selected	对照组 control line
7	385.33 ± 10.68^a	316.82 ± 19.09^a
14	835.10 ± 50.34^a	629.05 ± 48.22^a
27	2753.03 ± 147.82^a	2135.17 ± 179.09^b
36	3892.52 ± 156.11^a	3076.84 ± 286.50^b

注: 同一行上标字母不同表示数值间差异显著($P<0.05$)。
Note: Values with different letters in each row are significantly different ($P<0.05$).

选育系 F₅ 与对照组的蛏苗在 12 月至次年 2 月间生长缓慢, 应为冬天低气温导致生长停滞的原因; 从 3 月开始, 两组的蛏苗进入快速生长期, 至 6 月生长速度开始降低, 逐渐进入成贝阶段, 能量多供给性腺发育。由此可见, 3—6 月为缢蛏快速生长阶段, 在此时期要格外注意饵料供给; 至 8 月时, 选育系 F₅ 的平均壳长为 $71.43\ \text{mm}$, 显著大于对照组的平均壳长($52.62\ \text{mm}$) ($P<0.05$), 且试验各月选育系 F₅ 的壳长均显著大于对照组($P<0.05$)(图 1)。

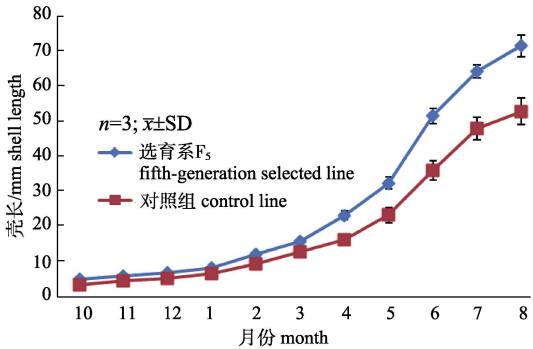


图 1 缢蛏选育系 F₅ 壳长生长与对照组的对比
Fig. 1 Comparison of shell length growth between the fifth-generation selected line and the control line of *Sinonovacula constricta*

2.3 缢蛏选育系 F₅ 与对照组的存活率比较

在试验阶段选育系 F₅ 的存活率均显著大于对照组($P<0.05$); 至 360 日龄时, 选育系 F₅ 的存活率为 (28.75 ± 1.83)%, 对照组为 (19.08 ± 1.63)%, 两者相差 9.67%, 表明选育系 F₅ 的环境适应性高于对照组(表 5)。

表 5 不同日龄缢蛏选育系 F₅ 与对照组存活率的比较
Tab. 5 Comparison of survival rate between the fifth-generation selected line and the control line of *Sinonovacula constricta* at different ages

贝龄/d age	选育系 F ₅ fifth-generation selected line	对照组 control line
7	52.71 ± 1.68^a	48.14 ± 1.34^b
14	47.24 ± 1.57^a	43.85 ± 1.63^b
27	42.53 ± 1.22^a	37.21 ± 1.66^b
36	41.12 ± 1.93^a	34.85 ± 1.53^b
80	38.12 ± 1.36^a	31.60 ± 1.58^b
120	35.66 ± 1.42^a	28.47 ± 1.24^b
180	33.58 ± 1.50^a	25.11 ± 2.31^b
260	31.83 ± 2.17^a	23.37 ± 2.72^b
360	29.75 ± 2.83^a	19.08 ± 3.63^b

注: 同一行上标字母不同表示数值间差异显著($P<0.05$)。
Note: Values with different letters in each row are significantly different ($P<0.05$).

2.4 缢蛏选育系 F₅ 的选择反应与现实遗传力估计

14 日龄的选育系 F₅ 具有最大的选择反应(0.78)与最大的现实遗传力(0.37), 360 日龄成体壳长具有最大的遗传获得(42.18%); 不同日龄 F₅ 的选择反应变化范围为 0.30~0.78, 其平均值为(0.49±0.06); 不同日龄关于 F₅ 壳长的现实遗传力变化范围为 0.14~0.37, 其平均值为(0.23±0.08); F₅ 的遗传获得随日龄的增加从 4.83%增加至 42.18%, 平均值为(26.49±11.73)%(表 6)。

表 6 缢蛏选育系 F₅ 的遗传获得、现实遗传力和选择反应
Tab. 6 Genetic gains, realized heritability and response to selection of the fifth-generation selected line of *Sinonovacula constricta*

贝龄/d age	遗传获得/% genetic gains	现实遗传力 realized heritability	选择反应 selective reaction
7	4.83	0.31±0.05	0.66
14	12.57	0.37±0.07	0.78
27	22.73	0.30±0.05	0.63
36	27.45	0.26±0.04	0.52
80	28.64	0.22±0.05	0.47
120	29.41	0.16±0.03	0.33
180	33.20	0.16±0.06	0.34
260	37.38	0.18±0.05	0.37
360	42.18	0.14±0.04	0.30
平均值 average value	26.49±11.73	0.23±0.08	0.49±0.06

2.5 缢蛏选育系各代的体重及壳长遗传获得

由表 7 可见, 通过各代与上一代的表型差异比较(使用各代 1 龄蛏进行数据采集), 第一代选育系的体重与壳长遗传获得最大, 分别为 16.43%和 10.22%; 之后逐渐变小, 至选育系 F₅ 时分别为 10.36%和 6.67%, 分别降低 5.80%和 3.55%, 5 个世代体重与壳长的平均遗传获得分别为 13.29%和 8.10%。

表 7 缢蛏选育系各代体重与壳长的遗传获得
Tab. 7 Genetic gains of body weight and shell length of each selected generation of *Sinonovacula constricta*

指标 item	代数 generation					%
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	
体重 body weight	16.43	15.33	12.57	11.48	10.63	
壳长 shell length	10.22	8.84	7.42	7.35	6.67	

3 讨论

3.1 缢蛏基础群体遗传变异

目前有较多研究通过对缢蛏遗传结构的 ISSR 和 RAPD 分析, 表明缢蛏群体具有较高的遗传变异, 能对选育起到一定的指导作用。例如, 牛冬红等^[27]的研究结果表明, 其所选的 6 个野生缢蛏群体(宁德、台州、崇明、海阳、汉沽、庄河)的多态位点百分比为 61.59%~72.46%, 平均 Nei's 多样性指数为 0.1641, 高于海洋贝类平均多态位点百分比(45.0%)与平均 Nei's 多样性指数(0.147), 并通过比较得到该 6 个野生缢蛏群体的遗传变异为中等水平, 可以为缢蛏良种选育提供遗传基础; 李成华等^[28]的研究结果与之相似, 同时该研究表明野生群体的遗传多样性水平要优于养殖群体。Hamrick 等^[29]发现, 广布种的遗传多样性水平要高于狭域分布的物种; 缢蛏为我国南北沿海广泛养殖的经济贝类, 其各个地理群体间的遗传多样性水平具有差异, 作者以 6 个自然群体(浙江象山群体和乐清群体、福建霞浦群体和长乐群体、江苏射阳群体、上海崇明群体)构建优秀种质基础群体, 可为进一步选择育种提供基础保障。

3.2 缢蛏选育系 F₅ 与对照组的繁殖生长性能比较

通过连续选育从而提高物种群体某一个或多个性状水平的研究多有报道。例如, 王庆志等^[9]的研究结果表明, 通过对长牡蛎(*Crassostrea gigas*)进行连续选育, 其后代的壳高和活体体重均有显著增加; Haskin 等^[30]的研究表明, 通过对美洲牡蛎(*Crassostrea virginica*)的优良抗单孢子虫病(MSX)个体进行连续选育后, 选育系的抗病能力与野生群体相比提高了 8~9 倍。缢蛏选育系 F₅ 的变态率、1 龄壳长及 1 龄存活率与对照组相比, 分别提高了 7.80%、35.75%和 9.67%, 选育系 F₅ 的生长速度在生长旺盛的 3—7 月也明显高于对照组。综上所述, 对缢蛏壳长进行歧化选择构建优良品系的育种方法是可行的。

3.3 缢蛏选育系 F₅ 的遗传参数分析

本研究显示, 选育系 F₅ 的平均选择反应为(0.49±0.06), 平均现实遗传力为(0.23±0.08), 表明选育系 F₅ 具有较高的选择反应与现实遗传力, 这种现象也见于对其他贝类选择育种的研究。蒋湘等^[24]的研究结果表明, 九孔鲍(*Haliotis diversicolor*)养殖群体选育系 F₁ 壳长的平均遗传增益为 31.63%; 平均现实遗传力为 0.36, 具有较高的选择反应与现实遗传力, 说明对九孔鲍的选育是有效的; Zheng 等^[26]的研究

结果表明,海湾扇贝选育系 F_2 的平均选择反应与现实遗传力估计分别为 (0.612 ± 0.101) 和 (0.349 ± 0.057) , 均处于较高水平。因此,本研究对所构建的缢蛭基础群体进行连续 5 代选育是有效的,并可进一步选育,以达到构建具有优良性状缢蛭品系的目的。

3.4 缢蛭连续选育的遗传获得

本研究分析得到,平均每代体重与壳长的遗传获得分别为 13.29% 和 8.10%, 均处于较高水平。在选育的过程中发现,下一代的遗传获得均小于上一代,说明对缢蛭群体连续选育正在改良壳长与体重等性状,使其向选择极限^[31]靠近且性状遗传趋于稳定。但由平均遗传获得可以看出,距离选择极限仍有较大选择空间,可以对该缢蛭群体继续进行选育以提高育种成果水平。Bolivar 等^[32]的研究结果表明,尼罗罗非鱼(*Tilapia nilotica*)的体重性状进行 12 代连续选育后的平均遗传获得为 12.4%, 这与本研究的平均体重遗传获得相近。

较多研究表明,通过对物种群体进行生长性状连续选育后,其每代生长速率提高约 10%~20%^[33-36]。因此,本研究关于缢蛭的遗传获得为 10.70% 是合理的;同时, F_5 与基础群体相比的壳长遗传获得(42.18%) 与 5 代壳长累积遗传获得(40.50%) 相近,也充分证明了本研究的合理性。缢蛭选育群体壳长的平均遗传获得偏低,究其原因可能是自身遗传性质及环境影响导致。缢蛭是滩涂贝类,需藏身于淤泥洞穴中,过长的身体会降低其对生存环境的适应性,因此在缢蛭选育工作中可考虑将选育重心偏向体重的选育,以获得更切实可行的研究结果。

3.5 缢蛭连续选育的近交衰退问题

近交衰退会导致一些与繁殖能力或生理机能相关的表型性状平均值降低^[37]。在对一个群体进行连续选育的过程中,某些性状得到改良或放大的同时,近交衰退也是必然存在的;且有研究表明,亲本数量是影响近交衰退的一个重要原因^[3]。因此,本研究在选育过程中,每一代都保证了足够的留种个体与相当大的群体后代养殖规模,尽量减小近交衰退所带来的影响。

参考文献:

[1] Xu F S, Zhang S P. Chinese Marine Bivalve Annals[M]. Beijing: Science Press, 2008: 211-213. [徐凤山, 张素萍. 中国海产双壳类图志[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 211-213.]

[2] Wang X Q, Cao M, Yan B L. Analysis of diseases cause and

prevention measures infarming of *Sinonovacula constricta* (Lamarck)[J]. Modern Fisheries Information, 2006, 21(5): 13-16. [王兴强, 曹梅, 阎斌伦. 缢蛭(*Sinonovacula constricta* Lamarck)养殖期间发病原因及防治对策[J]. 现代渔业信息, 2006, 21(5): 13-16.]

[3] Wang A M, Shi Y H, Yan B. Effects of selection on larval growths for second generation of different selected pearl oysters, *Pinctada martensii*[J]. High Technology Letters, 2004(8): 94-97. [王爱民, 石耀华, 阎冰. 选择对不同系列马氏珠母贝第二代幼虫生长的影响[J]. 高技术通讯, 2004(8): 94-97.]

[4] Guan Y Y, Liu W G, He M X. Genetic variation during four generations of selective breeding in the pearl oyster *Pinctada fucata*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(4): 764-770. [管云雁, 刘文广, 何毛贤. 马氏珠母贝选育群体 4 个世代的遗传变异[J]. 中国水产科学, 2013, 20(4): 764-770.]

[5] 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 F_1 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.]

[6] Wu L M, Bai Z Y, Liu X J, et al. Evaluation of shell color and growth traits for F_5 of the freshwater pearl mussel[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(3): 547-554. [吴雷明, 白志毅, 刘晓军, 等. 三角帆蚌 F_5 壳色及生长性状选育效果评价[J]. 中国水产科学, 2016, 23(3): 547-554.]

[7] 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.

[8] Davis C V. Estimation of narrow-sense heritability for larval and juvenile growth traits in selected and unselected sublines of eastern oysters, *Crassostrea virginica*[J]. J Shellfish Res, 2000, 19(1): 613.

[9] Wang Q Z, Li Q, Kong L F, et al. Third generation evaluation of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) breeding lines selected for fast growth[J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(10): 1487-1494. [王庆志, 李琪, 孔令锋, 等. 长牡蛎第三代选育群体生长性状的选择效应[J]. 水产学报, 2013, 37(10): 1487-1494.]

[10] Liu X, Zhang G F, Zhao H E. "Red China" Breeding Lines of *Haliotis discus hannai*[J]. Chinese Journal of Zoology, 2003, 38(4): 27. [刘晓, 张国范, 赵洪恩. 皱纹盘鲍“中国红”品系的选育[J]. 动物学杂志, 2003, 38(4): 27.]

[11] Wang X H, Chai X L, Liu B Z. Estimation of genetic parameters for growth traits in cultured clam *Meretrix meretrix* (Bivalvia: Veneridae) using the Bayesian method based on

- Gibbs sampling[J]. Aquac Res, 2011, 42(2): 240–247.
- [12] Liu G F, Shen H D, Chen H, et al. Effects of different microalgae on ingestion and growth of juvenile razor clam *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009, 18(6): 708–714. [刘广丰, 沈和定, 陈慧, 等. 不同微藻对缢蛏稚贝摄食和生长的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(6): 708–714.]
- [13] Ma B, Zhou H B, Xu J L, et al. Screening of high-quality feed microalgae in cultivation of juvenile intertidal shellfish, *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2011, 24(4): 5–9. [马斌, 周海波, 徐继林, 等. 缢蛏稚贝优质微藻饵料的筛选[J]. 宁波大学学报(理工版), 2011, 24(4): 5–9.]
- [14] Liu G F, Chen H, Li J L, et al. Artificial propagation of razor clam *Sinonovacula constricta* by alga *Chlorella* sp.[J]. Fisheries Science, 2009, 28(4): 192–195. [刘广丰, 陈慧, 李家乐, 等. 用小球藻进行缢蛏人工繁育技术试验[J]. 水产科学, 2009, 28(4): 192–195.]
- [15] Li D, Du W J, Niu D H, et al. Comparison of early growth performance among families of *Sinonovacula constricta*[J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(10): 36–41. [李多, 杜文俊, 牛东红, 等. 缢蛏家系早期生长表现比较[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(10): 36–41.]
- [16] Liu H M, Dong Y H, Huo L H, et al. Acute toxicity of Cu^{2+} and its effects on antioxidant enzymes in *Sinonovacula constricta* juveniles[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(1): 182–187. [刘浩明, 董迎辉, 霍礼辉, 等. Cu^{2+} 对缢蛏稚贝的急性毒性及对抗氧化酶活力和丙二醛含量的影响[J]. 中国水产科学, 2012, 19(1): 182–187.]
- [17] Zhang C J, Liu J, Chen J H, et al. Effects of starvation and refeeding on digestive enzyme activity and antioxidative capacity of razor clam (*Sinonovacula constricta*)[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(7): 1106–1112. [章承军, 刘健, 陈锦辉, 等. 饥饿再投喂对缢蛏消化酶活力和抗氧化能力的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(7): 1106–1112.]
- [18] Lu H X, Xu Y J. Effects of cadmium on antioxidant enzyme activity and DNA damage in *Sinonovacula constricta*[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(1): 96–101. [陆慧贤, 徐永健. 镉胁迫下缢蛏(*Sinonovacula constricta*)抗氧化酶活性及 DNA 损伤的研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 96–101.]
- [19] Niu D H, Xie S M, Bai Z Y, et al. Identification, expression, and responses to bacterial challenge of the cathepsin C gene from the razor clam *Sinonovacula constricta*[J]. Dev Comp Immunol, 2014, 46(2): 241–245.
- [20] Astorga M P. Genetic considerations for mollusk production in aquaculture: current state of knowledge[J]. Front Genet, 2014, 5: 435.
- [21] Niu D H, Feng B B, Liu D B, et al. Microsatellites and mitochondrial CO I analysis of population genetic structure of *Sinonovacula constricta* along the coast of Zhejiang and Fujian Provinces[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(12): 1805–1813. [牛东红, 冯冰冰, 刘达博, 等. 浙闽沿海缢蛏群体遗传结构的微卫星和线粒体 CO I 序列分析[J]. 水产学报, 2011, 35(12): 1805–1813.]
- [22] Liu B, Shao Y Q, Teng S S, et al. Characterization, development and utilization of EST-derived microsatellites in *Sinonovacula constricta*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(1): 132–137. [刘博, 邵艳卿, 滕爽爽, 等. 缢蛏(*Sinonovacula constricta*)EST-SSR 分布特征及引物开发利用[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 132–137.]
- [23] Xie S M, Niu D H, Ruan H D, et al. Molecular characterization of IGFBP and association analysis with growth traits in the razor clam *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Fisheries of China, 2015, 39(6): 799–809. [谢淑媚, 牛东红, 阮海灯, 等. 缢蛏 IGFBP 基因结构及生长性状相关 SNP 筛选[J]. 水产学报, 2015, 39(6): 799–809.]
- [24] Jiang X, Liu J Y, Lai Z F. Selective responses and realized heritability estimation for a cultured *Halotis diversicolor aquatilis* population[J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(2): 9–13. [蒋湘, 刘建勇, 赖志服. 九孔鲍选择群体 F_1 的选择反应与现实遗传力估计[J]. 南方水产科学, 2013, 9(2): 9–13.]
- [25] Lin B S, Wu T M. The Effects of temperature and salinity on the larvae of *Sinonovacula constricta* (Lamarck)[J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, 4(4): 385–392. [林笔水, 吴天明. 温度和盐度对缢蛏浮游幼虫发育的影响[J]. 生态学报, 1984, 4(4): 385–392.]
- [26] 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.
- [27] Niu D H, Li J L, Feng B B, et al. ISSR analysis on genetic structure of six *Sinonovacula constricta* populations[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2009, 15(3): 332–336. [牛东红, 李家乐, 冯冰冰, 等. 缢蛏 6 个群体遗传结构的 ISSR 分析[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(3): 332–336.]
- [28] Li C H, Li T W, Song L S, et al. Genetic variations among four populations of *Sinonovacula constricta* by using random amplified polymorphic DNA[J]. Fisheries Science, 2004, 23(12): 26–28. [李成华, 李太武, 宋林生, 等. 4 个缢蛏群体遗传结构的 RAPD 分析[J]. 水产科学, 2004, 23(12): 26–28.]
- [29] Hamrick J L, Godt M J W. Conservation genetics of endemic plant species[M]//Avis J C, Hamrick J L. Conservation Genetics: Case Histories from Nature. New York: Chapman and Hall, 1996: 281–304.
- [30] Haskin L E, Ford S E. Development of resistance to *Minchinia nelsoni* (MSX) mortality in laboratory reared and native oyster stocks in Delaware Bay[J]. Mar Fish Rev, 1979, 41(1–2): 54–59.
- [31] Luo M F. Population genetic theory of inertia and limit selection[J]. Journal of Yellow Cattle Science, 1993, 19(1): 6–9. [雒鸣峰. 群体遗传惯性理论与选择极限[J]. 黄牛杂

- 志, 1993, 19(1): 6–9.]
- [32] Bolivar R B, Newkirk G F. Response to within family selection for body weight in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using a single-trait animal model[J]. Aquaculture, 2002, 204(3–4): 371–381.
- [33] Ma A J, Wang X A, Huang Z H, et al. Response to selection and realized heritability for early growth in the second-generation bred line of turbot (*Scophthalmus maximus* L.)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(1): 57–61. [马爱军, 王新安, 黄智慧, 等. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)家系选育 F₂ 早期选择反应和现实遗传力估计[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 57–61.]
- [34] Zhu X W, Liu Z G, Wang H, et al. Growth and genetic diversity for four shell color lines (F₅) of the pearl oyster *Pinctada martensii*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(1): 160–165. [朱晓闻, 刘志刚, 王辉, 等. 马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)四种壳色选育系 F₅ 的生长及遗传多样性分析[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 160–165.]
- [35] Gjedrem T. Genetic improvement of cold-water fish species[J]. Aquac Res, 2000, 31(1): 25–33.
- [36] Chen J, Liu Z G, Wu S R, et al. Growth and microsatellite analysis of F₅ selected line of *Argopecten irradians concentricus* [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(4): 783–788. [陈静, 刘志刚, 邬思荣, 等. 海湾扇贝南部亚种(*Argopecten irradians concentricus*)选育系 F₅ 的生长及 SSR 分析[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(4): 783–788.]
- [37] Falconer D S. Introduction to Quantitative Genetics [M]. 3rd ed. London: Longman, 1981: 65.

Growth comparison and selective breeding of a fifth-generation selected line of *Sinonovacula constricta*

LI Lianxing, LI Hao, DU Wenjun, NIU Donghong, LI Jiale, SHEN Heding

Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources of Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The razor clam *Sinonovacula constricta* is widely distributed in China, Japan, and Korea. The razor clam has high nutritive and economic value and is one of four marine bivalves produced in China. Artificial breeding and frequent inbreeding have decreased the genetic diversity of razor clams, and the germplasm resources are degraded. As a result, massive razor clam mortalities occur occasionally. Cultured clams are generally small and have poor disease resistance, and no superior commercial razor clam varieties have been bred for the commercial market. Therefore, improving genetic traits and breeding outstanding varieties of razor clams via artificial selection are primary goals of razor clam culture. In this study, six natural populations of *S. constricta* (Zhejiang Xiangshang and Leqing populations, Fujian Xiapu and Changle populations, Jiangsu Sheyang and Shanghai Chongming populations) were selected as the F₀ material structure foundation populations, and continuous multiple-generational breeding (selection intensity: 2.063) was carried out using the mass selection method. The growth difference between the F₅ breeding strain and a control population was compared. The selection response, realized heritability, and F₅ heredity acquisition were evaluated. The results showed no differences in egg diameter or fertilization rate between the F₅ generation ($P>0.05$) and the control group. However, the metamorphosis rate, survival rate, and late growth in shell length of the F₅ generation were significantly superior to those of the control group ($P<0.05$). Variations in the selection response of shell length, realized heritability, and heredity acquisition of F₅ during days 7–360 were 0.30–0.78, 0.14–0.37, and 4.83%–42.18%, respectively, and the means were (0.49 ± 0.06) , (0.23 ± 0.08) , and $(26.49\pm 11.73)\%$, respectively. These results suggest that continuous multiple-generational breeding of razor clams was effective, as it significantly improved survivability and the major economically important traits. Continuous selection of five generations of razor clams was effective, making further breeding to identify new razor clam varieties with desirable traits possible. The genetic gain in shell length was generally low, probably because of genetics and environmental factors. Razor clams are a mudflat bivalve that hide in silt, and their long body reduces adaptability to the environment. Hence, breeding should focus on weight selection to obtain more practical results.

Key words: *Sinonovacula constricta*; mass selection; selection response; realized heritability; heredity acquisition/inherited

Corresponding author: SHEN Heding. E-mail: hdshen@shou.edu.cn