

长牡蛎壳金性状遗传参数评估及与生长性状的关联分析

王雪磊, 李琪*, 于红, 孔令锋

(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: 采用家系选育与群体选育相结合的方法, 以壳金性状和生长性状为主要选育指标, 经过连续4代的选育获得了长牡蛎第4代壳金选育品系(F₄)。本实验以F₄代为亲本, 采用巢式设计方法和人工授精技术, 成功构建了25个长牡蛎壳金全同胞家系, 分别测定了每个家系生长到9月龄时30个个体壳金性状颜色参数和生长性状, 分析了2类性状的表型变异, 并对壳金性状的遗传参数及与生长性状的相关性进行了分析。结果显示, 壳金性状颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 的遗传力分别为 0.13 ± 0.09 、 0.69 ± 0.19 、 0.30 ± 0.13 、 0.38 ± 0.15 ; L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 之间的遗传相关和表型相关范围分别为 $-0.25 \sim 0.37$ 、 $-0.19 \sim 0.80$; 颜色参数与各生长性状的遗传相关和表型相关均较低, 分别为 $-0.04 \sim 0.26$ 、 $-0.10 \sim 0.13$ 。本研究表明长牡蛎壳金性状颜色参数的遗传力多为中高等水平, 对其颜色继续进行选择改良, 预期能达到良好的效果。此外, 壳金性状与生长性状的相关性较低, 不能利用二者之间的关系进行相互选择, 只能将壳金性状和生长性状均作为目标性状进行协同选择, 以实现同步改良2个性状的目的。

关键词: 长牡蛎; 壳色; 遗传力; 遗传相关; 生长性状

中图分类号: S 968.31

文献标志码: A

长牡蛎(*Crassostrea gigas*), 也称太平洋牡蛎, 自然分布于西北太平洋海域, 属广温、广盐种类, 具有繁殖力高、适应能力强等特点, 是世界性的重要经济贝类, 养殖产量已连续多年位居世界海产贝类首位。长牡蛎是我国北方沿海主要的养殖种类, 2014年我国牡蛎养殖产量高达435万t, 比上年增长13万t, 增长3.16%^[1]。

壳色作为贝类的表观性状, 在遗传育种方面具有较高的研究价值。国内学者通过对海产经济贝类开展家系培育或群体选育等手段相继培育出“中国红”皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)、“蓬莱红”栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、“中科红”海湾扇贝(*Argopecten irradians*)、“南澳金贝”华贵栉孔扇贝(*C. nobilis*)等优良新品种或新品系。长牡蛎外壳颜色性状的遗传研究长期受到育种学家的关注^[2-6]。虽然我国对长牡蛎壳色的研究起步晚, 但已进行了大量选育实验, 从

长牡蛎养殖群体中相继筛选出了金、白、黑、紫等壳色类型, 为壳色新品种的培育和相关基础研究提供了丰富的素材^[7]。

遗传力是反映性状遗传能力大小的重要遗传参数, 指示表型值作为遗传育种值的可靠性, 在育种值估计、选择指数确定、选择效果预测、育种方案设计等方面, 都起着十分重要的作用^[8]。随着水产动物遗传育种工作的深入, 当前已对一些具有较大经济价值动物的性状, 如生长、产量、存活率、抗病性、抗逆性等的遗传参数进行了大量评估, 为相关的育种策略制定提供了重要依据。相比而言, 关于水产动物颜色性状遗传参数的报道较少, 而贝类壳色参数的分析研究更少, 仅见部分学者对马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)^[9]和三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)^[10]等产珠贝的壳色进行了量化分析, 并对三角帆蚌内壳色颜色参数进行了遗传评估,

收稿日期: 2016-01-29 修回日期: 2016-05-04

资助项目: 国家自然科学基金(31372524); 山东省科技发展计划项目(2014GHY115002); 泰山学者种业计划专家项目

通信作者: 李琪, E-mail: qili66@ouc.edu.cn Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

http://www.scxuebao.cn

迄今未见基于国际照明委员会(CIE)关于 L^* 、 a^* 和 b^* 颜色模型对牡蛎颜色参数的报道。

本研究以壳金长牡蛎第4代选育系为亲本,采用巢式设计构建全同胞家系,获取子代壳金性状颜色参数,评估壳金性状遗传参数,并与生长性状进行关联分析,旨在为长牡蛎壳金性状选育提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

实验所用的亲本是自2010年开始,已经过4代连续选育的长牡蛎壳金性状纯化个体。2014年6月,采用Comstock等^[11]建立的巢式设计模型,将每个壳金长牡蛎雌性个体与3个壳金长牡蛎雌性个体交配,共建立30个全同胞家系,同时以普通壳色个体为亲本通过单对交配建立对照组。幼虫的培育和稚贝的养成参照常规长牡蛎育苗流程,至9月龄测量时共存活25个壳金全同胞家系和1个对照组家系,以字母G和C分别表示壳金家系和对照组家系。

1.2 性状测定

2015年3月,从每个家系内随机选取30个个体,用游标卡尺测量稚贝的壳高(SH)、壳长(SL)、壳宽(SW),精确到0.02 mm;用电子天平测量稚贝的总重(TW),精确到0.01 g。

所有子代的左壳均用海水清洗干净后,去除壳型不规则、污损严重的个体,稍微晾干,待生长性状测量结束后,进行长牡蛎左壳壳金性状颜色参数的测定。针对壳色的测量方法的选择,已有使用CSE-1成像色度分析系统^[9, 12]和Lovibond-RT200表面色度计^[10]的报道,本研究使用的为测色系统—计算机视觉系统(CVS, Computer Vision System)。在人工光源(左右两侧各设置2个20 W的白炽灯)条件下,使用佳能相机(Canon EOS 60D)采集图像,相关参数设置为手动模式,光圈值f/5.6,曝光时间1/160 s,焦距92 mm等,背景用黑色的塑胶,防止反光。然后使用图像处理软件Photoshop CS6(Adobe System Incorporated)对采集的牡蛎整个左壳图像进行预处理后,记录每个贝壳颜色参数 L 、 a 、 b 值。长牡蛎壳金家系个体如图1所示。

1.3 数据处理及分析

CIE $L^*a^*b^*$ 是一种均匀的色彩空间,即2个



图1 长牡蛎壳金家系个体

Fig. 1 The *C. gigas* with golden shell color

不同颜色的欧氏距离,与人的感官判断具有一致性,使得CIE $L^*a^*b^*$ 成为颜色评定中使用最为广泛的颜色空间之一^[13]。它由CIE于1976年提出,是CIE1931 XYZ标准色度学系统的非线性变换,它将XYZ直角坐标颜色空间转换为柱面极坐标,将三刺激值XYZ转换成与眼睛视觉相一致的明度 L^* 和与色调、饱和度的感觉相一致的 a^* 、 b^* 。其中 L^* 表示明度,完全白的物体视为100,完全黑的物体视为0; a^* 为红绿轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向红色,负值越小表示颜色越偏向绿色; b^* 为黄蓝轴色品指数,正值越大表示颜色越偏向黄色,负值越小表示颜色越偏向蓝色^[14-15]。

除此之外,在 $L^*a^*b^*$ 颜色空间中常用的颜色特征参数 ΔE 表示色差值,即测量组样品相对于对照组之间的整个颜色变化,差异越大说明色彩越丰富,越小说明颜色越单一^[16]。

对采用Photoshop CS6软件获得的长牡蛎壳金性状颜色参数 L 、 a 、 b 值,参照Hunter^[16]和Chakraborty等^[17]中的公式进行数值转换:

$$L^* = \frac{L}{255} \times 100$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_1^*)^2 + (a^* - a_1^*)^2 + (b^* - b_1^*)^2}$$

根据ASReml 3.0软件中的限制性极大似然法(REML)进行遗传参数评估的数据要求^[18],采用Excel 2007和SPSS 18.0软件对各家系的颜色参数

L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 和生长性状进行初步统计处理。根据得到的数据, 建立多性状个体动物模型, 构建的具体模型:

$$Y_{ijk} = \mu + a_{ijk} + f_{ijk} + e_{ijk}$$

式中, Y_{ijk} 为长牡蛎壳金性状颜色参数测量值, μ 表示总体均值, a_{ijk} 为加性遗传效应, f_{ijk} 为家系效应(包括共同环境效应), e_{ijk} 为随机残差。

遗传力的计算公式:

$$h^2 = \sigma_a^2 / (\sigma_a^2 + \sigma_f^2 + \sigma_e^2)$$

遗传相关(r_g)和表型相关(r_p)的计算公式:

$$r_g = cov_g(x, y) / \sigma_g(x) \cdot \sigma_g(y);$$

$$r_p = cov_p(x, y) / \sigma_p(x) \cdot \sigma_p(y);$$

式中, h^2 为遗传力, σ_a^2 为加性遗传方差, σ_f^2 为家系遗传方差, σ_e^2 为随机效应方差; x 、 y 为用于相关分析的2个性状, cov_g 、 cov_p 分别表示两性状间遗传、表型协方差组分, σ_g 、 σ_p 分别为遗传方差组分、表型方差组分的标准差。

2 结果与分析

2.1 9月龄长牡蛎壳金性状颜色参数和生长性状统计

壳金选育组家系的 L^* 值均大于对照组, 为40.03~50.40; 选育组 a^* 值为1.77~5.21, 偏向红色, 对照组为-0.32, 偏向绿色; 选育组 b^* 值位于31.95~39.01的黄色范围, 对照组为21.09, 虽然也在黄色范围内, 但值小于选育组; 选育组的色差 ΔE 为13.07~20.51, 对照组的色差为17.25, 二者之间属于大色差(表1)。

生长性状中, 壳宽和总重的变异系数均高于壳高和壳长, 前者为21.92%和31.84%, 后者为13.14%和14.06%, 表明壳高和总重性状具有较大的遗传改良潜力。颜色参数中 a^* 的变异系数最大, 而 L^* 、 b^* 的变异系数较小, 说明个体间颜色参数中 a^* 差异更为明显(表2)。

2.2 9月龄长牡蛎壳金性状遗传参数估计

L^* 的遗传力估计值较低, 为0.13±0.09; a^* 、 b^* 和 ΔE 的遗传力估计值较高, 分别为0.69±0.19、0.30±0.13和0.38±0.15。颜色参数之间的相关性存在较大差异, 既有正相关, 也有负相关, 其中, L^* 与 a^* 的遗传相关和表型相关为负相关, 与 b^* 的遗传相关为负相关, 且相关性均较低, 与 ΔE 的相关性最低, 为0.01±0.19; L^* 与

表 1 9月龄长牡蛎壳金性状颜色参数分析

Tab. 1 Analysis for the parameters of the golden shell color of 9-month-old *C. gigas*

家系 family	L^*	a^*	b^*	ΔE
G ₁	42.27±5.63	3.31±1.11	34.72±4.44	15.50±3.94
G ₂	44.48±4.84	3.11±1.87	34.44±4.11	15.45±3.84
G ₃	42.27±5.23	4.01±1.39	35.61±4.43	16.34±3.99
G ₄	41.64±4.86	2.07±1.13	31.95±3.75	13.07±5.62
G ₆	43.58±6.19	2.93±1.14	34.04±4.31	15.38±3.44
G ₇	45.03±4.74	3.01±1.52	36.36±4.97	17.26±4.52
G ₈	44.91±6.55	2.09±1.25	33.80±4.57	15.47±4.06
G ₉	45.53±4.73	2.57±1.19	34.58±3.72	15.52±4.21
G ₁₀	46.95±4.29	2.18±3.21	36.21±4.46	17.57±4.80
G ₁₁	50.40±3.59	1.99±1.87	37.13±5.58	19.83±5.04
G ₁₃	43.54±5.76	3.13±1.29	36.17±4.41	16.99±4.04
G ₁₄	45.58±3.28	2.45±1.44	35.79±4.55	16.42±4.38
G ₁₅	43.89±3.99	5.21±2.29	35.51±4.36	16.54±4.49
G ₁₆	47.65±4.11	2.63±1.33	36.27±2.95	17.64±3.78
G ₁₈	45.81±3.80	3.98±1.42	36.73±2.37	17.67±2.63
G ₁₉	43.47±8.80	4.90±1.58	36.54±5.88	18.92±5.68
G ₂₀	42.51±4.86	5.00±4.80	35.27±4.15	16.55±4.95
G ₂₁	45.61±4.63	1.77±1.39	32.18±4.06	13.46±4.18
G ₂₂	41.95±4.23	2.96±1.19	33.43±7.40	14.97±3.87
G ₂₅	42.24±4.36	3.97±1.31	35.21±4.26	15.62±4.17
G ₂₆	40.70±6.26	2.94±1.33	32.62±4.16	13.76±3.42
G ₂₇	40.03±5.10	3.53±1.29	32.72±2.56	13.32±2.43
G ₂₈	48.72±3.74	3.03±1.16	39.01±2.65	20.51±3.24
G ₂₉	46.80±3.29	2.06±1.43	34.37±5.30	15.84±4.25
G ₃₀	48.29±2.56	3.07±1.15	38.97±3.21	20.15±3.57
C	39.95±9.99	-0.32±0.81	21.09±5.86	17.25±8.30

ΔE 的表型相关最高, 为0.80±0.01, 与 ΔE 的遗传相关最高, 为0.37±0.69(表3)。

2.3 9月龄长牡蛎壳金性状与生长性状的遗传相关和表型相关估计

颜色参数中 a^* 与生长性状的遗传相关和表型相关均为正相关, L^* 、 b^* 、 ΔE 与壳长和壳宽性状存在负相关, 且负相关的相关性均较低, b^* 、 ΔE 与壳高、总重性状的遗传相关和表型相

表2 9月龄长牡蛎壳金性状和生长性状的描述性统计结果

Tab. 2 Descriptive statistics for the golden shell color parameters (L^* , a^* , b^* and ΔE) and the growth traits of 9-month-old *C. gigas*

性状 trait	平均值 mean	标准差 SD	变异系数/% CV
壳高/mm SH	55.80	7.34	13.14
壳长/mm SL	36.22	5.09	14.06
壳宽/mm SW	18.69	4.10	21.92
总重/g TW	19.64	6.25	31.84
L^*	44.55	5.50	12.34
a^*	3.12	1.99	63.89
b^*	35.18	4.69	13.34
ΔE	16.39	4.56	27.82

表3 9月龄长牡蛎壳金性状颜色参数的遗传力(对角线)、遗传相关(上三角)和表型相关(下三角)

Tab. 3 The heritabilities (in bold at the diagonal), genetic correlation (above the diagonal) and phenotypic correlation (below the diagonal) of the golden shell color parameters of 9-month-old *C. gigas*

参数 parameter	L^*	a^*	b^*	ΔE
L^*	0.13±0.09	-0.25±0.16	-0.02±0.20	0.01±0.19
a^*	-0.19±0.06	0.69±0.19	0.33±0.09	0.31±0.09
b^*	0.43±0.05	0.45±0.06	0.30±0.13	0.37±0.69
ΔE	0.51±0.05	0.43±0.06	0.80±0.01	0.38±0.15

表4 9月龄长牡蛎壳金性状颜色参数与生长性状之间的遗传相关(r_g)和表型相关(r_p)

Tab. 4 Genetic and phenotypic correlation between the golden shell color parameters and growth traits of 9-month-old *C. gigas*

性状 trait	L^*		a^*		b^*		ΔE	
	r_g	r_p	r_g	r_p	r_g	r_p	r_g	r_p
壳高 SH	0.10±0.13	0.05±0.06	0.03±0.10	0.06±0.09	0.14±0.13	0.12±0.07	0.17±0.13	0.13±0.07
壳长 SL	-0.03±0.25	0.01±0.05	0.15±0.18	0.08±0.06	0.04±0.20	0.09±0.05	0.09±0.18	0.11±0.05
壳宽 SW	-0.04±0.18	-0.10±0.05	0.26±0.15	0.07±0.07	0.07±0.18	-0.05±0.05	0.12±0.16	-0.03±0.06
总重 TW	0.09±0.15	0.01±0.06	0.09±0.11	0.09±0.08	0.14±0.14	0.08±0.07	0.20±0.13	0.12±0.07

常规的颜色定量方法带来了困难。目前已有学者基于个体间颜色的差异,进行了壳表面颜色层级的划分^[2, 4, 6]。一方面,肉眼感观所得到的结果很大程度上不可控,而且视觉的条件也是可变的,受到包括观察者、光源和观察角度等

因素的影响,和事物本身的差异不一致;另一方面,不规则的形状和形态,表面的纹理和自身的光泽都造成了常规仪器法同样存在局限性和不可靠性。而CVS测色系统以非接触式、不受环境和人为因素等条件影响以及可测量撮取范

3 讨论

3.1 长牡蛎颜色量化分析

正确的颜色测量方法是颜色分析的前提。常见的测量主要有定性和定量两种方法。传统的定量测定主要是借助于肉眼的识别进行等级标准的制定,根据相互之间的比较归为不同的等级,主观性较强,评判的标准和方法在人与人之间存在很大的差异。利用色度计和测色仪等常规仪器进行颜色描述,由模糊的主观指标变成具体的数字化指标,有助于科学直观地评价个体间的颜色差异。国内外学者利用测色仪器进行颜色量化的研究较多^[19-21]。

由于长牡蛎贝壳的形状和结构在个体之间变异极大,如表面螺旋状、扇状、板状等凹凸不定的纹理,而且常见色泽分布一致的个体较少,大多掺杂有其他的颜色且分布不均,都给

围的整个影像等特点在多个行业中具有广泛的应用^[22-23]。

3.2 长牡蛎壳金性状和生长性状表型参数变化

海洋水产生物的许多目标性状都存在着广泛的表型变异, 变异是选择的基础, 高表型变异在一定程度上说明了生物具有较好的选育潜力^[24]。王庆志等^[25]估测了不同年份360日龄长牡蛎生长性状变异系数为18.0%~53.6%。本研究通过对长牡蛎生长性状和壳金性状颜色参数的变异系数分析, 发现长牡蛎4个生长性状的变异系数为13.14%~31.84%, 与以上分析结果相似, 表明各性状间变异系数差异较大, 对那些变异系数大的生长性状进行遗传改良具有较大潜力。长牡蛎壳金性状颜色参数间变异系数的差异也均较大, 为12.34%~63.89%, 可以看出, 壳色性状遗传变异资源丰富, 具有较大的选育空间。其中, 颜色参数 b^* 值代表黄蓝色, 壳金长牡蛎和对照组颜色的差异主要产生于 b^* 值, 值越大, 代表颜色越偏向金黄色。本研究发现 b^* 值变异系数相对较小, 这个结果表明长牡蛎壳金性状经过连续多代选育, 已经得到了比较稳定的遗传, 在对其继续进行遗传改良时, 需多侧重对高 b^* 值群体的选择。

3.3 长牡蛎壳金性状遗传力估计

遗传参数是生物的重要遗传特性, 也是开展选育工作的重要依据。目前, 关于长牡蛎生长等性状的遗传参数报道中, 均发现其具备较高的遗传力, 具有较好的选育效果^[26-28]。外观颜色对消费者选择海产品具有很大的影响, 美观漂亮的颜色带来的不仅是一种视觉享受, 更会提升商品的价值^[29-30]。当长牡蛎以活体或半壳状态销售时, 消费者常对长牡蛎贝壳色泽的鲜艳程度有不同的选择偏好。进行长牡蛎壳色品系的培育, 不但可满足消费者的需求, 还可增加产品的种类, 而开展长牡蛎壳色性状的遗传研究, 可以为壳色的选育提供依据。

关于长牡蛎的壳色性状的遗传分析已有一些报道^[31-33], 本研究首次基于CIE1976 $L^*a^*b^*$ 颜色模型对长牡蛎壳金性状颜色参数进行遗传评估, 颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 的遗传力分别为0.13、0.69、0.30、0.38。通常, 育种工作者将

为中等遗传力, $h^2 > 0.30$ 划分为高遗传力。可见, 除了 L^* 为低遗传力外, 其他颜色参数均为中高等遗传力, 这与Evans等^[5]和Kang等^[6]估测的长牡蛎壳色性状遗传力一致, 表明长牡蛎壳色性状有着较高的遗传潜力, 通过连续选育能够获得良好的改良效果。在其他贝类的壳色遗传力估计中, 仅见王照旗等^[10]对提供外套膜小片的三角帆蚌贝壳的内壳颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE^* 进行了遗传分析, 遗传力分别为0.31、0.11、0.36、0.29, 也说明了贝类颜色具备较高的遗传潜力。

3.4 长牡蛎壳金性状与生长性状关联分析

在选择育种工作中, 有些性状容易度量, 而有些性状不易度量, 可以利用容易度量性状与较难度量性状间的相关性对后者进行间接选择, 提高选种的效率^[34]。性状间的表型相关由遗传相关和环境相关组成, 其中, 遗传相关是生物体在长期的系统发育过程中由基因连锁和基因的多效性引起的, 对性状间的相关性起着重要的作用。性状间的遗传相关越大, 相互选择的效果就越好^[8]。在一些水产动物中, 已有研究者做了生物颜色性状的关联分析, 例如Gu等^[12]分析了马氏珠母贝供体珠和受体珠颜色对产生的游离珍珠颜色的关系, 发现供体珠颜色与游离珠颜色的关联显著, 而受体珠颜色与游离珠颜色无相关性。

本研究进行了9月龄长牡蛎壳金性状颜色参数及与生长性状的关联分析, 结果显示颜色参数之间的遗传相关范围为-0.25~0.37, 表型相关范围为-0.19~0.80。颜色参数与各生长性状之间的遗传相关范围为-0.04~0.26, 表型相关范围为-0.10~0.13, 遗传相关和表型相关均存在负相关, 且颜色参数与各生长性状之间的遗传相关系数很小, 无法借助于生长性状对壳金性状进行间接选育, 这与三角帆蚌内壳色与生长性状相关性分析的结果一致^[10]。该结果也进一步说明同种类型的性状之间具有较大的相关性, 不同类型的性状之间相关性较低。

4 结论

本研究分析比较了长牡蛎在9月龄时壳金性状的表型变异、遗传力及与生长性状的相关

性。其中,长牡蛎壳金性状颜色参数的遗传力多为中高等水平,对其继续进行群体选择,预期能达到较好的改良效果;而壳金性状与生长性状的相关性较低,无法利用二者之间的关系进行相互选择,只能把壳金性状和生长性状共同作为目标性状进行协同选择,以实现同步改良2个性状的目的。本研究为壳金长牡蛎的良种选育提供了重要的参考资料。

参考文献:

- [1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴2015[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Fisheries and Fishery Administration, the Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Yearbook 2015[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015 (in Chinese).
- [2] Imai T, Sakai S. Study of breeding of Japanese oyster, *Crassostrea gigas*[J]. Tohoku Journal of Agricultural Research, 1961, 12(2): 125-171.
- [3] Nell J A. The history of oyster farming in Australia[J]. Marine Fisheries Review, 2001, 63(3): 14-25.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Kang J H, Kang H S, Lee J M, *et al.* Characterizations of shell and mantle edge pigmentation of a Pacific oyster, *Crassostrea gigas*, in Korean Peninsula[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2013, 26(12): 1659-1664.
- [7] 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[J]. 中国水产科学, 2014, 21(3): 494-502.
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 (in Chinese).
- [8] Falconer D S, Mackay T F C. 数量遗传学导论[M]. 4版. 储明星, 译. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Falconer D S, Mackay T F C. Introduction to Quantitative Genetics[M]. 4th ed. Chu M X, trans. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese).
- [9] 顾志峰, 王嫣, 石耀华, 等. 马氏珠母贝两个不同地理种群的形态性状和贝壳珍珠质颜色比较分析[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(1): 79-86.
Gu Z F, Wang Y, Shi Y H, *et al.* Comparison of morphometrics and shell nacre colour between two geographical populations of pearl oyster, *Pinctada martensii* (Dunker)[J]. Progress in Fishery Science, 2009, 30(1): 79-86 (in Chinese).
- [10] 王照旗, 韩学凯, 白志毅, 等. 三角帆蚌紫色选育系1龄阶段内壳色及生长性状的遗传参数估计[J]. 水产学报, 2014, 38(5): 644-650.
Wang Z Q, Han X K, Bai Z Y, *et al.* Estimates of genetic parameters for inner shell color and growth traits during one year old stage in the purple strain of *Hyriopsis cumingii* using microsatellite based parentage assignment[J]. Journal of Fisheries of China, 2014, 38(5): 644-650 (in Chinese).
- [11] Comstock R E, Robinson H F. Estimation of average dominance of genes[M]//Gowen J W. Heterosis. Ames: Iowa State College Press, 1952: 494-519.
- [12] Gu Z F, Huang F S, Wang H, *et al.* Contribution of donor and host oysters to the cultured pearl colour in *Pinctada martensii*[J]. Aquaculture Research, 2014, 45(7): 1126-1132.
- [13] León K, Mery D, Pedreschi F, *et al.* Color measurement in $L^* a^* b^*$ units from RGB digital images[J]. Food Research International, 2006, 39(10): 1084-1091.
- [14] Papadakis S E, Abdul-Malek S, Kamdem R E, *et al.* A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods[J]. Food Technology, 2000, 54(12): 48-51.
- [15] Segnini S, Dejmeck P, Öste R. A low cost video technique for colour measurement of potato chips[J]. LWT—Food Science and Technology, 1999, 32(4): 216-222.
- [16] Hunter R S. Scales for the measurement of color difference[M]//Hunter R S, Harold R W. The Measurement of Appearance. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1975: 133-140.
- [17] Chakraborty S K, Singh D S, Kumbhar B K. Influence of extrusion conditions on the colour of millet-legume extrudates using digital imagery[J]. Irish Journal of Agricultural and Food Research, 2014, 53(1): 65-74.
- [18] Gilmour A R, Gogel B J, Cullis B R, *et al.* ASReml User

- Guide Release 3.0[M]. Hemel Hempstead: VSN International, 2009.
- [19] 常亚青, 张伟杰, 丁君, 等. 虾夷马粪海胆不同家系和性别间性腺性状的比较[J]. 水产学报, 2010, 34(7): 1080-1088.
- Chang Y Q, Zhang W J, Ding J, *et al.* Comparison of gonad traits among families and between genders of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(7): 1080-1088 (in Chinese).
- [20] Yi X W, Xu W, Zhou H H, *et al.* Effects of dietary astaxanthin and xanthophylls on the growth and skin pigmentation of large yellow croaker *Larimichthys croceus*[J]. Aquaculture, 2014, 433: 377-383.
- [21] Doolan B J, Allan G L, Booth M A, *et al.* Effects of cage netting colour and density on the skin pigmentation and stress response of Australian snapper *Pagrus auratus* (Bloch & Schneider, 1801)[J]. Aquaculture Research, 2008, 39(13): 1360-1368.
- [22] Yam K L, Papadakis S E. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(1): 137-142.
- [23] Alçiçek Z, Balaban M Ö. Characterization of green shelled mussel meat. Part I: quantification of color changes during brining and liquid smoke application using image analysis[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2015, 24(1): 2-14.
- [24] 常亚青, 田隼, 张伟杰. 我国海洋水产生物遗传育种技术进展[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(6): 8-15.
- Chang Y Q, Tian Y, Zhang W J. Progress of mariculture biological genetic breeding technology in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2013, 15(6): 8-15 (in Chinese).
- [25] 王庆志, 李琪, 刘世凯, 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.
- Wang Q Z, Li Q, Liu S K, *et al.* Estimates of genetic parameters for growth-related traits in adult *Crassostrea gigas*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(4): 700-706(in Chinese).
- [26] Lannan J E. Estimating heritability and predicting response to selection for the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*[J]. Proceedings of the National Shellfisheries Association, 1972, 62: 62-66.
- [27] Dégremont L, Ernande B, Bédier E, *et al.* Summer mortality of hatchery-produced Pacific oyster spat (*Crassostrea gigas*). I. estimation of genetic parameters for survival and growth[J]. Aquaculture, 2007, 262(1): 41-53.
- [28] 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.
- Wang Q Z, Li Q, Liu S K, *et al.* Estimates of heritabilities and genetic correlations for growth in *Crassostrea gigas* larvae[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(5): 736-743 (in Chinese).
- [29] 张跃环, 闫喜武, 张澎, 等. 贝类壳色多态的研究概况及展望[J]. 水产科学, 2008, 27(12): 680-683.
- Zhang Y H, Yan X W, Zhang P, *et al.* Research advances and prospects on shell color polymorphism of mollusks[J]. Fisheries Science, 2008, 27(12): 680-683 (in Chinese).
- [30] Clydesdale F M. Color as a factor in food choice[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 1993, 33(1): 83-101.
- [31] Ge J L, Li Q, Yu H, *et al.* Identification and mapping of a SCAR marker linked to a locus involved in shell pigmentation of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Aquaculture, 2014, 434(23): 249-253.
- [32] Ge J L, Li Q, Yu H, *et al.* Mendelian inheritance of golden shell color in the Pacific oyster *Crassostrea gigas*[J]. Aquaculture, 2015, 441: 21-24.
- [33] Ge J L, Li Q, Yu H, *et al.* Identification of single-locus PCR-based markers linked to shell background color in the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Marine Biotechnology, 2015, 17(5): 655-662.
- [34] 盛志廉, 陈瑶生. 数量遗传学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- Sheng Z L, Chen Y S. Quantitative Genetics[M]. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese).

Estimates of genetic parameters for golden shell color and correlation with growth traits in the golden shell strain of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)

WANG Xuelei, LI Qi*, YU Hong, KONG Lingfeng

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

Abstract: The Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) accounts for the largest production of all bivalve species in the world, and shows a wide range of between- and within-individual variation of shell colour trait. However, little is known about the genetic parameters of its shell color trait. Four generations of family selection and mass selection were carried out to develop the excellent strains of *C. gigas* with golden shell colour and rapid growth traits. A total of 25 full-sib families from 10 male and 30 female parents were established successfully by using the method of nested design in 2014. These parental breeders were collected from the fourth-generation selective strain of *C. gigas* produced in 2013. At the age of 9 months, we measured and compared the phenotypic growth traits and the shell colour parameters based on the CIE 1976 Lab colorimetric system among progeny. The genetic parameters of shell color pigmentation and correlation with growth traits were estimated using ASReml 3.0. The results showed that the average values of the colour parameters of the L^* (lightness), a^* (redness), and b^* (yellowness) were greater than those of the control group except ΔE (colour difference), especially b^* which represented the difference between the golden breeding strain and the common population, evidencing the expected selection effect of the golden shell color trait. Coefficients of variation of the progeny were 13.14%~31.84% for growth traits, and 12.34%~63.89% for color parameters, suggesting that there was great genetic variation. Heritabilities of L^* , a^* , b^* and ΔE were 0.13 ± 0.09 , 0.69 ± 0.19 , 0.30 ± 0.13 , 0.38 ± 0.15 , respectively. The phenotypic correlations and genetic correlations of L^* , a^* , b^* and ΔE had significant differences, with the ranges of $-0.19\sim 0.80$ and $-0.25\sim 0.37$ respectively. The phenotypic correlations and genetic correlations between the growth traits and color parameters were very low, ranging from -0.10 to 0.13 and -0.04 to 0.26 respectively. The results demonstrated that the heritability of the golden-colour shell trait of *C. gigas* was significantly moderate and high except L^* , suggesting the potential for the selection of the golden shell color trait was high. However, indirect selection of the shell color trait using growth traits is infeasible due to their low correlations. Furthermore, only the color traits and growth traits were selected as the targets of selective breeding at the same time, and the traits could be improved. The present study provides important information for future selective breeding programmes for *C. gigas* with golden shell color trait.

Key words: *Crassostrea gigas*; shell color; heritability; genetic correlation; growth traits

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

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (31372524); Shandong Province (2014GHY115002); Taishan Scholars Seed Plan Experts Project of Shandong