

长牡蛎第三代选育群体生长性状的选择效应

王庆志^{1,2}, 李 琪^{1*}, 孔令锋¹, 于瑞海¹

(1. 中国海洋大学水产学院,海水养殖教育部重点实验室,山东 青岛 266003;

2. 辽宁省海洋水产科学研究院,辽宁 大连 116023)

摘要: 为了培育长牡蛎的高产抗逆新品种,实验采用群体选育方法构建了中国、日本和韩国 3 个种群快速生长选育系,2007 年至今已连续进行了 6 代选育。本实验对长牡蛎选育 F₃ 代壳高和活体体质量的增长、选择反应和遗传获得等遗传参数进行了分析。结果表明,从第 120 日龄开始,中国、日本和韩国 3 个选育群体的壳高和活体体质量均显著高于对照组,在 420 日龄时,平均壳高较对照组分别高 13.4%、10.1% 和 10.5%,平均活体体质量较对照组分别重 18.5%、13.4% 和 11.6%;壳高的平均现实遗传力分别为 0.447 ± 0.226、0.471 ± 0.297 和 0.367 ± 0.167,表明适于对壳高的生长速度进行进一步的选育。长牡蛎中国、日本和韩国选育 F₃ 代活体体质量的遗传获得平均值分别为 16.01% ± 3.82%、15.03% ± 5.21% 和 11.57% ± 5.15%,表明对长牡蛎壳高的生长速度进行选育时,活体体质量的生长速度也得到了明显提高。本研究结果可以为长牡蛎快速生长品系的连续选育提供依据。

关键词: 长牡蛎; 快速生长; 选育; 选择效应

中图分类号: Q 346; S 917.4

文献标志码: A

长牡蛎(*Crassostrea gigas*)又称太平洋牡蛎,是世界上最重要的经济贝类之一,我国牡蛎产量已稳居世界首位^[1]。近年来,养殖长牡蛎出现的生长缓慢、出肉率低、形态不规则、抗病和抗逆性下降等问题,已成为制约我国牡蛎养殖业健康发展的瓶颈。人工选择育种是使经济动植物在生长速度、产量、抗病、抗逆性等方面获得显著改良的有效方法。研究表明,人工选育可以使牡蛎的生长、存活、抗病力等性状得到显著提高^[2-3],国外已成功培育出长牡蛎^[4]和悉尼岩牡蛎(*Saccostrea commercialis*)^[5]等重要经济牡蛎的快速生长品系;美洲牡蛎(*C. virginica*)的抗尼氏单孢子虫病(MSX)^[6]、悉尼岩牡蛎的抗寄生虫病(QX)品系^[7]和欧洲牡蛎(*Ostrea edulis*)的抗“Bonamia”品系^[8]。我国对皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)^[9]、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)^[10]、珠母贝(*Pinctada fucata*)^[11]和虾夷扇贝

(*Patinopecten yessoensis*)^[12]等经济贝类的人工选育工作也取得了较好的进展。因此,对养殖的长牡蛎进行遗传改良,培育生长快、抗逆性强的新品种,是保证我国牡蛎养殖产业健康持续发展的有效途径之一。

在众多选择育种方法中,群体选育只须根据个体表型值进行选择,具有操作简单易行,所需投入少,当目标性状遗传力较高时易于获得较大的遗传反应等优点^[13],通过群体选育使鱼、蟹、贝等水产动物的经济性状得到成功遗传改良已有较多报道^[14-16]。而长牡蛎的壳高、重量等生长性状具有较高的遗传力^[17-20],尤其适于用群体选育方法对其进行遗传改良。因此,在查清长牡蛎不同种群的遗传多样性和遗传分化的基础上^[21],自 2007 年率先在我国开展了长牡蛎的高产抗逆优良品种选育工作,用群体选育方法构建了中国、日本和韩国 3 个种群快速生长选育系,至 2012 年已经连

收稿日期:2013-05-09 修回日期:2013-08-21

资助项目:国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA10A409;2012AA10A405-6);国家重点基础研究发展计划(2010CB126406)

通信作者:李 琪,E-mail:qili66@ouc.edu.cn

续选育6代,选育系 F_1 和 F_2 的生长速度得到了显著提高^[22-24]。本研究对2009年建立快速生长选育系 F_3 的选择反应、遗传获得和现实遗传力进行了分析,旨在为长牡蛎快速生长品系的连续选育提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 选育谱系

2007年6月,根据群体选育原理^[13],以中国威海、日本宫城和韩国釜山的养殖牡蛎群体为亲本,分别构建了长牡蛎3个群体的快速生长选育系 F_1 (中国群体,CS1;日本群体,JS1;韩国

群体,KS1)^[22];2008年7月以生长至成体的 F_1 为亲本构建了选育系 F_2 (CS2、JS2、KS2)^[23]。2009年7月以生长至成体的 F_2 群体为亲本,利用截头选择法构建了选育 F_3 (CS3、JS3、KS3)。亲本基础群体的数量分别为1300、1200和1200个,对 F_2 基础群体的壳高进行全部的测量,然后分别从各群体中选出100个壳高最大的个体作为 F_3 繁育亲本,同时各随机选取100个体为亲本构建对照组 F_3 (CC3、JC3、KC3)。选育世代的系谱和每代所用的亲本数量、选择压、选择强度等信息见图1。

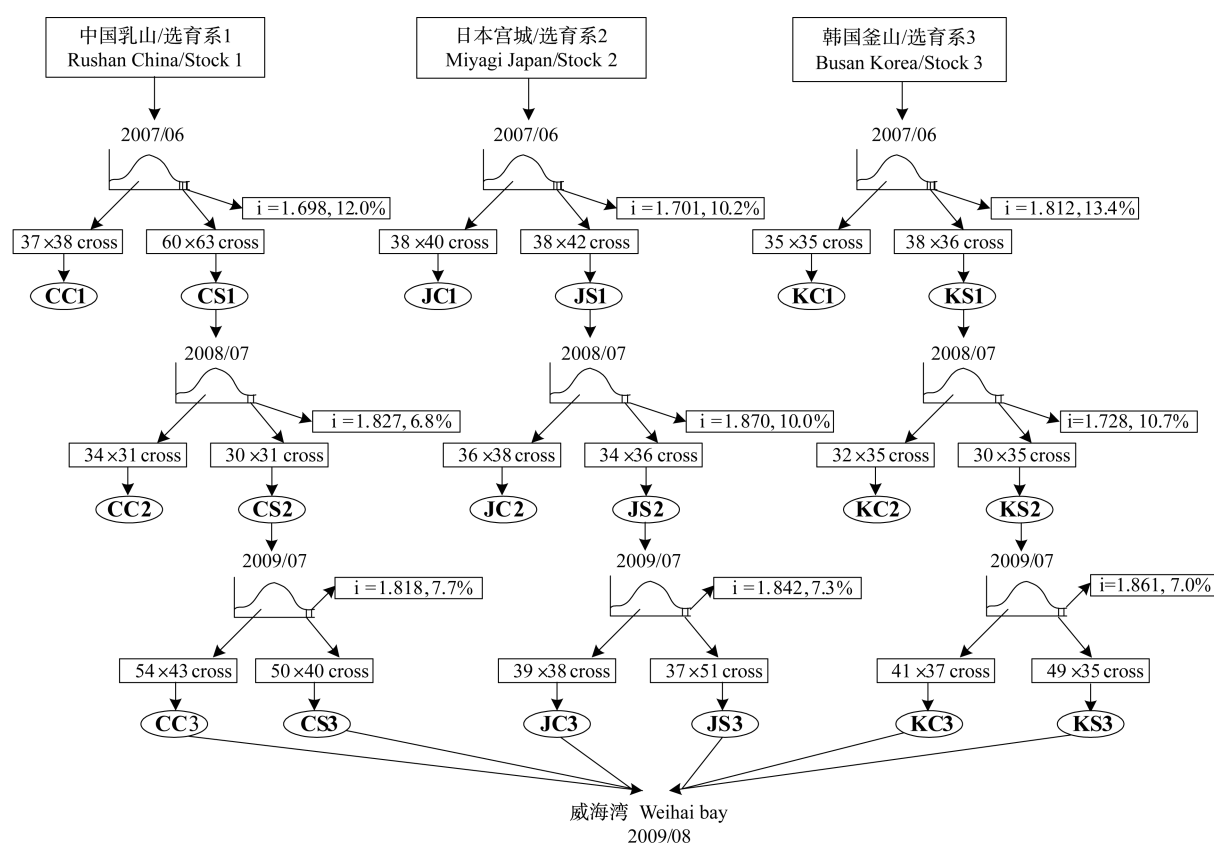


图1 长牡蛎快速生长品系连续3代选育系谱图

Fig. 1 Pedigree of selected lines indicating founder stock and selection intensity (i) for successive three-generation selection in *C. gigas*

1.2 受精卵获得

2009年7月上旬,从性腺发育成熟的 F_2 个体中选取构建 F_3 选育组和对照组的亲本,分别进行受精。采用解剖法移去牡蛎的右壳,以解剖刀取生殖腺涂于载玻片上辨别性别。辨别全部结束后,分别收集雌性配子于容器内,显微镜下估算密度,确保各亲本卵子的使用量相同,将各亲本的卵

子混合于同一容器中,加海水稀释、熟化。卵子熟化时,开始收集雄性配子。辨别和收集过程中,雌、雄个体严格隔离。在人工授精前对卵子进行检查,在未发生意外受精的前提下,将精子和已熟化好的卵子混合,保证每个卵子周围有50~100个精子。将不同实验组的受精卵分别置于20 m³的水泥池中,于23℃水温下孵化。

1.3 幼虫培育与采苗

经约 24 h,受精卵发育至 D 型幼虫。定量后将各组幼虫分别移入 20 m³ 的水泥池中培养,初始密度为 10 个/mL。保证各组密度、饵料、水温和盐度等环境条件相同。前期饵料为等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*),壳高达 120 μm 后加投扁藻 (*Platymonas helgolandica*)。日换水 1 次,换水量为水体的 1/3 ~ 1/2,每隔 7 天倒池 1 次。每隔 3 ~ 4 d 取样计算各组幼虫密度,使各组保持相同的培育密度。当幼虫壳高生长至约 350 μm,眼点出现率达 10% ~ 20% 时,开始投放附着基。附着基为壳质坚硬的扇贝壳,扇贝壳经除去表面污物,充分冲洗浸泡后使用。180 ~ 200 片扇贝壳串成 1 串,垂悬于培育池中供牡蛎幼体附着。根据培育池内幼体数量投放适量扇贝壳串,使每片扇贝壳附着 20 ~ 30 个牡蛎苗,全部附着后培养 3 ~ 5 d 出池。

1.4 养成和取样

在牡蛎 60 日龄时开始进行浮筏夹绳养成。海上养成前各实验组合分别取 100 个个体测量壳高。养成海区位于威海刘公岛海区 (37.3°N, 122.1°E)。用直径 1.2 ~ 1.5 cm 聚丙烯绳做夹苗绳(长 4.0 ~ 5.0 m),将附有 20 ~ 30 个稚贝的扇贝壳夹在苗绳中间,每绳夹 15 ~ 20 片,苗绳下端坠一个 0.2 ~ 0.3 kg 的石块,以保持苗绳垂直并避免相互缠绕。浮筏长 80 ~ 100 m,苗绳间距 30 ~ 40 cm。分别在 120、240、300、340 和 380 日龄时进行取样。每次各实验组随机取 3 条苗绳,每条苗绳随机测量 50 个体,用数字式电子游标卡尺测量个体的壳高(精确度 0.01 mm),用电子天平测量个体的湿重(精确度 0.1 g)。

1.5 数据分析

以 60 日龄壳高为协变量进行协方差分析,比较群体内选择组和对照组壳高的差异。用单因素方差分析(One-Way ANOVA)比较群体内选择组和对照组活体体质量的差异。所有统计分析均由 SPSS 16.0 分析软件完成,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

1.6 遗传参数估计

参照 Zheng 等^[10]的方法计算标准选择反应(SR)、现实遗传力(h_R^2)和遗传获得(GG)。

$$h_R^2 = \frac{X_s - X_c}{i\sigma_c}$$

$$SR = \frac{X_s - X_c}{\sigma_c}$$

$$GG(\%) = \frac{X_s - X_c}{X_c} \times 100$$

式中, X_s 和 X_c 分别是选择组和对照组的平均壳高, σ_c 是对照组的标准差, i 是选择强度。

2 结果

2.1 亲本选择

各实验组均选用 100 个个体作为繁殖亲本,部分亲本因性腺发育不好未被使用,中、日、韩选育群体所用的亲本数分别为 90、88 和 84 个,选择压分别为 7.7%、7.3% 和 7.0%,选择强度分别为 1.818、1.842 和 1.861。对照组所用的亲本数分别为 97、77 和 88 个(图 1)。

2.2 壳高

以 60 日龄壳高为协变量的协方差分析结果表明,从第 120 日龄开始,选择组的壳高显著高于对照组($P < 0.05$)。在 420 日龄时,CS3 和 CC3 的平均壳高分别为(8.64 ± 0.80) cm 和(7.62 ± 0.98) cm,差异 13.4%;JS3 和 JC3 的平均壳高分别为(9.62 ± 0.54) cm 和(8.74 ± 0.67) cm,差异 10.1%;KS3 和 KC3 的平均壳高分别为(8.18 ± 0.66) cm 和(7.40 ± 0.79) cm,差异 10.5%(表 1)。

2.3 活体体质量

从第 240 日龄开始,选择组的活体体质量显著高于对照组($P < 0.05$)。在 420 日龄时,CS3 和 CC3 的平均活体体质量分别为(51.22 ± 6.67) g 和(43.24 ± 8.91) g,增长 18.5%;JS3 和 JC3 的平均活体体质量分别为(56.24 ± 6.74) g 和(49.59 ± 7.07) g,增长 13.4%;KS3 和 KC3 的平均活体体质量分别为(50.48 ± 6.94) g 和(45.24 ± 7.81) g,增长 11.6%(表 2)。

2.4 遗传参数

中、日、韩 3 个选育群体选择反应的平均值分别为 0.812 ± 0.411、0.868 ± 0.547 和 0.676 ± 0.307;遗传获得的平均值分别为 12.37% ± 2.11%、10.97% ± 2.97% 和 9.58 ± 2.02%;现实遗传力的平均值分别为 0.447 ± 0.226、0.471 ± 0.297 和 0.367 ± 0.167(表 3)。

中、日、韩 3 个选育群体选择反应的平均值分别为 1.259 ± 0.824、1.114 ± 0.592 和 0.837 ±

0.298; 遗传获得的平均值分别为 $16.01\% \pm$ (表4)。
 3.82% 、 $15.03\% \pm 5.21\%$ 和 $11.57\% \pm 5.15\%$

表1 长牡蛎选育 F_3 及对照组在不同日龄的壳高
Tab.1 Mean shell height and standard deviation (SD) of the third generation of *C. gigas* breeding lines at different ages

牡蛎日龄/d oyster ages	中国群体 Stock C		日本群体 Stock Japan		韩国群体 Korea	
	CS3	CC3	JS3	JC3	KS3	KC3
60	0.67(0.20)	0.64(0.22)	0.80(0.21)	0.75(0.22)	0.65(0.19)	0.63(0.21)
120	2.85 ^a (0.76)	2.62 ^b (0.82)	2.88 ^a (0.52)	2.67 ^b (0.78)	2.62 ^a (0.48)	1.48 ^b (0.76)
240	3.31 ^a (0.63)	2.98 ^b (0.65)	3.06 ^a (0.68)	2.82 ^b (0.70)	3.13 ^a (0.54)	2.86 ^b (0.55)
300	3.97 ^a (0.72)	3.51 ^b (0.73)	3.81 ^a (0.67)	3.43 ^b (0.72)	3.82 ^a (0.52)	3.45 ^b (0.61)
340	6.56 ^a (0.68)	5.72 ^b (0.60)	6.36 ^a (0.64)	5.48 ^b (0.59)	6.18 ^a (0.52)	5.56 ^b (0.69)
380	7.21 ^a (0.74)	6.37 ^b (0.83)	7.87 ^a (0.56)	7.01 ^b (0.68)	6.84 ^a (0.68)	6.22 ^b (0.70)
420	8.64 ^a (0.80)	7.62 ^b (0.98)	9.62 ^a (0.54)	8.74 ^b (0.67)	8.18 ^a (0.66)	7.40 ^b (0.79)

注:不同字母代表同一群体中不同处理组差异显著 ($P < 0.05$); 下同

Notes: Different superscript letters indicate significantly difference ($P < 0.05$) between two crosses within each stock. The same as the following

表2 长牡蛎选育 F_3 及对照组在不同日龄的活体体质量
Tab.2 Mean total weight and standard deviation (SD) of the third generation of *C. gigas* breeding lines at different ages

牡蛎日龄/d oyster ages	中国群体 Stock C		日本群体 Stock J		韩国群体 Stock K	
	CS3	CC3	JS3	JC3	KS3	KC3
120	1.83(0.15)	1.66(0.22)	1.90(0.10)	1.74(0.20)	1.65(0.14)	1.56(0.18)
240	2.89 ^a (0.13)	2.54 ^b (0.20)	2.03 ^a (0.14)	1.84 ^b (0.16)	2.68 ^a (0.22)	2.42 ^b (0.20)
300	4.99 ^a (0.18)	4.31 ^b (0.25)	3.94 ^a (0.22)	3.42 ^b (0.23)	4.56 ^a (0.25)	4.28 ^b (0.26)
340	26.34 ^a (5.16)	22.62 ^b (6.56)	24.85 ^a (5.51)	20.81 ^b (6.56)	23.54 ^a (4.45)	19.78 ^b (4.64)
380	32.93 ^a (5.96)	27.14 ^b (6.84)	30.74 ^a (5.86)	25.07 ^b (6.45)	27.78 ^a (5.14)	24.0 ^b (5.71)
420	51.22 ^a (6.67)	43.24 ^b (8.91)	56.24 ^a (6.74)	49.59 ^b (7.07)	50.48 ^a (6.94)	45.24 ^b (7.81)

表3 长牡蛎选育 F_3 不同生长阶段壳高的选择反应、遗传获得和现实遗传力
Tab.3 Standardized response to selection (SR), current genetic gains (GG) and realized heritability (h_r^2) of shell height in the third generation of *C. gigas* breeding lines

牡蛎日龄/d oyster ages	选择反应 SR			遗传获得/% GG			现实遗传力 h_r^2		
	CS3	JSF3	KS3	CS3	JSF3	KS3	CS3	JS3	KS3
120	0.280	0.269	0.184	8.78	7.87	5.65	0.154	0.146	0.100
240	0.508	0.343	0.491	11.07	8.51	9.44	0.279	0.186	0.267
300	0.630	0.528	0.607	13.11	11.08	10.72	0.347	0.287	0.329
340	1.400	1.492	0.886	14.69	16.06	11.15	0.770	0.810	0.481
380	1.012	1.265	0.899	13.19	12.27	9.97	0.557	0.687	0.488
420	1.041	1.313	0.987	13.39	10.07	10.54	0.573	0.713	0.536
mean	0.812	0.868	0.676	12.37	10.97	9.58	0.447	0.471	0.367
SD	0.411	0.547	0.307	2.11	2.97	2.02	0.226	0.297	0.167

表 4 长牡蛎选育 F₃ 不同生长阶段活体体质量的选择反应和遗传获得
 Tab. 4 Standardized response to selection (SR) and current genetic gains (GG) of total weight in the third generation of *C. gigas* breeding lines

牡蛎日龄/d oyster ages	选择反应 SR			遗传获得/% GG		
	CS3	JSF3	KS3	CS3	JSF3	KS3
120	0.773	0.800	0.500	10.24	9.20	5.77
240	1.750	1.188	1.300	13.78	10.33	10.74
300	2.720	2.261	1.077	15.78	15.20	6.54
340	0.567	0.616	0.810	16.45	19.41	19.01
380	0.846	0.879	0.662	21.33	22.62	15.75
420	0.896	0.941	0.671	18.46	13.41	11.58
mean	1.259	1.114	0.837	16.01	15.03	11.57
SD	0.824	0.592	0.298	3.82	5.21	5.15

3 讨论

牡蛎具有繁殖力高的特性,单个成体长牡蛎的怀卵量可达 1 000 万以上,在牡蛎的苗种生产中因亲本数量过少、雌雄比例不当、亲本贡献不均、配子竞争等因素易引起少数亲本产生大量后代,导致后代的遗传多样性降低和近交衰退^[25]。Appleyard 等^[26]用同工酶和微卫星标记对长牡蛎野生群体和人工连续选育群体等位基因丰富度的研究表明,选育群体较野生群体下降了 13.9%~28.0%;Lind 等^[27]用微卫星标记对大珠母贝 (*P. maxima*) 的野生群体与人工养殖群体的遗传结构进行了比较,发现养殖群体较野生群体的等位基因丰富度下降了 29%~44%。使用尽量多的亲本和平衡的亲本雌雄比例可以有效避免有效群体数量和遗传多样性降低^[14],Bentsen 等^[28]利用计算机模拟分析得出的结果表明,每代至少使用 50 对亲本可使群体的近交保持较低水平。本研究中每代选育使用 30~50 对亲本(图 1),采用解剖受精法确保足够的亲本数量、平衡的雌雄比例和相同的配子量,同时不采用淘汰小个体的方法进行“选优”,以期避免选育世代的遗传多样性降低。王庆志等^[24]用微卫星标记对长牡蛎 3 代选育群体遗传多样性的研究发现,与野生群体和基础群体相比,3 代选育群体的平均等位基因数和等位基因丰富度略有下降,但杂合度水平未发生明显变化。因此,本研究采用的选育方法尚未对连续 3 代选育群体的遗传多样性产生不利影响,仍可以一定的选择压进行连续选育。

群体选育是根据个体的表型进行选择的方法,操作简单易行,且容易取得成功,尤其适用于遗传力较高的性状。在长牡蛎生长性状遗传力估计的研究中,Langdon 等^[17]将构建的全同胞家系置于 3 个海区环境下养成,利用亲本回归法得到产量(24 月龄,总重/袋)的现实遗传力为 0.01~0.50,尤其当亲本和子代于同一环境养成时,易表现出较高的遗传力;Evans 等^[29]将构建的 34 个全同胞家系置于 4 种不同养殖环境下进行养成,得到 192 日龄、370 日龄和 664 日龄产量的遗传力范围为 0.218~0.539;王庆志等^[20]2009 年和 2010 年分别构建了 24 个和 32 个长牡蛎全同胞家系,利用 REML 方法计算表型变量的方差组分,得到 360 日龄壳高和活体体质量的遗传力分别为 0.35 和 0.27;在中、日、韩 3 个群体选育 F₁ 中得到的壳高现实遗传力分别为 0.342、0.390 和 0.188^[22],F₂ 中得到的壳高现实遗传力分别为 0.336、0.345 和 0.345^[23]。本研究中 F₃ 壳高的现实遗传力分别为 0.447±0.226、0.471±0.297 和 0.367±0.167,表明长牡蛎的壳高和活体体质量具有较高的遗传力,适于用群体选育方法对生长性状进行人工选育。

群体选育在贝类的人工选育上已有较多成功范例,Nell 等^[30-31]建对悉尼岩牡蛎活体体质量的遗传改良中,活体体质量第 1 代增加 4%,第 2 代增加 18%,至第 4 代时,选育系生长至商品规格所需时间比未经选育的牡蛎平均缩短了 12.5 个月;Newkirk 等^[32]对欧洲牡蛎进行了连续选育,经过一代选育使 2 龄选育群体的个体体质量较对照

组高出 8%~38% ;Ward 等^[4]通过歧化选择建立了长牡蛎的上选系和下选系,发现上选系的生长速度显著高于下选系;Hershberger 等^[33]通过人工选育降低了长牡蛎的夏季死亡率。在对不同扇贝生长的选育中,每代可获得 8%~10% 的改良效果^[10,12,34]。本实验选育结果表明,中、日、韩 3 个群体选育 F₁ 在 360 日龄时,壳高较对照组分别增长 12.2%、12.2% 和 7.9%^[22];选育 F₂ 在 400 日龄时,壳高较对照组分别增长 9.1%、10.2% 和 9.7%^[23]。在本研究中,F₃ 选育群体在 420 日龄时,壳高较对照组分别增长 13.4%、10.1% 和 10.5%,活体质量较对照组分别增长 18.5%、13.4% 和 11.6%。因此,连续 3 代选育使长牡蛎的生长速度得到了显著提高。

在选择育种工作中,对易于度量且遗传力较高的性状可以通过直接选育获得理想的效果,而对不易度量或遗传力较低的性状,可以利用性状间的相关性进行间接选育。生物体不同的性状间存在不同程度的相关性,性状间的表型相关包括遗传相关和环境相关,遗传相关是由基因连锁和基因的多效性引起的,性状间遗传相关越大,间接选育的效果就越好^[13]。Ibarra 等^[34]对扇贝(*A. venricosus*)的壳宽进行选育时,发现对活体体质量的遗传改良效果几乎为零,但如果对活体体质量进行选育,却可以使壳宽得到显著增加。Toro 等^[35]对欧洲牡蛎的活体体质量进行选育时,发现牡蛎的壳高生长速度也得到了显著提高,活体体质量和壳高之间的遗传相关可达 0.9 以上。He 等^[11]对珠母贝的壳高进行选育时,壳高和活体体质量的生长速度均得到了显著提高。王庆志等^[20]报道长牡蛎成体阶段性状间的表型相关和遗传相关均为正相关,如壳高与总重、肉重和出肉率的遗传相关分别为 0.28、0.90 和 0.21,推测对成体阶段的某一生长性状进行选育时,其它性状将可获得间接的选育。在本研究中,F₃ 选育群体的活体体质量在不同日龄时均显著高于其对照组,遗传获得的平均值分别为 16.01%、15.03% 和 11.57%,表明对长牡蛎壳高的生长速度进行选育时,活体体质量的生长速度也得到了明显提高。

参考文献:

[1] 农业部渔业局. 2012 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2012.

- [2] Sheridan A K. Genetic improvement of oyster production-a critique [J]. Aquaculture, 1997, 153 (3-4): 165-179.
- [3] 肖述, 喻子牛. 养殖牡蛎的选择育种研究与实践 [J]. 水产学报, 2008, 32(2): 287-295.
- [4] Ward R D, English L J, Mcgoldrick D J, et al. Genetic improvement of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg) in Australia [J]. Aquaculture Research, 2000, 31(1): 35-44.
- [5] Nell J A, Perkins B. Evaluation of progeny of fourth generation Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata* (Gould, 1850) breeding lines [J]. Aquaculture Research, 2005, 36(8): 753-757.
- [6] Haskin H H, Ford S E. Development of resistance to *Minchinia nelsoni* (MSX) mortality in laboratory-reared and native oyster stocks in Delaware Bay [J]. Marine Fisheries Review, 1979, 41(1-2): 54-63.
- [7] Nell J A, Perkins B. Evaluation of the progeny of third-generation Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata* (Gould, 1850) breeding lines for resistance to QX disease *Marteilia sydneyi* and winter mortality *Bonamia roughleyi* [J]. Aquaculture Research, 2006, 37(7): 693-700.
- [8] Naciri-Graven Y, Martin A G, Baud J P, et al. Selecting the flat oyster *Ostrea edulis* (L.) for survival when infected with the parasite *Bonamia ostreae* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1998, 224(1): 91-107.
- [9] 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.
- [10] Zheng H, Zhang G, 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.
- [11] He M, Guan 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.
- [12] Liang J, Zhang G, Zheng H. Divergent selection and realized heritability for growth in the Japanese scallop, *Patinopecten yessoensis* Jay [J]. Aquaculture Research, 2010, 41(9): 1315-1321.
- [13] 储明星(译). 数量遗传学导论[M]. 4版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 李灵玲, 董在杰, 苏胜彦, 等. 吉富罗非鱼家系选育 3 代后形态性状变异及基对体质量的影响 [J]. 水产学报, 2012, 36(4): 489-496.

- [15] 韩智科,刘萍,李健,等. 三疣梭子蟹选育家系微卫星分析[J]. 水产学报,2012,36(1):25-31.
- [16] 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.
- [17] Langdon C, Evans F, Jacobson D, *et al.* Yields of cultured Pacific oysters *Crassostrea gigas* Thunberg improved after one generation of selection [J]. Aquaculture, 2003, 220(1-4):227-244.
- [18] 王庆志,李琪,刘士凯,等. 长牡蛎幼体生长性状的遗传力及其相关性分析[J]. 中国水产科学, 2009, 16(5):736-743.
- [19] Dégremont L, Bédier E, Boudry P. Summer mortality of hatchery-produced Pacific oyster spat (*Crassostrea gigas*). II. Response to selection for survival and its influence on growth and yield [J]. Aquaculture, 2010, 299(1-4):21-29.
- [20] 王庆志,李琪,刘士凯,等. 长牡蛎成体生长性状的遗传参数估计[J]. 中国水产科学, 2012, 19(4):700-706.
- [21] Li Q, Yu H, Yu R. Genetic variability assessed by microsatellites in cultured populations of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) in China [J]. Aquaculture, 2006, 259(1-4):95-102.
- [22] Li Q, Wang Q Z, Liu S K, *et al.* Selection response and realized heritability for growth in three stocks of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* [J]. Fisheries Science, 2011, 77(4):643-648.
- [23] Wang Q Z, Li Q, Kong L F, *et al.* Response to Selection for Fast Growth in the Second Generation of Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. Journal of Ocean University of China, 2012, 11(3):413-418.
- [24] 王庆志,李琪,孔令锋. 长牡蛎3代人工选育群体的微卫星分析[J]. 水产学报, 2012, 36(10):80-87.
- [25] Boudry P, Collet B, Cornette F, *et al.* High variance in reproductive success of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*, Thunberg) revealed by microsatellite-based parentage analysis of multifactorial crosses [J]. Aquaculture, 2002, 204(3-4):283-296.
- [26] Appleyard S A, Ward R D. Genetic diversity and effective population size in mass selection lines of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. Aquaculture, 2006, 254(1-4):148-159.
- [27] Lind C E, Evans B S, Knauer J, *et al.* Decreased genetic diversity and a reduced effective population size in cultured silver-lipped pearl oysters (*Pinctada maxima*) [J]. Aquaculture, 2009, 286(1-2):12-19.
- [28] Bentsen H B, Olesen I. Designing aquaculture mass selection programs to avoid high inbreeding rates [J]. Aquaculture, 2002, 204(3-4):349-359.
- [29] Evans S, Langdon C. Effects of genotype \times environment interactions on the selection of broadly adapted Pacific oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. Aquaculture, 2006, 261(2):522-534.
- [30] Nell J A, Sheridan A K, Smith I R. Progress in a Sydney rock oyster, *Saccostrea commercialis* (Iredale and Roughley), breeding program [J]. Aquaculture, 1996, 144(4):295-302.
- [31] Nell J A, Smith I R, Sheridan A K. Third generation evaluation of Sydney rock oyster *Saccostrea commercialis* (Iredale and Roughley) breeding lines [J]. Aquaculture, 1999, 170(3-4):195-203.
- [32] Newkirk G F. Applied breeding of commercially important molluscs: a summary of discussion [J]. Aquaculture, 1983, 33(1-4):415-422.
- [33] Hershberger W K, Perdue J A, Beattie J H. Genetic selection and systematic breeding in Pacific oyster culture [J]. Aquaculture, 1984, 39(1-4):237-245.
- [34] Ibarra A M, Ramirez J L, Ruiz C A, *et al.* Realized heritabilities and genetic correlation after dual selection for total weight and shell width in catarina scallop (*Argopecten ventricosus*) [J]. Aquaculture, 1999, 175(3-4):227-241.
- [35] Toro J E, Newkirk G F. Divergent selection for growth rate in the European oyster *Ostrea edulis*: Response to selection and estimation of genetic parameters [J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 62(3):219-227.

Third generation evaluation of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) breeding lines selected for fast growth

WANG Qingzhi^{1,2}, LI Qi^{1*}, KONG Lingfeng¹, YU Ruihai¹

(1. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Liaoning Ocean and Fishery Science Research Institute, Dalian 116023, China)

Abstract: The Pacific oyster *Crassostrea gigas*, naturally occurring in Japan, China and Korea, is a major global aquaculture species. It is economically important and has had the highest worldwide production in any cultured aquatic animal species since 1993. China produced over 3.5 million tons of cultured oysters, and *C. gigas* is one of the most important species. In view of the importance of this species, conventional selections have been carried out worldwide in order to increase growth rate, and to improve survival. However, nearly all the broodstock of oyster used remains unselected in China. In order to improve the productivity traits of *C. gigas*, a selective breeding program for faster growth was initiated in 2006. From 2007, successive generation of mass selection for fast growth in shell height was conducted in three *C. gigas* stocks from China, Japan and Korea. The progeny of the third generation of the three *C. gigas* breeding lines (CS3, JS3, and KS3) were compared with the controls in a 420-day farming experiment. Mean shell height and mean total weight of the oysters from all three selection lines were significantly greater than those of controls ($P < 0.05$), respectively. At harvest on day 420, the increase in shell height for the three selection lines over the controls were 13.4%, 10.1% and 10.5%, the increase in weight were 18.5%, 13.4% and 11.6%. In the third generation of three *C. gigas* breeding lines, the realized heritability of shell height were 0.447 ± 0.226 , 0.471 ± 0.297 and 0.367 ± 0.167 . In addition, the genetic gain of total weight for the CS3, JS3, and KS3 was $16.01\% \pm 3.82\%$, $15.03\% \pm 5.21\%$ and $11.57\% \pm 5.15\%$, respectively, demonstrating that total weight had been improved markedly during selection for shell height. These results indicate that the selection for fast growth achieved encouraging progress in the third generation of *C. gigas* breeding lines.

Key words: *Crassostrea gigas*; fast growth; third-generation; selection response

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