

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2018.17446

合浦珠母贝不同壳色选育系 F6 数量性状的相关性和通径分析

王祎哲^{1,2}, 邓正华¹, 王雨¹, 李有宁¹, 于刚¹, 黄桂菊¹, 陈明强¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东 广州 510300;

2. 天津农学院 水产学院, 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津 300384

摘要: 为深入了解不同壳色合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)形态性状与体重间的关系, 为亲贝的选择提供策略, 本研究使用合浦珠母贝传统壳色、金壳色、白壳色、红壳色和黑壳色 5 种壳色选育系 F6 各 1000 个个体的性状数据进行通径分析和聚类分析。测量的性状包括壳长(SL, mm)、壳高(SH, mm)、壳宽(SW, mm)、绞合线长(HL, mm)和体重(BW, g)。结果显示, 5 种壳色合浦珠母贝所有形态性状与体重间的相关系数均达到极显著($P < 0.01$)。通径分析表明, 壳长对传统壳色和白壳色贝体重的直接影响最大, 壳高对金壳色和红壳色贝体重的直接影响最大, 壳宽对黑壳色贝体重的直接影响最大。利用多元回归方法构建不同壳色合浦珠母贝形态性状与体重(BW, g)间的回归方程, 其中传统壳色: $BW = -24.999 + 0.467SL + 0.387SH - 0.259SW + 0.244HL$; 金壳色: $BW = -38.661 + 0.305SL + 0.477SH + 0.242SW + 0.375HL$; 白壳色: $BW = -4.130 + 0.332SL + 0.300SH - 0.307SW + 0.088HL$; 红壳色: $BW = -27.307 + 0.327SL + 0.321SH + 0.252SW + 0.305HL$; 黑壳色: $BW = -40.921 + 0.278SL + 0.335SH + 1.076SW + 0.269HL$ 。聚类分析显示, 传统壳色与金壳色形态特征相近, 而白壳色、红壳色和黑壳色形态特征相近。

关键词: 合浦珠母贝; 壳色; 形态性状; 相关分析; 通径分析

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2018)05-0988-10

生物的表型性状是遗传育种与苗种繁育的重要指标, 常被作为良种选育及种质复壮的主要性状^[1]。在水产养殖生产过程中, 质量性状是直接影响养殖业经济效益的关键因素^[2], 而形态性状与质量性状间存在一定的关系^[3], 因此, 发挥形态性状直观可辨的优势, 研究其对质量性状的影响和决定程度, 并以形态性状为选育参数, 筛选出具有优良生产性能的群体, 对指导人工选育生产实践具有重要意义^[4]。已有研究表明, 针对不同种类生物, 影响其质量性状的形态性状有所不同, 如在栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)^[1]、黄边糙鸟蛤(*Trachycardium flavum*)^[5]、日本镜蛤(*Dosinia ja-*

ponica)^[6]和背瘤丽蚌(*Lamprotula leai*)^[7]等贝壳中均有所体现。通径分析早在 20 世纪 20 年代就由数量遗传学家 Wright 提出, 通过确定参数间的相关性, 利用参数间的相关系数拆分为直接影响和间接影响, 从而通过通径分析建立最优回归方程。利用形态性状与质量性状间的通径分析已应用于许多海洋生物育种工作中^[8-10]。针对香港巨牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)^[11]的研究发现, 影响雌雄个体体重的形态性状不同; 对日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)^[4]的研究发现, 不同地理群体中影响其体重的主要形态性状有所不同; 对圆斑星鲷(*Verasper variegatus*)^[12]的研究发现,

收稿日期: 2017-12-24; 修订日期: 2018-02-23.

基金项目: 广东省海洋渔业科技与产业发展专项珍珠产业发展项目(Z2014003); 广东省渔港建设和渔业发展专项海洋渔业科技推广方向珍珠类项目(B201601-Z02); 海南省重点研发计划项目(ZDYF2016086, ZDYF2017037).

作者简介: 王祎哲(1995-), 女, 硕士研究生, 从事海洋生物技术及遗传育种研究. E-mail: wangyizhe95@163.com

邓正华(1989-), 并列第一作者, 男, 研究实习员, 硕士, 从事海洋贝类遗传育种与苗种繁育研究.

E-mail: dengzhenghua89@163.com

通信作者: 陈明强, 助理研究员, 从事珍珠贝遗传育种与养殖研究. E-mail: chenmingqiang68@163.com

影响其体重的形态指标在不同生长阶段存在差异; 对文蛤(*Meretrix metretrix*)^[13]的研究发现, 不同壳色间影响其活体重的形态性状有所不同。

合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)又称“马氏珠母贝(*Pinctada martensii*)”, 广泛分布于热带和亚热带区域, 是培育海水珍珠的重要贝类^[14-15], 且珍珠养殖曾一度成为广东、广西和海南等部分沿海地区支柱性产业之一^[16-17]。但近些年来, 由于长期不当的人工近亲繁殖, 导致养殖性状退化, 加上养殖海区老化及污染, 使合浦珠母贝养殖过程中出现生长缓慢、死亡率高和培育珍珠优珠率低等现象^[17], 严重制约着海水珍珠养殖业的发展, 使产业面临逐渐萎缩。选育出具有优良生产性能的新品种合浦珠母贝是振兴合浦珠母贝珍珠养殖产业的一种有效途径, 在此条件下, 新品种‘海优 1 号’、‘南科 1 号’和‘南珍 1 号’以及其他新品系便应运而生。Wada 等^[18-21]针对合浦珠母贝壳色这一性状进行了长期的选育, 并研究了壳色对生长和存活效应的影响, 但不同壳色间的合浦珠母贝形态性状对质量性状的影响还未见报道。研究体重与其他形态性状之间的关系, 筛选出决定体重性状的关键指标, 对指导合浦珠母贝人工选育有着重大的意义。本实验以合浦珠母贝不同壳色选育系 F6 为研究对象, 将不同壳色合浦珠母贝形态性状和体重进行多元回归分析; 通过相关分析和

通径分析, 获得影响体重的主要形态性状, 从而建立最优回归方程; 分析其对体重的直接作用和间接作用, 及其单独或共同对体重的决定系数, 以期人工选育目标性状提供最佳测量指标。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用合浦珠母贝包括传统壳色和选育的 4 种壳色(图 1a), 经多代选育壳色已达到稳定遗传, 在自然海区培育的 18 月龄的合浦珠母贝选育系 F6 各 1000 只。

1.2 测量方法

对选择的 5 种壳色合浦珠母贝, 清除其表面附着物, 刷洗干净, 吸收其壳表面水分, 使用精确度为 0.01 mm 的数显卡尺测量其 4 个形态性状, 包括壳长(SL, mm)、壳高(SH, mm)、壳宽(SW, mm)和绞合线长(HL, mm), 使用精确度为 0.01 g 的电子称测量其体重(BW, g), 测量的各形态性状示意图如图 1b。

1.3 数据分析

利用 SPSS 21.0 对各性状间进行简单相关分析以及计算形态性状对体重的通径分析和决定系数。分析 5 种壳色合浦珠母贝形态性状对其体重的直接作用和间接作用, 经逐步剔除偏回归系数不显著的性状, 建立各形态性状与体重间的最优

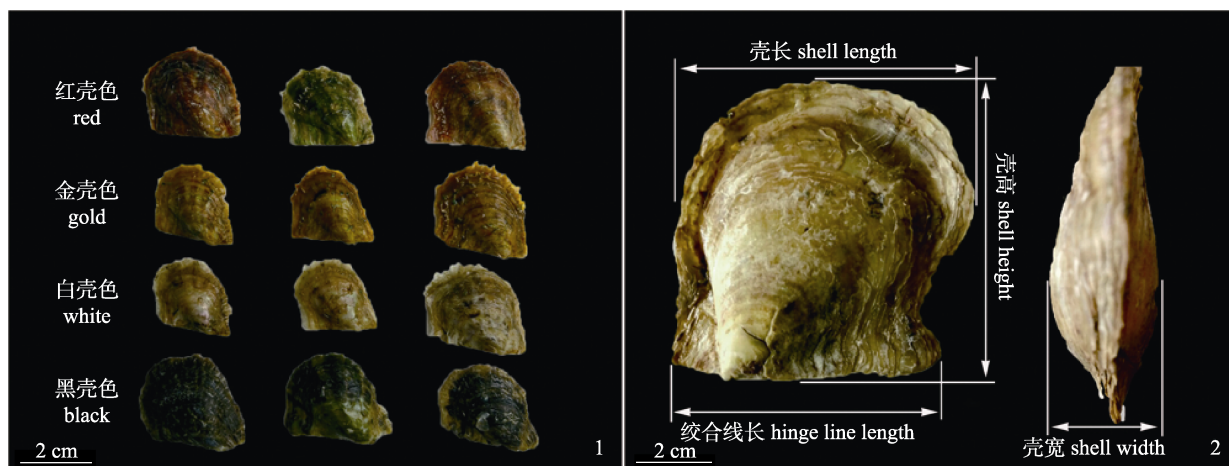


图 1 不同壳色合浦珠母贝及各形态性状图解

1. 选育的 4 种壳色合浦珠母贝; 2. 合浦珠母贝形态性状图解.

Fig. 1 Different shell colours and morphological characteristics of *Pinctada fucata*

1. Selected *Pinctada fucata* of four kinds of shell colors; 2. Morphological characteristics of *Pinctada fucata*.

回归方程。用 Origin 9.1 对不同壳色合浦珠母贝的形态性状经欧式最短距离进行聚类分析及作图。分析中使用的公式如下:

决定系数(d_i): $d_i=p_i^2$, p_i 为某单一性状对体重的通径系数; 多参数共同决定系数(d_{ij}): $d_{ij}=2r_{ij} p_i p_j$, r_{ij} 为性状间的相关系数, p_i 、 p_j 分别为单一参数对体重的通径系数; 体重(y)与各形态性状间的线性回归方程: $y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_ix_i$, b_0 为常数, b_1 、

b_2 、……、 b_i 为对应的偏回归系数。

2 结果与分析

由表 1 数据可知, 同一性状不同壳色间存在差异, 其中, 传统壳色组的壳长、壳高和体重最大, 金壳色组的壳宽和绞合线长达到最大。5 种壳色合浦珠母贝中, 体重的变异系数最大, 说明体重仍有很大的提高潜力。

表 1 不同壳色合浦珠母贝表型性状统计
Tab. 1 The phenotypic parameter statistics for *Pinctada fucata* of different shell colors

壳色 color	参数 parameter	壳长/mm SL	壳高/mm SH	壳宽/mm SW	绞合线长/mm HL	体重/g BW
传统壳色 traditional shell	平均值 mean	59.976	63.942	20.771	50.609	34.755
	标准差 SD	5.362	5.484	2.519	4.589	6.166
	变异系数/%CV	8.940	8.577	12.127	9.068	17.741
金壳色 gold shell	平均值 mean	59.187	63.935	21.680	51.078	34.291
	标准差 SD	5.456	5.116	2.929	4.275	5.960
	变异系数/%CV	9.218	8.002	13.510	8.370	17.381
白壳色 white shell	平均值 mean	56.278	61.161	21.434	49.570	30.670
	标准差 SD	4.875	5.186	3.395	4.869	4.330
	变异系数/%CV	8.662	8.479	15.840	9.823	14.118
红壳色 red shell	平均值 mean	55.088	60.538	21.242	48.839	30.355
	标准差 SD	4.231	4.460	2.847	3.799	4.470
	变异系数/%CV	7.680	7.367	13.402	7.780	14.726
黑壳色 black shell	平均值 mean	55.871	60.180	20.676	48.463	30.056
	标准差 SD	3.995	4.125	1.406	3.467	4.376
	变异系数/%CV	7.150	6.854	6.800	7.154	14.559

本研究对 5 种壳色合浦珠母贝各形态性状间进行简单相关分析(表 2), 各形态性状与体重间均呈极显著相关($P<0.01$), 说明所选取的形态性状对体重之间的相关分析是极其有意义的。从相关程度看, 各壳色形态性状与体重之间均为显著正相关, 但各壳色与体重间相关系数最大的形态性状却不尽相同, 其中传统壳色组、白壳色组和红壳色组与体重相关系数最大的为壳长, 分别为 0.727、0.536 和 0.577, 各性状与体重之间相关系数由大到小依次为壳长、壳高、绞合线长、壳宽, 表明壳长对体重的决定效应最大, 壳宽最小。金壳色组和黑壳色组与体重之间相关系数最大的性状是壳高, 分别为 0.711 和 0.636, 其次是壳长, 可见壳高对该两种壳色的合浦珠母贝体重的决定效应最大。

根据通径分析原理, 借助 SPSS 21.0 软件采用逐步回归的方法分别获得 5 种壳色合浦珠母贝各形态性状对体重的直接通径系数(直接作用)和间接相关系数(间接作用)(表 3)。其中对传统壳色直接作用最大的是壳长(0.406), 其次是壳高(0.334); 壳高通过壳长最大程度地间接影响体重(0.3106), 其次是绞合线长通过壳长间接影响体重(0.2582)。对金壳色组直接作用最大的是壳高(0.409), 其次是壳长(0.279); 壳长通过壳高最大程度间接影响体重(0.2438), 其次是壳高通过壳长间接影响体重(0.1662)。对白壳色直接作用最大的是壳长(0.373), 其次是壳高(0.359); 壳高通过壳长最大程度间接影响体重(0.2428), 其次是壳长通过壳高间接影响体重(0.2337)。对红壳色组直接作用最大的是壳高(0.320), 其次是壳长(0.309); 壳长通过

表 2 不同壳色合浦珠母贝表型性状相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between the phenotypic traits for *Pinctada fucata* of different shell colors

壳色 color	性状 trait	壳高/mm SH	壳宽/mm SW	绞合线长/mm HL	体重/g BW
传统壳色 traditional shell	壳长 SL	0.765**	0.551**	0.636**	0.727**
	壳高 SH		0.615**	0.554**	0.691**
	壳宽 SW			0.591**	0.437**
	绞合线长 HL				0.569**
金壳色 gold shell	壳长 SL	0.596**	0.281**	0.532**	0.700**
	壳高 SH		0.240**	0.397**	0.711**
	壳宽 SW			0.208**	0.352**
	绞合线长 HL				0.605**
白壳色 white shell	壳长 SL	0.651**	0.523**	0.559**	0.536**
	壳高 SH		0.586**	0.451**	0.506**
	壳宽 SW			0.596**	0.224**
	绞合线长 HL				0.326**
红壳色 red shell	壳长 SL	0.431**	0.135**	0.420**	0.577**
	壳高 SH		0.166**	0.200**	0.532**
	壳宽 SW			0.171**	0.300**
	绞合线长 HL				0.480**
黑壳色 black shell	壳长 SL	0.564**	0.297**	0.404**	0.621**
	壳高 SH		0.330**	0.296**	0.636**
	壳宽 SW			0.361**	0.602**
	绞合线长 HL				0.534**

注: **表示相关性极显著($P<0.01$); *表示相关性显著($P<0.05$).

Notes: ** denotes the correlation was extremely significant ($P<0.01$); * denotes the correlation was significant ($P<0.05$).

表 3 合浦珠母贝形态性状对体重影响的通径分析

Tab. 3 The path coefficients of the morphometric traits to the body weight of *Pinctada fucata*

壳色 color	性状 trait	相关系数 r_{ij} relative coefficient	直接作用 P_i direct effect	间接作用 $r_{ij}P_j$ indirect effect				
				Σ	壳长 SL	壳高 SH	壳宽 SW	绞合线长 HL
传统壳色 traditional shell	壳长 SL	0.727**	0.406**	0.313		0.2555	-0.0584	0.1158
	壳高 SH	0.691**	0.334**	0.346	0.3106		-0.0652	0.1008
	壳宽 SW	0.437**	-0.106**	0.537	0.2237	0.2054		0.1076
	绞合线长 HL	0.569**	0.182**	0.381	0.2582	0.1850	-0.0626	
金壳色 gold shell	壳长 SL	0.700**	0.279**	0.420		0.2438	0.0334	0.1431
	壳高 SH	0.711**	0.409**	0.302	0.1663		0.0286	0.1068
	壳宽 SW	0.352**	0.119**	0.233	0.0784	0.0982		0.0560
	绞合线长 HL	0.605**	0.269**	0.336	0.1484	0.1624	0.0248	
白壳色 white shell	壳长 SL	0.536**	0.373**	0.164		0.2337	-0.1255	0.0553
	壳高 SH	0.506**	0.359**	0.147	0.2428		-0.1406	0.0446
	壳宽 SW	0.224**	-0.240**	0.464	0.1951	0.2104		0.0590
	绞合线长 HL	0.326**	0.099**	0.227	0.2085	0.1619	-0.1430	
红壳色 red shell	壳长 SL	0.577**	0.309**	0.268		0.1379	0.0216	0.1088
	壳高 SH	0.532**	0.320**	0.212	0.1332		0.0266	0.0518
	壳宽 SW	0.300**	0.160**	0.139	0.0417	0.0531		0.0443
	绞合线长 HL	0.480**	0.259**	0.221	0.1298	0.0640	0.0274	
黑壳色 black shell	壳长 SL	0.621**	0.254**	0.367		0.1782	0.1028	0.0861
	壳高 SH	0.636**	0.316**	0.320	0.1433		0.1142	0.0630
	壳宽 SW	0.602**	0.346**	0.257	0.0754	0.1043		0.0769
	绞合线长 HL	0.534**	0.213**	0.321	0.1026	0.0935	0.1249	

注: **表示相关性极显著($P<0.01$); *表示相关性显著($P<0.05$).

Notes: ** denotes the correlation was extremely significant ($P<0.01$); * denotes significant correlation ($P<0.05$).

壳高最大程度间接影响体重(0.1379), 其次是壳高通过壳长的间接影响体重(0.1332)。对黑壳色组直接作用最大的是壳宽(0.346), 其次是壳高(0.316); 壳长通过壳高最大程度间接影响体重(0.1782), 其次是壳高通过壳长间接影响体重(0.1433)。

5 种壳色合浦珠母贝直接作用显著的性状单独或两两共同对体重的决定系数见表 4, 对角线上列出的是每个形态性状对体重的单独决定系数, 对角线上方列出的是两两形态性状共同对体重的决定系数。不同壳色中对体重的决定系数最大的

单独性状不尽相同, 传统壳色和白壳色最大的是壳长, 分别是 0.165、0.139; 金壳色和红壳色最大的是壳高, 分别是 0.167、0.102; 黑壳色最大的是壳宽, 为 0.120。在共同决定程度中, 就间接决定系数而言, 数据都显示出决定系数最大的是壳长与壳高对体重的间接决定, 因此, 以体重为目标挑选合浦珠母贝时, 从形态性状上金壳色和红壳色应首先要选择壳高, 同时加强对壳长的协同选择; 白壳色首先选择壳长, 同时加强对壳高的协同选择; 黑壳色首选壳宽。

表 4 合浦珠母贝各形态性状对体重的决定系数
Tab. 4 The determinant coefficients of morphometric traits to the body weight of *Pinctada fucata*

壳色 color	性状 trait	壳长 SL	壳高 SH	壳宽 SW	绞合线长 HL
传统壳色 traditional shell	壳长 SL	0.165	0.207	-0.047	0.094
	壳高 SH		0.112	-0.044	0.067
	壳宽 SW			0.011	-0.023
	绞合线长 HL				0.033
金壳色 gold shell	壳长 SL	0.078	0.136	0.019	0.080
	壳高 SH		0.167	0.023	0.087
	壳宽 SW			0.014	0.013
	绞合线长 HL				0.072
白壳色 white shell	壳长 SL	0.139	0.174	-0.094	0.041
	壳高 SH		0.129	-0.101	0.032
	壳宽 SW			0.058	-0.028
	绞合线长 HL				0.010
红壳色 red shell	壳长 SL	0.095	0.085	0.013	0.067
	壳高 SH		0.102	0.017	0.033
	壳宽 SW			0.026	0.014
	绞合线长 HL				0.067
黑壳色 black shell	壳长 SL	0.065	0.091	0.052	0.044
	壳高 SH		0.100	0.072	0.040
	壳宽 SW			0.120	0.053
	绞合线长 HL				0.045

偏回归系数统计表明, 各形态性状对体重均产生极显著的影响($P<0.01$, 表 5), 说明所选择的所有形态性状与体重之间都有着极显著的线性关系。对 5 种壳色合浦珠母贝建立以壳长、壳高、壳宽和绞合线长为自变量, 体重为因变量的回归方程。其中传统壳色: $BW=-24.999+0.467SL+0.387SH-0.259SW+0.244HL$; 金壳色: $BW=-38.661+0.305SL+0.477SH+0.242SW+0.375HL$; 白壳色: $BW=-4.130+0.332SL+0.300SH-0.307SW+0.088HL$;

红壳色: $BW=-27.307+0.327SL+0.321SH+0.252SW+0.305HL$; 黑壳色: $BW=-40.921+0.278SL+0.335SH+1.076SW+0.269HL$ 。

多元线性回归方程分析表明, 体重与形态性状之间的回归均达到极显著水平($P<0.01$)(表 6)。其中 $F=358.796$ 、 556.019 、 139.879 、 270.855 和 529.765 , 均符合 $P<0.01$, 方差分析结果有极显著差异, 说明方差分析是有意义的, 可以运用于实际生产中。

表 5 合浦珠母贝各形态性状对体重的偏回归系数显著性检验
Tab. 5 Partial regression coefficient test for various traits to body weight of *Pinctada fucata*

壳色 color	性状 trait	偏回归系数 partial regression coefficient		t	显著性水平 Sig.
		系数 B	标准差 SE		
传统壳色 traditional shell	常量 constant	-24.999	1.630	-15.341	0.000
	壳长 SL	0.467	0.039	11.840	0.000
	壳高 SH	0.387	0.038	10.189	0.000
	壳宽 SW	-0.259	0.068	-3.811	0.000
	绞合线长 HL	0.244	0.038	6.419	0.000
金壳色 gold shell	常量 constant	-38.661	1.589	-24.332	0.000
	壳长 SL	0.305	0.026	11.531	0.000
	壳高 SH	0.477	0.026	10.189	0.000
	壳宽 SW	0.242	0.038	18.450	0.000
	绞合线长 HL	0.375	0.029	6.441	0.000
白壳色 white shell	常量 constant	-4.130	1.535	-2.691	0.007
	壳长 SL	0.332	0.032	10.247	0.000
	壳高 SH	0.300	0.030	9.927	0.000
	壳宽 SW	-0.307	0.045	-6.816	0.000
	绞合线长 HL	0.088	0.030	2.929	0.003
红壳色 red shell	常量 constant	-27.307	1.769	-15.433	0.000
	壳长 SL	0.327	0.028	11.782	0.000
	壳高 SH	0.321	0.025	13.074	0.000
	壳宽 SW	0.252	0.035	7.140	0.000
	绞合线长 HL	0.305	0.029	10.632	0.000
黑壳色 black shell	常量 constant	-40.921	1.551	-26.376	0.000
	壳长 SL	0.278	0.025	11.150	0.000
	壳高 SH	0.335	0.024	14.218	0.000
	壳宽 SW	1.076	0.062	17.388	0.000
	绞合线长 HL	0.269	0.026	10.439	0.000

表 6 合浦珠母贝形态性状对体重的多元回归方差分析
Tab. 6 ANOVA analysis on multi-variance regression between the main traits and body weight of *Pinctada fucata*

模型 model		平方和 squares	自由度 df	均方 mean square	F	P
传统壳色 traditional shell	回归 regression	22427.997	4	5606.999	358.796	0.000
	残差 residual	15549.136	995	15.627		
	总计 total	37977.133	999			
金壳色 gold shell	回归 regression	24517.516	4	6129.379	556.019	0.000
	残差 residual	10968.576	995	11.024		
	总计 total	35486.093	999			
白壳色 white shell	回归 regression	6757.030	4	1689.257	139.879	0.000
	残差 residual	12016.201	995	12.077		
	总计 total	18773.230	999			
红壳色 red shell	回归 regression	10405.209	4	2601.302	270.855	0.000
	残差 residual	9556.009	995	9.604		
	总计 total	19961.219	999			
黑壳色 black shell	回归 regression	13015.455	4	3253.864	529.765	0.000
	残差 residual	6111.379	995	6.142		
	总计 total	19126.833	999			

5 种壳色合浦珠母贝所选择的 4 种形态性状与体重间均存在极显著的回归关系($P<0.01$), 基于 5 种壳色合浦珠母贝形态特征经欧式最短距离进行聚类分析, 结果见图 2。5 种壳色合浦珠母贝, 其中传统壳色与金壳色形态特征较为接近, 而白壳色、红壳色和金壳色形态较为相近。

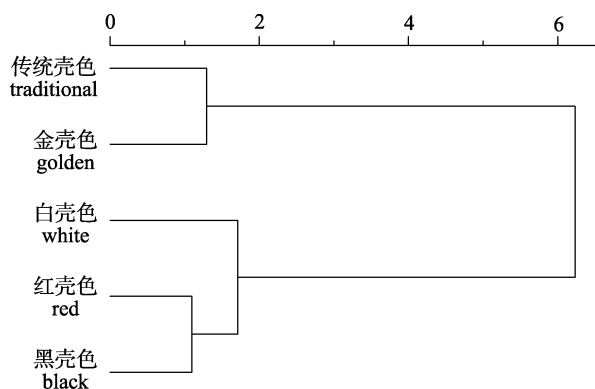


图 2 合浦珠母贝不同壳色形态聚类分析图

Fig. 2 Cluster dendrogram of different colors shell of *Pinctada fucata*

3 讨论

合浦珠母贝的体重包括其壳重和软体重, 在一定程度上能够衡量其生长、健康状况及育珠效果等重要指标, 因此体重的改良对合浦珠母贝的生长快慢以及育珠质量的提高有着巨大的作用。本研究发现, 5 种壳色合浦珠母贝体重的变异系数均大于其他形态性状, 结果与其他贝类的表现一致^[13, 22], 说明合浦珠母贝在体重选育中还有着巨大的提高潜力。壳宽在合浦珠母贝的插核育珠过程中是一个极其重要的性状, 5 种壳色合浦珠母贝, 金壳色壳宽相比于其他 4 种壳色有着一定的优势, 与陈明强等^[23]的研究结果相一致, 说明当合浦珠母贝在以壳宽为选择目标时金壳色应作为首选。皱柯姝等^[24]对选育的 4 种壳色合浦珠母贝棱柱层和珍珠层金属离子分数进行了比较, 认为壳色与珍珠质量的培育有着直接的关联, 壳色可作为合浦珠母贝选育的协同选择指标。

相关系数是变量间相互关系的综合体现, 并不能全面反映变量间的本质联系^[5]。然而, 通径系数则是变量标准化后的偏回归系数, 能够真实地反映各性状间的本质关系^[5]。本研究中, 5 种壳色

的合浦珠母贝各形态性状与体重间的回归关系均达到极显著水平($P<0.01$), 但并不能说明所有的形态性状都是影响其体重的主要因素, 因此有必要通过通径分析, 找到影响其体重的主要形态性状。表型性状相关系数均达到显著的自变量才能进行通径分析, 5 种壳色合浦珠母贝中选择的形态性状包括壳长、壳高、壳宽和绞合线长均被保留下来, 然而不同壳色的合浦珠母贝与体重相关系数最大的形态形状不尽相同, 呈现出了与壳色有关的差异, 此结果与不同壳色的文蛤^[13]和长牡蛎^[22]形态性状对体重有不同影响相一致。因此, 利用壳色与表型性状存在明显的相关性可对壳色和生长性状进行协同选择, 培育同时具有特征壳色和生长优势等性状的品种。在合浦珠母贝选育过程中, 发现在野生和养殖群体中均存在壳色的多态性, 常见壳色有褐色、红色、黄色、黑色和白色等^[25]。合浦珠母贝的壳色不仅与其生长、成活等性状有关, 还与优质珠的培育及产量息息相关^[24]。贝类壳色协同选育在华贵栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)^[26]、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)^[27]、虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)^[28]、菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)^[29]等贝类中已取得显著进展。本研究中, 不同壳色合浦珠母贝在同一养殖环境条件下, 相同贝龄, 表现出了不同的体型特征, 影响其体重的决定因子不同。传统壳色组对体重的直接影响最大的是壳长, 其次是壳高; 间接影响为壳高通过壳长影响最大, 这与刘志刚等^[30]的研究结果相同。然而, 金壳色组和红壳色组主要影响因子为壳高, 其次为壳长; 白壳色组主要影响因子为壳长, 其次为壳高; 黑色组主要影响因子为壳宽, 其次为壳长。

生物体的形态性状受基因型与环境共同作用的影响, 本研究 5 种壳色的合浦珠母贝在同一环境条件下生长, 贝龄相同, 但基于其形态特征经欧式最短距离聚类分析, 结果表现为传统壳色和金壳色形态特征较为相近, 而白壳色、红壳色和黑壳色形态特征则较为相近。陈静等^[31]对不同壳色合浦珠母贝进行基因检测, 认为不同壳色选育系间具有较高的遗传多样性, 遗传分化明显, 其遗传分化程度已相当于或超过不同地理种群的分

化程度, 因此可为壳色选育的定向选择及壳色间的杂交奠定方向。

参考文献:

- [1] Du M R, Fang J G, Gao Y P, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of different-age *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2017, 41(4): 580-587. [杜美荣, 方建光, 高亚平, 等. 不同贝龄栉孔扇贝数量性状的相关性和通径分析[J]. 水产学报, 2017, 41(4): 580-587.]
- [2] Dong S R, Kong J, Wan C K, et al. Path analysis of effects of morphometric attributes on body weight of *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Marine Fisheries Research, 2007, 28(3): 15-22. [董世瑞, 孔杰, 万初坤, 等. 中国对虾形态性状对体重影响的通径分析[J]. 海洋水产科学, 2007, 28(3): 15-22.]
- [3] Gauch J H G. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992.
- [4] Huang Y H, Fan B, Li Y M, et al. Path analysis for the correlations between morphological traits and body weight in five *Macrobrachium nipponense* populations[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(8): 1173-1185. [黄有辉, 范斌, 李一鸣, 等. 日本沼虾五群体形态性状对体重的通径分析[J]. 水产学报, 2016, 40(8): 1173-1185.]
- [5] Guo H Y, Chen M Q, Wang Y, et al. Correlation and path analysis of main economic traits of wild population of *Trachycardium flavum*[J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(2): 1-8. [郭华阳, 陈明强, 王雨, 等. 黄边糙鸟蛤野生群体主要经济性状间的相关性及通径分析[J]. 南方水产科学, 2013, 9(2): 1-8.]
- [6] Zhang W J, Chang Y Q, Ding J, et al. Correlation and regression of shell size and weight of *Dosinia japonica* Reeve[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(3): 796-800. [张伟杰, 常亚青, 丁君, 等. 日本镜蛤壳尺寸与质量性状的相关与回归分析[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 796-800.]
- [7] Zhang G F, Zhang W F, Fang A P, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of different-age *Lamprotula leai* artificial breeding[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2014, 45(5): 1115-1121. [张根芳, 张文府, 方爱萍, 等. 养殖条件下不同年龄背瘤丽蚌数量性状的相关与通径分析[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(5): 1115-1121.]
- [8] Ma H Y, Ma C Y, Ma L B, et al. Correlation of growth-related traits and their effects on body weight of the mud crab (*Scylla paramamosain*)[J]. Genetics and Molecular Research, 2013, 12(4): 4127-4136.
- [9] Zhao L, He Y, Yang F, et al. Correlation and path analysis of morphological and weight traits in marine gastropod *Glossaulax reiniana*[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(4): 821-827.
- [10] Luo X, Ke C, You W. Estimates of correlations for shell morphological traits on body weight of interspecific hybrid abalone (*Haliotis discus hannai* and *Haliotis gigantea*)[J]. Journal of Shellfish Research, 2013, 32(1): 115-118.
- [11] Xiao S, Fu Z J, Yu Z N. Path analysis of quantitative traits of male and female Hong Kong oyster *Crassostrea hongkongensis*[J]. South China Fisheries Science, 2011, 7(4): 1-9. [肖述, 符政君, 喻子牛. 香港巨牡蛎雌雄群体的数量性状通径分析[J]. 南方水产科学, 2011, 7(4): 1-9.]
- [12] Bian L, Liu C L, Chen S Q, et al. Path analysis of effects of morphometric traits on body weight in spotted halibut *Verasper variegatus* at different growth stages[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2017, 24(6): 1168-1175. [边力, 刘长琳, 陈四清, 等. 不同生长期圆斑星鲽形态性状对体重影响的通径分析[J]. 中国水产科学, 2017, 24(6): 1168-1175.]
- [13] Fang J, Xiao G Q, Zhang J M, et al. Effect of morphological traits on live body weight in clam *Meretrix meretrix* with two kind color shells[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2017, 32(3): 310-315. [方军, 肖国强, 张炯明, 等. 两种壳色文蛤壳形态性状对活体重的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(3): 310-315.]
- [14] Meng Z H, Zhang B, Liu B S, et al. High carotenoids content can enhance resistance of selected *Pinctada fucata* families to high temperature stress[J]. Fish and Shellfish Immunology, 2017, 61: 211-218.
- [15] Li H M, Wang D Q, Deng Z H, et al. Molecular characterization and expression analysis of chitinase from the pearl oyster *Pinctada fucata*[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2017, 203: 141-148.
- [16] Guan Y Y, He M X, Wu H B. Differential mantle transcriptomics and characterization of growth-related genes in the diploid and triploid pearl oyster *Pinctada fucata*[J]. Marine Genomics, 2017, 33: 31-38.
- [17] Niu Z K, Liu B S, Zhang D L, et al. Comparative analysis of growth traits and shell-closing strength among hybrid populations from three geographical groups of pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(1): 26-32. [牛志凯, 刘宝锁, 张东玲, 等. 合浦珠母贝 3 个地理群体杂交后代生长性状和闭壳肌拉力的比较分析[J]. 南方水产科学, 2015, 11(1): 26-32.]
- [18] Wada K T. Inheritance of white coloration of the prismatic layer of shells in the Japanese pearl oyster, *Pinctada fucata*

- martensii*, and its importance in the pearl culture industry[J]. Aquaculture, 1990, 85(1): 331-331.
- [19] Wada K T. Genetic selection for shell traits in the Japanese pearl oyster, *Pinctada fucata martensii*[J]. Aquaculture, 1986, 57(1-4): 171-176.
- [20] 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.
- [21] Wada K T, Komar U 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.
- [22] Han Z Q, Li Q. Multiple regression and path analysis of morphological and weight traits of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) orange-shell strain[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(12): 46-52. [韩自强, 李琪. 长牡蛎壳橙品系形态性状与体重的相关及通径分析[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(12): 46-52.]
- [23] Chen M Q, Liu B S, Yan J X, et al. Comparison analysis of major traits among four shell color selective lines of pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(5): 118-122. [陈明强, 刘宝锁, 严俊贤, 等. 合浦珠母贝 4 种壳色选育系主要性状的比较分析[J]. 南方水产科学, 2016, 12(5): 118-122.]
- [24] Zou K S, Zhang D C, Guo H Y, et al. Comparison of seven metallic elements in prismatic layer and nacreous layer of shells from four shell color strains in pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(3): 74-79. [邹柯姝, 张殿昌, 郭华阳, 等. 4 种壳色合浦珠母贝贝壳棱柱层和珍珠层 7 种金属元素质量分数的比较分析[J]. 南方水产科学, 2015, 11(3): 74-79.]
- [25] 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.]
- [26] Zhang T, Zheng H P, Sun Z W, et al. Comparison of traits among offspring deriving from different shell colors in noble scallop *Chlamys nobilis* Reeve at early developmental syage [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(23): 478-484. [张涛, 郑怀平, 孙泽伟, 等. 华贵栉孔扇贝不同壳色后代早期发育阶段性状比较[J]. 中国农学通报, 2009, 25(23): 478-484.]
- [27] Xu F, Zheng H P, Zhang H B, et al. Comparison on the larval traits between strain “Zhongkehong” and comon cultured population of bay scallop *Argopecten irradians* under different temperature[J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(6): 876-883. [许飞, 郑怀平, 张海滨, 等. 海湾扇贝“中科红”品种与普通养殖群体不同温度下早期性状的比较[J]. 水产学报, 2008, 32(6): 876-883.]
- [28] Cheng P, Yang A G, Zhou L Q, et al. Comparison of growth development and genetic diversity of F₁ larvae among different shell color lines of Japanese scallop *Patinopekten yessoensis*[J]. Journal of Fishery Science of China, 2010, 17(5): 960-968. [程鹏, 杨爱国, 周丽青, 等. 不同壳色虾夷扇贝家系 F₁ 幼虫生长及遗传结构的比较分析[J]. 中国水产科学, 2010, 17(5): 960-968.]
- [29] Yan X W, Zhang G F, Yang F, et al. A comparison of growth and development of manila clam (*Ruditapes philippinarum*) from two pedigrees[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2005, 20(4): 266-269. [闫喜武, 张国范, 杨凤, 等. 菲律宾蛤仔莆田群体两个壳色品系生长发育的比较[J]. 大连水产学院学报, 2005, 20(4): 266-269.]
- [30] Liu Z G, Wang H, Sun X Z, et al. Analysis of determination effects of econonic traits on body weight of *Pinctada martensii* (Duner)[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2007, 27(4): 15-20. [刘志刚, 王辉, 孙小真, 等. 马氏珠母贝经济性状对体重决定效应分析[J]. 广东海洋大学学报, 2007, 27(4): 15-20.]
- [31] Chen J, Liu Z G, Sun X Z, et al. Analysis on growth characteristic and genetic diversity in the selected lines (F₃) of four shell colors of *Pinctada martensii*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(5): 588-595. [陈静, 刘志刚, 孙小真, 等. 马氏珠母贝 4 种壳色选育系 F₃ 的生长特性和遗传多样性比较[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(5): 588-595.]

Correlation and path analyses of quantitative traits in different shell color F6 lines of pearl oyster (*Pinctada fucata*)

WANG Yizhe^{1,2}, DENG Zhenghua¹, WANG Yu¹, LI Youning¹, YU Gang¹, HUANG Guiju¹, CHEN Mingqiang¹

1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. College of Fishery Science, Tianjin Agriculture University; Tianjin Key Laboratory of Aquaculture, Tianjin 300384, China

Abstract: To determine the effect of main morphological traits on the body weight of *Pinctada fucata* and to offer strategies for parent selection during the breeding of *P. fucata*, the correlations between the morphometric attributes and body weight of *P. fucata* were explored by the correlation, path, and regression analyses. One thousand individuals from each of traditional shell, golden shell, white shell, red shell, and black shell oysters were randomly sampled to measure their body weight (BW, g) and four morphometric attributes, including the shell length (SL, mm), shell height (SH, mm), shell width (SW, mm), and hinge length (HL, mm). The correlation coefficients among all variables were calculated. The path coefficients were calculated by setting the body weight as a dependent variable and other attributes as independent variables via stepwise elimination. The results showed that the four morphometric attributes of the five kinds of oysters extremely significantly ($P < 0.01$) correlated with body weight. The shell length presented the highest correlation with the body weight of traditional, white, and red shell oysters, and the shell height showed the highest correlation with the body weight of golden and black shell oysters. The results of the path coefficient analysis showed that the shell length of traditional and white shell oysters, the shell height of golden and red shell oysters, and the shell width of black shell oysters showed the highest correlation with body weight, and exhibited predominant direct effect and determinacy on the body weight for *P. fucata*. The multiple regression equations were obtained to estimate body weight as traditional shell color: $BW = -24.999 + 0.467SL + 0.387SH - 0.259SW + 0.244HL$; golden shell color: $BW = -38.661 + 0.305SL + 0.477SH + 0.242SW + 0.375HL$; white shell color: $BW = -4.130 + 0.332SL + 0.300SH - 0.307SW + 0.088HL$; red shell color: $BW = -27.307 + 0.327SL + 0.321SH + 0.252SW + 0.305HL$; black shell color: $BW = -40.921 + 0.278SL + 0.335SH + 1.076SW + 0.269HL$. The clustering results showed that the morphological traits were more similar between the traditional and golden shell oysters and between the white, red, and black shell oysters.

Key words: *Pinctada fucata*; shell color; morphological trait; correlation analysis; path analysis

Corresponding author: CHEN Mingqiang. E-mail: chenmingqiang68@163.com