

DOI: 10.12264/JFSC2022-0340

不同壳色和性别栉孔扇贝群体的性状相关性及通径分析

赵春暖^{1,2}, 于涛^{1,2}, 郑言鑫^{1,2}, 李波^{1,2}, 王喜文^{1,2}, 蔡忠强^{1,2}, 王晓梅^{1,2}, 任利群^{1,2},
徐帅^{1,2}, 吴玉萍^{1,2}, 吴楠^{1,2}, 张明烨^{1,2}

1. 中国水产科学研究院长岛增殖实验站, 山东 烟台 265800;
2. 中国水产科学研究院贝藻繁育工程技术研究中心, 山东 烟台 265800

摘要: 为了优化栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)选育中的亲贝选择策略, 以长岛海域栉孔扇贝浅红和棕黄两个壳色群体为研究对象, 通过测定壳长(X_1)、壳宽(X_2)、壳高(X_3)、前耳长(X_4)、绞合线长(X_5)、绞合线宽(X_6)6 个形态性状, 以及湿重(Y)、软体重(Z)和闭壳肌重(W)3 个重量性状, 采用相关分析和通径分析方法, 研究两种壳色群体整体及其雌雄群体与重量性状显著相关的形态性状, 分别构建栉孔扇贝形态性状与重量性状间的回归方程。研究结果表明, 闭壳肌重的变异系数最高(0.30); 棕黄雄性群体壳宽与闭壳肌重不相关, 其余群体 6 个形态性状与 3 个重量性状间均存在显著相关关系($P < 0.05$), 浅红群体、浅红雄性群体、浅红雌性群体、棕黄群体、棕黄雄性群体、棕黄雌性群体中对湿重(Y)、软体重(Z)直接影响程度最大的形态性状均为壳长, 壳长对湿重的通径系数依次为 0.602、0.645、0.580、0.527、0.752、0.343, 壳长对软体重的通径系数依次为 0.677、0.664、0.770、0.566、0.793、0.688; 浅红群体、浅红雄性群体、浅红雌性群体、棕黄群体及棕黄雄性群体对闭壳肌重直接影响程度最大的形态性状为壳长, 壳长对闭壳肌重通径系数依次为 0.726、0.751、0.717、0.534、0.488, 而棕黄雌性群体对闭壳肌重直接影响程度最大的形态性状为壳宽, 壳宽对闭壳肌重的通径系数为 0.425。浅红群体中作用显著的形态性状对闭壳肌重的直接影响程度显著高于棕黄群体, 棕黄群体对闭壳肌重作用显著的形态性状存在雌雄差异。各实验群体决定系数与通径分析结果一致。结论认为, 在栉孔扇贝选育过程中, 针对不同的选育目标, 挑选不同壳色的雌雄亲本应参考的形态性状不同, 重点以壳长为主要选择性状, 同时关注其他形态性状的协同选择。

关键词: 栉孔扇贝; 壳色; 相关性; 通径分析

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2023)03-0268-16

栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)隶属于软体动物门(Mollusca)、双壳纲(Bivalvia)、珍珠贝目(Pterioidea)、扇贝科(Pectinidae)、扇贝属(*Chlamys*), 是中国北方主要的经济贝类^[1]。在扇贝育种中, 培育具有优良性状的栉孔扇贝子代, 首先需选择具有优良性状的亲本^[2]。扇贝的选育性状除湿重外, 其他经济性状如闭壳肌重、软体重和肥满度等性状值的大小也是直接影响贝类养殖业经济效益的重要指标, 但这些性状数据必须通过解剖获得, 与形态性状

相比不直观, 而且会造成优质亲贝的损失。

根据数量遗传学家 Wright^[3]在 20 世纪 20 年代提出的通径分析理论, 确定栉孔扇贝形态性状和重量性状间的相关性, 将性状间的相关系数拆分为各性状的直接影响和通过其他性状的间接影响, 从而通过通径分析建立最优回归方程。在多元回归的基础上计算各性状间的相关系数, 计算得出的线性回归方程的标准系数即为通径系数^[4-6]。运用相关性分析和通径分析理论, 分析形态性状与

收稿日期: 2022-10-23; 修订日期: 2022-12-19.

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金资助项目(CARS-49); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项经费项目(2020YJ05, 2020TD66).

作者简介: 赵春暖(1989–), 男, 工程师, 研究方向为海珍品良种繁育及增养殖研究. E-mail: 15865600367@163.com

通信作者: 王晓梅, 副研究员, 研究方向为渔业资源保护与利用. E-mail: xiaomei_wang328@126.com

实际需求重量性状之间的相关关系,可以简化操作,提高选育效率。在南澳青蛤(*Cyclina sinensis*)^[7]、魁蚶(*Scapharca broughtonii*)^[8-9]、华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)^[10]、橄榄蛸蚌(*Solenia oleivora*)^[11]、大珠母贝(*Pinctada maxima*)^[12]、墨西哥湾扇贝(*Argopecten irradians concentricus*)^[13]等双壳贝类中均开展过相关研究,当贝类种类、地理种群、选育目标不同时,选择的形态性状也有差异。刘小林等^[14]通过相关性分析和通径分析,表明栉孔扇贝壳长、壳厚、壳高与活体重、净肉重、熟肉重的相关系数均达到极显著水平,但是性别^[15]、贝龄^[16]、水深^[17]、家系以及养殖海域^[2,18]不同,影响重量性状的形态性状也存在差异。壳色是育种的重要标记^[19-20]和新品种识别特征。在长牡蛎(*Crassostrea gigas*)^[21]、虾夷扇贝(*Mizuhopecten yessoensis*)^[22]、文蛤(*Meretrix meretrix*)^[23]、合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)^[24]中均开展了不同壳色群体形态性状对重量性状影响的研究,但对不同壳色栉孔扇贝形态性状对重量性状影响的研究较少。栉孔扇贝主要的重量性状包括湿重、软体重、闭壳肌重等,但是目前的研究主要集中在湿重,对于闭壳肌重、软体重等重量性状关注较

少^[18]。此外,在贝类选择育种中,父母本的选择直接影响后代的性状,因此,开展栉孔扇贝壳色及雌雄群体不同生长性状的相关性研究,对于栉孔扇贝的人工选育和新品种培育工作具有重要意义。

本研究以在长岛海域养殖的栉孔扇贝为研究对象,分别选择不同壳色的雌雄群体,分析形态性状与湿重、软体重、闭壳肌重之间的相关性,通过相关性和通径分析筛选影响重量性状的主要形态性状,并建立最优回归方程,确定形态性状对栉孔扇贝湿重、软体重和闭壳肌重的直接作用、间接作用及其决定系数,针对栉孔扇贝不同目标性状,为其不同壳色、性别群体的人工选育提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验于2022年5月从烟台长岛大黑山岛海域养殖区随机采集栉孔扇贝2龄个体400个,其中浅红壳色个体200个(雌性100个,雄性100个),棕黄壳色个体200个(雌性100个,雄性100个)(图1),测量前清理去除贝壳表面附着物。

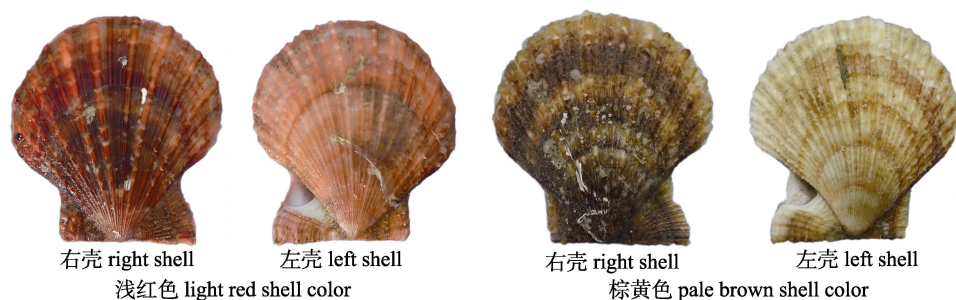


图1 不同壳色栉孔扇贝
Fig. 1 *Chlamys farreri* with different shell color

1.2 性状测量

采用精确度0.01 mm的游标卡尺测定每个个体壳长(X_1)、壳宽(X_2)、壳高(X_3)、前耳长(X_4)、绞合线长(X_5)、绞合线宽(X_6)6个形态性状(图2),采用精确度0.01 g的电子天平称量每个个体湿重(Y)、软体重(Z)、闭壳肌重(W)3个重量性状。

1.3 统计分析

通过Excel进行数据计算处理,统计整理测

量数据平均值及标准差(standard deviation, SD),计算变异系数(coefficient of variation, CV)。利用SPSS19.0软件分别对两个壳色群体整体及其雌雄群体壳长(X_1)、壳宽(X_2)、壳高(X_3)、前耳长(X_4)、绞合线长(X_5)、绞合线宽(X_6)6个形态性状和湿重(Y)、软体重(Z)、闭壳肌重(W)3个重量性状进行多元回归分析,分析形态性状对重量性状的直接影响和间接影响,获得对应性状的决定系数,建

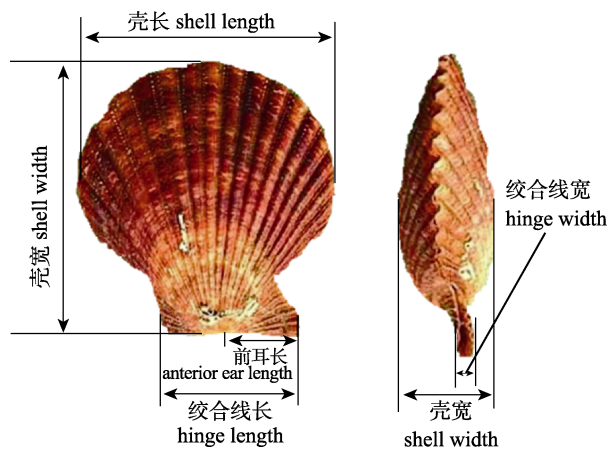


图 2 栉孔扇贝各形态性状的图解
Fig. 2 The diagram of morphological traits of *Chlamys farreri*

立形态性状对重量性状的回归方程^[16]。

变异系数(CV): $CV=SD/\text{mean}$

决定系数(d_i): $d_i=P_i^2$

共同决定系数(d_{ij}): $d_{ij}=2r_{ij}P_iP_j$

性状 i 通过性状 j 的间接通径系数(P_{ij}): $P_{ij}=r_{ij}P_j$ 式中, SD 为标准差, mean 为平均值, P_i 和 P_j 分别为两个自变量对因变量的通径系数, r_{ij} 为两个自变量间的相关系数。

多元线性回归方程为: $y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+\cdots+b_ix_i$ 式中, y 代表 3 个重量性状对应参数, b_0 为常数项, b_1 、 b_2 、 $\cdots$ 、 b_i 为偏回归系数; x_1 、 x_2 、 $\cdots$ 、 x_i 为偏回归系数所对应的自变量。

2 结果与分析

2.1 栉孔扇贝各性状的统计结果

栉孔扇贝各性状的具体参数如表 1 所示。各性状指标的变异系数范围为 7.98%~30.05%, 除壳宽外, 3 个重量性状的变异系数均大于其他形态性状的变异系数, 闭壳肌重的变异系数最高。6 个形态性状变异系数由高到低依次为壳宽、绞合线宽、壳高、前耳长、绞合线长、壳长。

表 1 栉孔扇贝各性状统计分析
Tab. 1 The statistical analysis of main traits in *Chlamys farreri*

参数 parameter	壳长/mm shell length	壳宽/mm shell width	壳高/mm shell height	前耳长/mm anterior ear length	绞合线长/mm hinge length	绞合线宽/mm hinge width	湿重/g wet weight	软体重/g tissue weight	闭壳肌重/g adductor weight
平均值 mean	61.35	20.98	66.68	22.41	37.38	4.81	34.68	17.81	4.74
标准差 SD	4.90	5.00	6.72	2.18	3.27	0.60	7.42	4.17	1.42
变异系数/% CV	7.98	23.84	10.08	9.73	8.75	12.57	21.39	23.44	30.05

2.2 不同壳色群体形态性状相关性分析

在浅红群体中, 除雄性群体闭壳肌重和壳宽为显著相关($P<0.05$)外, 浅红群体整体和雄性群体的 6 个形态性状与 3 个重量性状均呈极显著相关($P<0.01$), 浅红雌性群体中, 除壳宽与闭壳肌

重显著相关($P<0.05$)外, 6 个形态性状与 3 个重量性状均呈极显著相关($P<0.01$)。浅红群体整体、雄性群体和雌性群体的湿重、软体重和闭壳肌重 3 个重量性状均与壳长的相关系数最大(表 2)。

表 2 栉孔扇贝浅红群体相关性分析
Tab. 2 The correlation analysis of *Chlamys farreri* with light red shell color

群体类型 group type	性状 trait	壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height	前耳长 anterior ear length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
整体 entirety	壳宽 shell width	0.303**					
	壳高 shell height	0.662**	-0.343**				
	前耳长 anterior ear length	0.760**	0.218**	0.560**			
	绞合线长 hinge length	0.832**	0.250**	0.604**	0.831**		
	绞合线宽 hinge width	0.605**	0.223**	0.428**	0.612**	0.694**	
	湿重 wet weight	0.874**	0.305**	0.634**	0.751**	0.825**	0.645**
	软体重 tissue weight	0.849**	0.297**	0.621**	0.696**	0.770**	0.580**
	闭壳肌重 adductor weight	0.726**	0.239**	0.547**	0.557**	0.627**	0.440**

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)

群体类型 group type	性状 trait	壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height	前耳长 anterior ear length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
雄性群体 male group	壳宽 shell width	0.306**					
	壳高 shell height	0.663**	-0.276**				
	前耳长 anterior ear length	0.785**	0.185	0.582**			
	绞合线长 hinge length	0.858**	0.229*	0.642**	0.827**		
	绞合线宽 hinge width	0.634**	0.261**	0.422**	0.618**	0.704**	
	湿重 wet weight	0.885**	0.303**	0.648**	0.739**	0.833**	0.660**
	软体重 tissue weight	0.856**	0.318**	0.625**	0.676**	0.794**	0.584**
雌性群体 female group	闭壳肌重 adductor weight	0.751**	0.243*	0.547**	0.539**	0.640**	0.389**
	壳宽 shell width	0.304**					
	壳高 shell height	0.663**	-0.428**				
	前耳长 anterior ear length	0.744**	0.266**	0.537**			
	绞合线长 hinge length	0.813**	0.275**	0.565**	0.840**		
	绞合线宽 hinge width	0.579**	0.166	0.440**	0.615**	0.680**	
	湿重 wet weight	0.872**	0.317**	0.623**	0.766**	0.827**	0.647**
	软体重 tissue weight	0.861**	0.284**	0.621**	0.721**	0.760**	0.604**
	闭壳肌重 adductor weight	0.717**	0.235*	0.553**	0.583**	0.614**	0.517**

注: 表格中的数字为相关系数. *表示相关性达显著水平($P<0.05$); **表示相关性达极显著水平($P<0.01$).

Note: Figures in the table are correlation coefficients. * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

棕黄群体整体和雌性群体的 6 个形态性状与 3 个重量性状均呈极显著相关($P<0.01$), 雄性群体壳宽与闭壳肌重相关性不显著($P>0.05$), 壳高和绞合线宽与闭壳肌重呈显著相关($P<0.05$), 其余形态性状与重量性状均呈极显著相关($P<0.01$)。整体和雄性群体湿重、软体重、闭壳肌重均与壳长相关系数最大, 雌性群体湿重与壳高相关系数最

大, 软体重与壳长相关系数最大, 闭壳肌重与壳宽相关系数最大(表 3)。

2.3 形态性状与重量性状间的通径分析结果

将不同群体通径分析结果拆分为直接影响和间接影响, 直接影响为一个形态性状对重量性状产生的直接作用, 间接影响为一个形态性状通过另一形态性状对重量性状产生的间接作用。

表 3 栉孔扇贝棕黄群体相关性分析

Tab. 3 The correlation analysis of *Chlamys farreri* with pale brown shell color

群体类型 group type	性状 trait	壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height	前耳长 anterior ear length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
整体 entirety	壳宽 shell width	0.336**	1				
	壳高 shell height	0.642**	-0.224**	1			
	前耳长 anterior ear length	0.610**	0.232**	0.480**	1		
	绞合线长 hinge length	0.734**	0.284**	0.544**	0.688**	1	
	绞合线宽 hinge width	0.461**	0.185**	0.355**	0.361**	0.435**	1
	湿重 wet weight	0.834**	0.394**	0.574**	0.537**	0.644**	0.553**
	软体重 tissue weight	0.808**	0.386**	0.538**	0.531**	0.594**	0.481**
	闭壳肌重 adductor weight	0.534**	0.248**	0.349**	0.282**	0.357**	0.249**

(待续 to be continued)

(续表 3 Tab. 3 continued)

群体类型 group type	性状 trait	壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height	前耳长 anterior ear length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
雄性群体 male group	壳宽 shell width	0.290**	1				
	壳高 shell height	0.488**	-0.433**	1			
	前耳长 anterior ear length	0.665**	0.144	0.487**	1		
	绞合线长 hinge length	0.816**	0.228*	0.507**	0.732**	1	
	绞合线宽 hinge width	0.497**	0.095	0.310**	0.291**	0.473**	1
	湿重 wet weight	0.847**	0.329**	0.430**	0.574**	0.713**	0.564**
	软体重 tissue weight	0.793**	0.333**	0.382**	0.564**	0.688**	0.495**
	闭壳肌重 adductor weight	0.488**	0.164	0.218*	0.264**	0.384**	0.243*
雌性群体 female group	壳宽 shell width	0.611**	1				
	壳高 shell height	0.905**	0.635**	1			
	前耳长 anterior ear length	0.562**	0.553**	0.510**	1		
	绞合线长 hinge length	0.663**	0.549**	0.639**	0.651**	1	
	绞合线宽 hinge width	0.432**	0.513**	0.455**	0.436**	0.400**	1
	湿重 wet weight	0.817**	0.733**	0.820**	0.502**	0.580**	0.548**
	软体重 tissue weight	0.815**	0.707**	0.787**	0.500**	0.511**	0.478**
	闭壳肌重 adductor weight	0.669**	0.690**	0.688**	0.400**	0.418**	0.412**

注：表格中的数字为相关系数。*表示相关性达显著水平($P<0.05$); **表示相关性达极显著水平($P<0.01$)。
Note: Figures in the table are correlation coefficients. * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.3.1 形态性状对湿重的通径分析 浅红群体按照整体、雄性群体和雌性群体通径分析结果(表 4) 表明,对湿重直接影响最大的形态性状均为壳长,间接影响均为绞合线长通过壳长对湿重影响最大。

表 4 栉孔扇贝浅红群体湿重通径分析结果
Tab. 4 Path analysis results of wet weight of *Chlamys farreri* with light red shell color

重量性状 weight trait	群体类型 group type	形态性状 morphological trait	总影响 total effect	直接影响 direct effect	间接影响 indirect effect			
					合计 total	壳长 shell length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
湿重 wet weight	整体 entirety	壳长 shell length	0.874	0.602	0.272	—	0.206	0.066
		绞合线长 hinge length	0.825	0.248	0.577	0.501	—	0.076
		绞合线宽 hinge width	0.645	0.109	0.536	0.364	0.172	—
	雄性群体 male group	壳长 shell length	0.885	0.645	0.239	—	0.239	
		绞合线长 hinge length	0.833	0.279	0.553	0.553	—	
	雌性群体 emale group	壳长 shell length	0.872	0.580	0.292	—	0.217	0.075
		绞合线长 hinge length	0.827	0.267	0.560	0.472	—	0.088
		绞合线宽 hinge width	0.647	0.130	0.518	0.336	0.182	—

注：—表示无间接作用; 空白表示性状间的间接作用无统计意义。
Note: — indicates no indirect effect. Blank indicates no statistical significance.

对棕黄群体整体、棕黄雄性群体和棕黄雌性群体湿重直接影响最大的形态性状均为壳长(表 5), 整体和雌性群体均为壳高通过壳长对湿重的间接影响最大, 但雄性群体是绞合线宽通过壳长对湿重间接影响最大。

2.3.2 形态性状对软体重的通径分析 对浅红群体整体、雄性群体和雌性群体软体重直接影响最大的形态性状均为壳长(表6), 整体和雄性群体均为绞合线长通过壳长对软体重间接影响最大, 雌性群体是绞合线宽通过壳长对软体重间接影响最大。

表 5 栉孔扇贝棕黄群体湿重通径分析结果

Tab. 5 Path analysis results of wet weight of *Chlamys farreri* with pale brown shell color

重量性状 weight trait	群体类型 group type	形态性状 morphological trait	总影响 total effect	直接影响 direct effect	间接影响 indirect effect				
					合计 total	壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height	绞合线宽 hinge width
湿重 wet weight	整体 entirety	壳长 shell length	0.834	0.527	0.307	—	0.078	0.142	0.087
		壳宽 shell width	0.394	0.231	0.162	0.177	—	−0.050	0.035
		壳高 shell height	0.574	0.221	0.322	0.338	−0.052	—	0.036
		绞合线宽 hinge width	0.553	0.188	0.364	0.243	0.043	0.078	—
	雄性群体 male group	壳长 shell length	0.847	0.752	0.094	—			0.094
		绞合线宽 hinge width	0.564	0.190	0.374	0.374			—
	雌性群体 female group	壳长 shell length	0.817	0.343	0.475	—	0.175	0.243	0.057
		壳宽 shell width	0.733	0.286	0.448	0.210	—	0.171	0.067
		壳高 shell height	0.820	0.269	0.552	0.310	0.182	—	0.060
		绞合线宽 hinge width	0.548	0.131	0.417	0.148	0.147	0.122	—

注: —表示无间接作用; 空白表示性状间的间接作用无统计意义。
Note: — indicates no indirect effect. Blank indicates no statistical significance.

表 6 栉孔扇贝浅红群体软体重通径分析结果

Tab. 6 Path analysis results of tissue weight of *Chlamys farreri* with light red shell color

重量性状 weight trait	群体类型 group type	形态性状 morphological trait	总影响 total effect	直接影响 direct effect	间接影响 indirect effect			
					合计 total	壳长 shell length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
软体重 tissue weight	整体 entirety	壳长 shell length	0.849	0.677	0.172	—	0.172	
		绞合线长 hinge length	0.770	0.207	0.563	0.563	—	
	雄性群体 male group	壳长 shell length	0.856	0.664	0.192	—	0.192	
		绞合线长 hinge length	0.794	0.224	0.570	0.570	—	
	雌性群体 female group	壳长 shell length	0.861	0.770	0.091	—		0.091
		绞合线宽 hinge width	0.604	0.158	0.446	0.446		—

注: —表示无间接作用; 空白表示性状间的间接作用无统计意义。
Note: — indicates no indirect effect. Blank indicates no statistical significance.

对棕黄群体整体、雄性群体和雌性群体软体重直接影响最大的形态性状均为壳长(表7), 整体是壳高通过壳长对软体重间接影响最大, 雌性群体是绞合线长通过壳长对软体重间接影响最大。

表 7 栉孔扇贝棕黄群体软体重通径分析结果

Tab. 7 Path analysis results of tissue weight of *Chlamys farreri* with pale brown shell color

重量性状 weight trait	群体类型 group type	形态性状 morphological trait	总影响 total effect	直接影响 direct effect	间接影响 indirect effect					
					合计 total	壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
软体重 tissue weight	整体 entirety	壳长 shell length	0.808	0.566	0.242	—	0.072	0.117		0.053
		壳宽 shell width	0.386	0.215	0.170	0.190	—	−0.041		0.021
		壳高 shell height	0.538	0.182	0.356	0.363	−0.048	—		0.041
		绞合线宽 hinge width	0.481	0.116	0.366	0.261	0.040	0.065		—
	雄性群体 male group	壳长 shell length	0.793	0.793	0	—				
	雌性群体 female group	壳长 shell length	0.815	0.688	0.127	—	0.224		−0.097	
		壳宽 shell width	0.707	0.366	0.340	0.420	—		−0.080	
		绞合线长 hinge length	0.511	−0.146	0.657	0.456	0.201		—	

注: —表示无间接作用; 空白表示性状间的间接作用无统计意义。
Note: — indicates no indirect effect. Blank indicates no statistical significance.

2.3.3 形态性状对闭壳肌重的通径分析 浅红群体按照整体、雄性群体和雌性群体中形态性状对闭壳肌重通径分析结果见表 8, 对闭壳肌重有直接影响的形态性状均为壳长。

棕黄群体整体、棕黄雄性群体对闭壳肌重直接影响最大的形态性状均为壳长(表 9), 雌性群体

是壳宽对闭壳肌重直接影响最大, 壳高通过壳宽对闭壳肌重间接影响最大。

2.4 形态性状对重量性状的决定程度

栉孔扇贝浅红群体和棕黄群体显著影响重量性状的形态性状对湿重、软体重、闭壳肌重的决定程度分别见表 10、表 11。

表 8 栉孔扇贝浅红群体闭壳肌重通径分析结果
Tab. 8 Path analysis results of adductor weight of *Chlamys farreri* with light red shell color

重量性状 weight trait	群体类型 group type	形态性状 morphological trait	总影响 total effect	直接影响 direct effect	间接影响 indirect effect			
					合计 total	壳长 shell length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
闭壳肌重 adductor weight	整体 entirety	壳长 shell length	0.726	0.726	0	—		
	雄性群体 male group	壳长 shell length	0.751	0.751	0	—		
	雌性群体 female group	壳长 shell length	0.717	0.717	0	—		

注: —表示无间接作用; 空白表示性状间的间接作用无统计意义。
Note: — indicates no indirect effect. Blank indicates no statistical significance.

表 9 栉孔扇贝棕黄群体闭壳肌重通径分析结果
Tab. 9 Path analysis results of adductor weight of *Chlamys farreri* with pale brown shell color

重量性状 weight trait	群体类型 group type	形态性状 morphological trait	总影响 total effect	直接影响 direct effect	间接影响 indirect effect			
					合计 total	壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height
闭壳肌重 adductor weight	整体 entirety	壳长 shell length	0.534	0.534	0	—		
	雄性群体 male group	壳长 shell length	0.488	0.488	0	—		
	雌性群体 female group	壳宽 shell width	0.690	0.425	0.266		—	0.266
		壳高 shell height	0.688	0.419	0.270		0.270	—

注: —表示无间接作用; 空白表示性状间的间接作用无统计意义。
Note: —indicates no indirect effect. Blank indicates no statistical significance.

表 10 栉孔扇贝浅红群体决定系数
Tab. 10 The determination coefficient of *Chlamys farreri* with light red shell color

群体类型 group type	重量性状 weight trait	形态性状 morphological trait	决定系数 determination coefficient		
			壳长 shell length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
整体 entirety	湿重 wet weight	壳长 shell length	0.362	0.248	0.079
		绞合线长 hinge length		0.062	0.038
		绞合线宽 hinge width			0.012
	软体重 tissue weight	壳长 shell length	0.458	0.233	—
		绞合线长 hinge length		0.043	—
	闭壳肌重 adductor weight	壳长 shell length	0.527	—	—
雄性群体 male group	湿重 wet weight	壳长 shell length	0.416	0.309	—
		绞合线长 hinge length		0.078	—
		壳长 shell length	0.441	0.255	—
	软体重 tissue weight	绞合线长 hinge length		0.050	—
		壳长 shell length	0.564	—	—
	闭壳肌重 adductor weight	壳长 shell length			

(待续 to be continued)

(续表 10 Tab. 10 continued)

群体类型 group type	重量性状 weight trait	形态性状 morphological trait	决定系数 determination coefficient		
			壳长 shell length	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
雌性群体 female group	湿重 wet weight	壳长 shell length	0.336	0.252	0.087
		绞合线长 hinge length		0.071	0.043
		绞合线宽 hinge width			0.017
	软体重 tissue weight	壳长 shell length	0.593	—	0.141
		绞合线宽 hinge width		—	0.025
	闭壳肌重 adductor weight	壳长 shell length	0.514	—	—

注: 粗体数据是单一自变量对因变量的决定系数, 其他数据是两个自变量对因变量的共同决定系数. —表示共同决定系数无统计意义.
Note: The determination coefficient of a single independent variable is described in bold, and other data are the common determination coefficient of two independent variables. — indicates no statistical significance.

表 11 栉孔扇贝棕黄群体决定系数
Tab. 11 The determination coefficient of *Chlamys farreri* with pale brown shell color

群体类型 group type	重量性状 weight trait	形态性状 morphological trait	决定系数 determination coefficient				
			壳长 shell length	壳宽 shell width	壳高 shell height	绞合线长 hinge length	绞合线宽 hinge width
整体 entirety	湿重 wet weight	壳长 shell length	0.278	0.082	0.150	—	0.091
		壳宽 shell width		0.053	−0.023	—	0.016
		壳高 shell height			0.049	—	0.029
		绞合线宽 hinge width				—	0.035
	软体重 tissue weight	壳长 shell length	0.320	0.082	0.132	—	0.061
		壳宽 shell width		0.046	−0.018	—	0.009
		壳高 shell height		—	0.033	—	0.015
		绞合线宽 hinge width		—	—	—	0.013
	闭壳肌重 adductor weight	壳长 shell length	0.285	—	—	—	—
雄性群体 male group	湿重 wet weight	壳长 shell length	0.566	—	—	—	0.142
		绞合线宽 hinge width		—	—	—	0.036
	软体重 tissue weight	壳长 shell length	0.629	—	—	—	—
	闭壳肌重 adductor weight	壳长 shell length	0.238	—	—	—	—
雌性群体 female group	湿重 wet weight	壳长 shell length	0.118	0.120	0.167	—	0.039
		壳宽 shell width		0.082	0.098	—	0.038
		壳高 shell height			0.072	—	0.032
		绞合线宽 hinge width				—	0.017
	软体重 tissue weight	壳长 shell length	0.473	0.308		−0.133	—
		壳宽 shell width		0.134		−0.059	—
		绞合线长 hinge length				0.021	—
	闭壳肌重 adductor weight	壳宽 shell width	—	0.181	0.226	—	—
		壳高 shell height	—		0.176	—	—

注: 粗体数据是单一自变量对因变量的决定系数, 其他数据是两个自变量对因变量的共同决定系数. —表示共同决定系数无统计意义.
Note: The determination coefficient of a single independent variable is described in bold, and other data are the common determination coefficient of two independent variables. — indicates no statistical significance.

2.4.1 形态性状对湿重的决定系数 浅红群体和棕黄群体对湿重决定系数最大的形态性状均为壳长。浅红群体对湿重共同决定系数最大的形态性状均为壳长与绞合线长,棕黄群体整体和雌性群体对湿重共同决定系数最大的形态性状均为壳长与壳高,而棕黄雄性群体对湿重共同决定系数最大的形态性状是壳长与绞合线宽。

2.4.2 形态性状对软体重的决定系数 浅红群体和棕黄群体对软体重决定系数最大的形态性状均为壳长。浅红群体整体和雄性群体对软体重共同决定系数最大的形态性状均为壳长与绞合线长,雌性群体对软体重共同决定系数最大的形态性状是壳长与绞合线宽。棕黄群体整体对软体重共同决定系数最大的形态性状是壳长与壳高,雌性群体对软体重共同决定系数最大的形态性状是壳长与壳宽。

2.4.3 形态性状对闭壳肌重的决定系数 浅红群体对闭壳肌重决定系数最大的形态性状均为壳

长。棕黄群体整体和雄性群体对闭壳肌重决定系数最大的形态性状也为壳长,但雌性群体对闭壳肌重决定系数最大的形态性状均为壳宽,雌性群体对闭壳肌重共同决定系数最大的形态性状是壳宽与壳高。

2.5 多元回归方程的建立

以栉孔扇贝湿重、软体重和闭壳肌重 3 个重量性状为因变量,壳长、壳宽、壳高、前耳长、绞合线长和绞合线宽 6 个形态性状为自变量,对不同壳色、性别群体进行多元线性回归分析,剔除偏回归系数不显著的形态性状,筛选得到显著相关的形态性状为自变量、重量性状为因变量建立回归方程(表 12)。

回归方程进行方差分析,结果如表 13 所示,各回归方程的回归关系均达到了极显著水平($P<0.01$),说明上述方程可以客观地反映栉孔扇贝形态性状和重量性状的关系。

表 12 不同栉孔扇贝群体相关回归方程
Tab. 12 The correlation regression equation of different *Chlamys farreri* groups

群体类型 group type	重量性状 weight trait	显著相关性状 significantly related trait	回归方程 regression equation
浅红群体 group with light red shell color	湿重 wet weight, Y	壳长 shell length, X_1	$Y=0.889X_1+0.55X_5+1.354X_6-47.287$ ($R^2=0.801$)
		绞合线长 hinge length, X_5	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	软体重 tissue weight, Z	壳长 shell length, X_1	$Z=0.557X_1+0.255X_5-25.970$ ($R^2=0.734$)
		绞合线长 hinge length, X_5	
	闭壳肌重 adductor weight, W	壳长 shell length, X_1	$W=0.181X_1-6.308$ ($R^2=0.526$)
浅红雄性群体 male group with light red shell color	湿重 wet weight, Y	壳长 shell length, X_1	$Y=0.986X_1+0.585X_5-48.622$ ($R^2=0.803$)
		绞合线长 hinge length, X_5	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	软体重 tissue weight, Z	壳长 shell length, X_1	$Z=0.587X_1+0.272X_5-28.966$ ($R^2=0.746$)
		绞合线长 hinge length, X_5	
	闭壳肌重 adductor weight, W	壳长 shell length, X_1	$W=0.217X_1-8.528$ ($R^2=0.564$)
浅红雌性群体 female group with light red shell color	湿重 wet weight, Y	壳长 shell length, X_1	$Y=0.831X_1+0.628X_5+1.728X_6-47.735$ ($R^2=0.811$)
		绞合线长 hinge length, X_5	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	软体重 tissue weight, Z	壳长 shell length, X_1	$Z=0.587X_1+1.121X_6-23.158$ ($R^2=0.758$)
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	闭壳肌重 adductor weight, W	壳长 shell length, X_1	$W=0.153X_1-4.523$ ($R^2=0.514$)

(待续 to be continued)

(续表 12 Tab. 12 continued)			
群体类型 group type	重量性状 weight trait	显著相关性状 significant related trait	回归方程 regression equation
棕黄群体 group with pale brown shell color	湿重 wet weight, Y	壳长 shell length, X_1	$Y=0.815X_1+0.446X_2+0.247X_3+2.257X_6-51.622$ ($R^2=0.762$)
		壳宽 shell width, X_2	
		壳高 shell height, X_3	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	软体重 tissue weight, Z	壳长 shell length, X_1	$Z=0.500X_1+0.237X_2+0.116X_3+0.791X_6-29.288$ ($R^2=0.694$)
		壳宽 shell width X_2	
		壳高 shell height, X_3	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	闭壳肌重 adductor weight, W	壳长 shell length, X_1	$W=0.117X_1-6.200$ ($R^2=0.285$)
	湿重 wet weight, Y	壳长 shell length, X_1	$Y=1.199X_1+2.134X_6-48.905$ ($R^2=0.745$)
		绞合线宽 hinge width, X_6	
		壳长 shell length, X_1	
		壳宽 shell width X_2	
棕黄雄性群体 male group with pale brown shell color	软体重 tissue weight, Z	壳长 shell length, X_1	$Z=0.696X_1-24.967$ ($R^2=0.629$)
		壳宽 shell width X_2	
		壳高 shell height, X_3	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	闭壳肌重 adductor weight, W	壳长 shell length, X_1	$W=0.177X_1-6.159$ ($R^2=0.238$)
		壳宽 shell width, X_2	
		壳高 shell height, X_3	
		绞合线长 hinge length, X_5	
	湿重 wet weight, Y	壳长 shell length, X_1	$Y=0.516X_1+1.118X_2+0.399X_3+1.666X_6-54.312$ ($R^2=0.782$)
		壳宽 shell width, X_2	
		壳高 shell height, X_3	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
棕黄雌性群体 female group with pale brown shell color	软体重 tissue weight, Z	壳长 shell length, X_1	$Z=0.609X_1+0.841X_2-0.191X_5-29.475$ ($R^2=0.745$)
		壳宽 shell width, X_2	
		壳高 shell height, X_3	
		绞合线长 hinge length, X_5	
	闭壳肌重 adductor weight, W	壳宽 shell width, X_2	$W=0.258X_2+0.097X_3-7.05$ ($R^2=0.582$)
		壳高 shell height, X_3	
		壳长 shell length, X_1	
		绞合线宽 hinge width, X_6	
	湿重 wet weight, Y	壳长 shell length, X_1	$Y=0.516X_1+1.118X_2+0.399X_3+1.666X_6-54.312$ ($R^2=0.782$)
		壳宽 shell width, X_2	
		壳高 shell height, X_3	
		绞合线宽 hinge width, X_6	

表 13 形态性状与重量性状间多元回归方程的方差分析
Tab. 13 ANOVA analysis on multiple regression equations between morphological traits and qualitative traits

群体类型 group type	因变量 dependent variable	方差来源 source of variance	平方和 sum of squares	自由度 degree freedom	均方 mean square	F	P
浅红群体 group with light red shell color	湿重 wet weight	回归 regression	8821.342	3	2940.447	263.210	0.000
		残差 residual	2189.608	196	11.171		
		总计 total	11010.950	199			
	软体重 tissue weight	回归 regression	2507.330	2	1253.665	271.944	0.000
		残差 residual	908.171	197	4.610		
		总计 total	3415.501	199			
	闭壳肌重 adductor weight	回归 regression	165.717	1	165.717	220.045	0.000
		残差 residual	149.115	198	0.753		
		总计 total	314.832	199			
浅红雄性群体 male group with light red shell color	湿重 wet weight	回归 regression	4270.921	2	2135.460	195.789	0.000
		残差 residual	1047.068	96	10.907		
		总计 total	5317.989	98			

(待续 to be continued)

(续表 13 Tab. 13 continued)

群体类型 group type	因变量 dependent variable	方差来源 source of variance	平方和 sum of squares	自由度 degree freedom	均方 mean square	F	P
浅红雄性群体 male group with light red shell color	软体重 tissue weight	回归 regression	1329.971	2	664.985	141.255	0.000
		残差 residual	451.937	96	4.708		
		总计 total	1781.908	98			
	闭壳肌重 adductor weight	回归 regression	106.876	1	106.876	125.504	0.000
		残差 residual	82.602	97	0.852		
		总计 total	189.478	98			
浅红雌性群体 female group with light red shell color	湿重 wet weight	回归 regression	4597.366	3	1532.455	138.691	0.000
		残差 residual	1071.795	97	11.049		
		总计 total	5669.161	100			
	软体重 tissue weight	回归 regression	1218.494	2	609.247	153.592	0.000
		残差 residual	388.733	98	3.967		
		总计 total	1607.227	100			
	闭壳肌重 adductor weight	回归 regression	64.383	1	64.383	104.600	.000
		残差 residual	60.936	99	0.616		
		总计 total	125.319	100			
棕黄群体 group with pale brown shell color	湿重 wet weight	回归 regression	8163.655	4	2040.914	155.735	0.000
		残差 residual	2555.480	195	13.105		
		总计 total	10719.135	199			
	软体重 tissue weight	回归 regression	2427.851	4	606.963	110.310	.000
		残差 residual	1072.953	195	5.502		
		总计 total	3500.804	199			
	闭壳肌重 adductor weight	回归 regression	140.668	1	140.668	78.926	0.000
		残差 residual	352.890	198	1.782		
		总计 total	493.558	199			
棕黄雄性群体 male group with pale brown shell color	湿重 wet weight	回归 regression	3903.640	2	1951.820	141.402	0.000
		残差 residual	1338.922	97	13.803		
		总计 total	5242.562	99			
	软体重 tissue weight	回归 regression	999.982	1	999.982	166.147	0.000
		残差 residual	589.828	98	6.019		
		总计 total	1589.810	99			
	闭壳肌重 adductor weight	回归 regression	64.636	1	64.636	30.687	0.000
		残差 residual	206.415	98	2.106		
		总计 total	271.051	99			
棕黄雌性群体 female group with pale brown shell color	湿重 wet weight	回归 regression	4180.079	4	1045.020	85.265	0.000
		残差 residual	1164.333	95	12.256		
		总计 total	5344.411	99			
	软体重 tissue weight	回归 regression	1375.774	3	458.591	93.475	0.000
		残差 residual	470.979	96	4.906		
		总计 total	1846.753	99			
	闭壳肌重 adductor weight	回归 regression	74.300	2	37.150	66.853	0.000
		残差 residual	53.347	96	0.556		
		总计 total	127.647	98			

3 讨论

3.1 性状变异系数分析

在贝类选育过程中, 通常利用变异系数衡量生长性状的变异程度, 变异系数大的性状具有较高的遗传选育潜力, 可以作为贝类选育的目标性状, 如合浦珠母贝^[24]、长牡蛎^[25]等贝类选育潜力与性状变异系数成正比。本研究中栉孔扇贝的9个性状中, 变异系数较大的性状是壳宽、湿重、软体重和闭壳肌重。其中闭壳肌重变异系数最大, 选育潜力最优。而闭壳肌重作为选育目标性状时, 可通过间接选择形态性状来实现^[18]。

3.2 栉孔扇贝重量性状相关性分析

水产动物的重量性状与其生产养殖经济效益直接相关, 形态性状较为直观、易测, 且与重量性状间存在一定关系, 选育目标为重量性状时可通过选择某些形态性状间接达到选育目的^[26-29]。本研究相关性分析结果表明, 除棕黄雄性群体壳宽与闭壳肌重无显著性相关外($P>0.05$), 两种壳色栉孔扇贝壳长、壳宽、壳高、前耳长、绞合线长、绞合线宽6个形态性状与重量性状均呈显著正相关($P<0.05$), 说明栉孔扇贝重量变化与其形态性状之间有较强的联系, 这与杜美荣等^[16]对栉孔扇贝湿重显著相关的形态性状的研究结果一致; 此外, 各形态性状之间具有显著相关性($P<0.05$), 表明栉孔扇贝重量性状与形态性状之间存在多重共线联系。较强的相关性造成了信息重叠, 与青蛤相似^[30], 仅通过相关性分析很难确定影响重量性状的主要形态性状, 还需要进一步分析形态性状对重量性状的直接影响和间接影响。

3.3 栉孔扇贝重量性状通径分析

科学研究中通常采用相关分析方法研究相关变量间的线性关系, 而通径分析和回归分析可研究多个自变量和因变量之间的多重共线关系, 具有精确、直观的优点, 在遗传育种学分析变量间的相关关系中应用广泛^[27,31]。通过通径分析剔除那些与重量性状相关性不显著的形态性状, 进而分析保留下的显著相关的形态性状, 能如实反映各性状间的本质联系^[32]。本研究对不同壳色栉孔扇贝雌雄群体湿重、软体重、闭壳肌重的通径分

析结果与决定系数结果一致。栉孔扇贝浅红和棕黄群体(浅红群体整体、浅红雄性群体、浅红雌性群体、棕黄群体整体、棕黄雄性群体、棕黄雌性群体)对湿重、软体重直接影响程度最大的形态性状均为壳长, 这与18月龄岩扇贝(*Crassadoma gigantean*)^[33]、南澳青蛤^[7]、魁蚶^[8-9]等贝类以及已报道的栉孔扇贝^[2,16]研究结果一致, 说明壳长对于贝类湿重影响很大。在不同壳色文蛤^[23]、合浦珠母贝^[24]的研究中发现, 直接影响文蛤和合浦珠母贝体重的主要形态性状在不同壳色间存在差异, 壳长是决定红色文蛤活体重的主要因素, 对传统壳色和白壳色合浦珠母贝体重的直接影响最大, 而其他壳色对体重直接影响最大的是壳高或壳宽。本研究中两种壳色栉孔扇贝对体重直接影响的形态性状没有差异。由于在长岛采集的栉孔扇贝以浅红和棕黄壳色为主, 采集的橘红、浅紫等壳色的个体数量较少, 没有进行通径分析, 因此其他壳色栉孔扇贝与湿重显著相关的形态性状是否均为壳长有待于进一步研究。

本研究选择浅红和棕黄两种壳色栉孔扇贝群体, 分别按照雌雄群体对湿重、软体重进行通径分析, 结果表明直接影响程度最大的形态性状均为壳长, 不同性别间没有差异, 这与香港巨牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)^[34]、中国蛤蜊(*Mactra chinensis*)^[35]雌雄群体研究结果相似。王冲^[15]比较了大连海域不同性别栉孔扇贝群体重要经济性状并进行了通径分析, 结果表明对软体重直接影响程度最大的形态性状在性别间没有差异, 但对湿重直接影响程度最大的形态性状在性别间存在差异, 与本研究结果的差异可能跟不同海域栉孔扇贝遗传背景不同有关^[2]。

闭壳肌重是栉孔扇贝重要的经济性状, 本研究中作用显著的形态性状对浅红群体闭壳肌重的直接影响显著高于棕黄群体, 在合浦珠母贝中不同壳色选育系的闭壳肌重具有显著性差异^[36], 表明以闭壳肌重为目标性状进行选育时, 壳色可以作为重要的参考性状。本研究对闭壳肌重的通径分析结果表明, 浅红群体中对闭壳肌重直接影响程度最大的形态性状均为壳长, 这与已有栉孔扇贝^[18]的研究结果一致。棕黄群体中对闭壳肌重显著作

用的形态性状存在雌雄差异。按群体整体分析直接影响程度最大的形态性状为壳长;按照雌雄群体分析,雌性群体中对闭壳肌重直接影响程度最大的形态性状为壳宽,这与华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis reeve*)^[10]研究结果相似;而雄性群体壳宽与闭壳肌重相关性不显著,对闭壳肌重直接影响程度最大的形态性状为壳长,与群体整体分析结果一致。

3.4 多元回归分析

本研究对不同壳色、性别群体进行多元线性回归分析,剔除偏回归系数不显著的形态性状,筛选得到显著相关的形态性状与通径分析的结果一致,表明不同壳色、性别群体中决定重量性状的形态性状不同,对不同群体的回归方程进行方差分析,其回归关系均达到了极显著水平($P<0.01$),说明所选形态性状与重量性状间存在显著线性关系。本研究中各群体回归方程 R^2 值未能达到刘小林等^[14]确定的标准,这可能与本研究样本量有关,也可能存在研究中未涉及的其他影响因素。扇贝软体重存在季节性变化,软体重在夏末或初秋产卵后显著下降^[37],在不同水深生长的扇贝,因饵料摄取量不同,其湿重也可能不同^[38]。各群体闭壳肌重的线性回归方程的 R^2 值,均低于湿重和软体重的线性回归方程的 R^2 值,华贵栉孔扇贝^[10]和墨西哥湾扇贝^[13]中的研究表明,对闭壳肌重影响最大的均为体重或软体重等重量性状,其次是壳宽或壳长等形态性状,由于本研究重点研究与重量性状相关的形态性状,没有将湿重和软体重作为自变量,可能是 R^2 值偏低的主要原因。棕黄群体整体、棕黄雄性群体中作用显著的形态性状对闭壳肌重的直接影响程度显著低于浅红群体,因此其闭壳肌重线性回归方程 R^2 值低于浅红群体的 R^2 值,仅为 0.285、0.238。闭壳肌重作为软体重或湿重的一部分,可能受其他重量性状的影响比受形态性状的影响更大,在以闭壳肌重为选育目标时,需要关注湿重和软体重等重量性状。下一步可以通过分析不同季节或生长环境下栉孔扇贝形态性状与重量性状以及重量性状之间的关系,增加壳色种类和样本数量进一步验证。

参考文献:

- [1] Chang Y Q. Shellfish Aquaculture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007. [常亚青. 贝类增殖学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.]
- [2] Du M R, Fang J G, Bao Z M, et al. Correlation and path coefficient analysis for *chlamys farreri* cultured in different sea areas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(5): 963-970. [杜美荣, 方建光, 包振民, 等. 不同养殖海域栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)混合家系的通径分析[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(5): 963-970.]
- [3] Wright S. Evolution and the genetics of populations, volume 3: experimental results and evolutionary deductions[D]. Chicago: University of Chicago Press, 1977.
- [4] Seyoum M, Alamerew S, Bantte K. Genetic variability, heritability, correlation coefficient and path analysis for yield and yield related traits in upland rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Plant Sciences, 2011, 7(1): 13-22.
- [5] Akatwijuka R, Rubaihayo P R, Odong T L. Correlations and path analysis of yield traits in sorghum grown in southwestern highlands of Uganda[J]. African Crop Science Journal, 2019, 27(3): 437.
- [6] Rafiul M, Khan A, Mahmud F, et al. Genetic diversity, correlation and path analysis for yield and yield components of pea (*Pisum sativum* L.)[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2017, 13(1): 11-16.
- [7] Yang Y H, Li Z X, Zheng H P, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits for natural population of *Cyclina sinensis* in Nan'ao Island[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(5): 550-553. [杨彦鸿, 李朝霞, 郑怀平, 等. 南澳青蛤(*Cyclina sinensis*)野生群体数量性状间的相关及通径分析[J]. 海洋通报, 2010, 29(5): 550-553.]
- [8] Wu B, Yang A G, Liu Z H, et al. The relationship between morphometric traits and body weight of *Scapharca broughtonii* in two different populations[J]. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31(6): 54-59. [吴彪, 杨爱国, 刘志鸿, 等. 魁蚶两个不同群体形态性状对体质量的影响效果分析[J]. 渔业科学进展, 2010, 31(6): 54-59.]
- [9] Xin B L, Wu B, Zhou L Q, et al. Characters of main measurable traits of *Scapharca broughtonii* in 4 different geographical populations[J]. Marine Fisheries, 2021, 43(6): 652-660. [信炳龙, 吴彪, 周丽青, 等. 4个不同地理群体魁蚶主要可量性状特征分析[J]. 海洋渔业, 2021, 43(6): 652-660.]
- [10] Liu Z G, Zhang Q Z, Wang H. Effects of main economic traits on adductor weight of *Chlamys nobilis* (Reeve)[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(1): 61-66. [刘志刚, 章启忠, 王辉. 华贵栉孔扇贝主要经济性状对闭壳肌

- 重的影响效果分析[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(1): 61-66.]
- [11] Zhang G F, Zhang W F, Fang A P, et al. Path analysis of quantitative traits of shellfish *Solenia oleivora* population in Ganjiang River[J]. Fisheries Science, 2020, 39(2): 271-276. [张根芳, 张文府, 方爱萍, 等. 橄榄蛸蚌赣江群体数量性状的通径分析[J]. 水产科学, 2020, 39(2): 271-276.]
- [12] Deng Z H, Chen M Q, Li Y N, et al. Correlation and path analysis of morphological traits to wet weight and shell weight of wild *Pinctada maxima*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, 49(12): 2545-2550. [邓正华, 陈明强, 李有宁, 等. 野生大珠母贝形态性状对湿重和壳重的相关性及通径分析[J]. 南方农业学报, 2018, 49(12): 2545-2550.]
- [13] Yang S P, Liu H L, Lao Z, et al. Effects of main economic traits on adductor weight of *Argopecten irradians concentricus* Say[J]. Fishery Modernization, 2013, 40(3): 41-45. [杨世平, 刘慧玲, 劳赞, 等. 墨西哥湾扇贝经济性状对闭壳肌重决定效应分析[J]. 渔业现代化, 2013, 40(3): 41-45.]
- [14] Liu X L, Chang Y Q, Xiang J H, et al. Analysis of effects of shell size characters on live weight in Chinese scallop *Chlamys farreri*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(6): 673-678. [刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 栉孔扇贝壳尺寸性状对活体重的影响效果分析[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 673-678.]
- [15] Wang C. Comparison and path analysis of important economic traits between genders of scallop *Chlamys farreri*[J]. Fisheries Science, 2013, 32(8): 441-446. [王冲. 栉孔扇贝不同性别间重要经济性状比较及通径分析[J]. 水产科学, 2013, 32(8): 441-446.]
- [16] 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.]
- [17] Shu Y, Shi L, Lai S Q, et al. Morphometric study and comparison of scallops (*Chlamys farreri*) cultured in different water depth[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(1): 132-139. [舒予, 史令, 赖思琦, 等. 不同水深养殖栉孔扇贝的形态测量学研究和比较[J]. 水生生物学报, 2021, 45(1): 132-139.]
- [18] Wu B, Yang A G, Zhou L Q, et al. The relationship between morphometric characters and weight characters in two different kind of scallop[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(5): 81-84. [吴彪, 杨爱国, 周丽青, 等. 两种扇贝形态性状对体重和肉柱重的影响效果分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(5): 81-84.]
- [19] Han Z Q, Li Q, Liu S K, et al. Crossbreeding of three different shell color lines in the Pacific oyster reveals high heterosis for survival but low heterosis for growth[J]. Aquaculture, 2020, 529: 735621.
- [20] Sun Z H, Liu Z G, Ou Y Y, et al. AFLP analysis of genetic diversity of four shell Color strains(F_1) of *Chlamys nobilis*[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 37-42. [孙宗红, 刘志刚, 欧燕燕, 等. 华贵栉孔扇贝四种壳色选育系 F_1 遗传多样性的AFLP分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 37-42.]
- [21] Song J L, Li Q, Kong L F. A quantitative analysis of four shell color strains of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(1): 25-30. [宋俊霖, 李琪, 孔令锋. 长牡蛎四种壳色选育系壳色性状的量化分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 25-30.]
- [22] Zhao P, Ding J, Chang Y Q. Effect of shell size characters on live body weight in Japanese scallop *Mizuhopecten yessoensis* with two colors[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2011, 26(1): 1-5. [赵鹏, 丁君, 常亚青. 两种壳色虾夷扇贝壳体尺性状对活体重影响效果的分析[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(1): 1-5.]
- [23] 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质量的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2017, 32(3): 310-315.]
- [24] Wang Y Z, Deng Z H, Wang Y, et al. Correlation and path analyses of quantitative traits in different shell color F_6 lines of pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(5): 988-997. [王祎哲, 邓正华, 王雨, 等. 合浦珠母贝不同壳色选育系 F_6 数量性状的相关性和通径分析[J]. 中国水产科学, 2018, 25(5): 988-997.]
- [25] 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质量的相关及通径分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(12): 46-52.]
- [26] 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.]
- [27] He J B, Ji X, Xu X Y, et al. Phenotypic traits predicting body mass in three-month old *Rapana venosa*[J]. Marine Sciences,

- 2021, 45(11): 118-124. [贺加贝, 纪翔, 徐晓莹, 等. 3 月龄脉红螺表型性状对体质量影响效应分析[J]. 海洋科学, 2021, 45(11): 118-124.]
- [28] Jiang X, Xu L L, Yang C G, et al. Correlation and path coefficient analysis on body weight and morphometric traits of *Sepiella japonica*[J]. Journal of Aquaculture, 2021, 42(2): 1-6. [蒋湘, 许乐乐, 杨长庚, 等. 日本乌贼(*Sepiella japonica*)形态性状与体质量的相关性及通径分析[J]. 水产养殖, 2021, 42(2): 1-6.]
- [29] Yang S P, Liu H L, Jiang B J, et al. Effects of morphometric traits on body weight of *Macrobrachium rosenbergii* with different clamp colors[J]. Journal of Tropical Biology, 2014, 5(3): 208-219. [杨世平, 刘慧玲, 江博杰, 等. 不同鳌色罗氏沼虾形态性状对体质量的影响[J]. 热带生物学报, 2014, 5(3): 208-219.]
- [30] Dong Z G, Li X Y, Cheng H L, et al. Correlation analysis of gender and morphology of *Cyclina sinensis* in the reproductive season[J]. Marine Sciences, 2011, 35(8): 32-36. [董志国, 李晓英, 程汉良, 等. 生殖季节青蛤性别与形态相关性分析[J]. 海洋科学, 2011, 35(8): 32-36.]
- [31] Zou J, Peng H J, Zhang S D, et al. Effects of shell phenotypic traits on body weight of clam *Lutraria sieboldii*[J]. Fisheries Science, 2020, 39(4): 573-578. [邹杰, 彭慧婧, 张守都, 等. 施氏獭蛤壳体表型性状对体质量的影响分析[J]. 水产科学, 2020, 39(4): 573-578.]
- [32] Sheng Z L, Wu C X. Quantitative Genetics[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995:18. [盛志廉, 吴常信. 数量遗传学[M].北京: 中国农业出版社, 1995:18.]
- [33] Wang X, Cao S M, Yin M H, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of *Crassadoma gigantean* at different ages[J]. Hebei Fisheries, 2018(2): 23-28, 38. [王潇, 曹善茂, 印明昊, 等. 不同贝龄岩扇贝数量性状的相关性及通径分析[J]. 河北渔业, 2018(2): 23-28, 38.]
- [34] 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.]
- [35] Xiao L Y, Ma G F, Guo W X, et al. Correlation and path analysis to quantitative traits of *Macra chinensis* in different sexes[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(29): 115-119. [肖露阳, 马贵范, 郭文学, 等. 不同性别中国蛤蜊数量性状的相关与通径分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(29): 115-119.]
- [36] Wei H J, Deng Z H, Chen M Q, et al. Evaluation of production performance of *Pinctada fucata* with different shell colors and its differences between male and female[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(2): 412-420. [魏海军, 邓正华, 陈明强, 等. 不同壳色合浦珠母贝生产性能评估及其雌雄群体间的差异[J]. 南方农业学报, 2020, 51(2): 412-420.]
- [37] Hennen D R, Hart D R. Shell height-to-weight relationships for Atlantic Sea scallops (*Placopecten magellanicus*) in offshore U.S. waters[J]. Journal of Shellfish Research, 2012, 31(4): 1133-1144.
- [38] Sarro C L, Stokesbury K D E. Spatial and temporal variation in the shell height/meat weight relationship of the Sea Scallop *Placopecten magellanicus* in the georges bank fishery[J]. Journal of Shellfish Research, 2009, 28(3): 497-503.

Correlation and path analysis of traits of male and female *Chlamys farreri* with different shell colors

ZHAO Chunnuan^{1,2}, YU Tao^{1,2}, ZHENG Yanxin^{1,2}, LI Bo^{1,2}, WANG Xiwen^{1,2}, CAI Zhongqiang^{1,2}, WANG Xiaomei^{1,2}, REN Liqun^{1,2}, XU Shuai^{1,2}, WU Yuping^{1,2}, WU Nan^{1,2}, ZHANG Mingyi^{1,2}

1. Changdao Enhancement and Experiment Station, Chinese Academy of Fishery Sciences, Yantai 265800, China;
2. Engineering Technology Research Center of Shellfish and Algae Breeding, Chinese Academy of Fishery Sciences, Yantai 265800, China

Abstract: *Chlamys farreri* is the primary, economically important shellfish in northern China. When researching high-quality artificial breeding *C. farreri*, selecting parents with excellent traits is particularly important due to the influence of germplasm. To optimize the selection strategy of parent scallops in artificial breeding, we collected

male and female *C. farreri* with different shell colors from the Changdao sea area and analyzed the relationship between morphological and weight traits. The morphological traits were measured with a vernier caliper and included shell length (X_1), shell width (X_2), shell height (X_3), anterior ear length (X_4), hinge length (X_5), and hinge width (X_6). The weight traits were measured using an electronic balance and included wet weight (Y), tissue weight (Z), and adductor weight (W). Weight and morphological traits of male and female *C. farreri* with two shell colors were correlated using correlation analysis and path analysis. The morphological traits that were significantly correlated with weight traits were identified for each group. Regression equations were established between morphological traits and weight traits for *C. farreri*. The results showed that the coefficient of variation of adductor weight was the largest (0.30). There was no significant correlation between shell width and adductor weight in the male population with pale brown shell color, while there were significant correlations between 6 morphological traits and 3 weight traits in other groups ($P < 0.05$). In the groups with light red and pale brown shell colors, shell length had the largest direct effect on wet weight and tissue weight. In the group of all scallops with light red shell color, the male group with light red shell color, the female group light red shell color, the group of all scallops with pale brown shell color, the male group with pale brown shell color, and the female group pale brown shell color, the path coefficients of shell length on wet weight were 0.602, 0.645, 0.580, 0.527, 0.752, and 0.343, respectively. The path coefficients of shell length on tissue weight were 0.677, 0.664, 0.770, 0.566, 0.793, and 0.688, for the same groups, respectively. The morphological trait that had the largest direct effect on adductor weight was shell length in the group of all scallops with light red shell color, the male group with light red shell color, the female group with light red shell color, the group of all scallops with pale brown shell color, and the male group with pale brown shell color. The path coefficients were 0.726, 0.751, 0.717, 0.534, and 0.488, for these groups, respectively. However, shell width was the morphological trait that had the largest direct effect on adductor weight in the female group with pale brown shell color. The path coefficient of shell width on adductor weight was 0.425. The direct effect of main morphological traits on adductor weight was significantly greater in three groups with light red shell color than in three groups with pale brown shell color. The morphological traits that had a direct effect on adductor weight were different between male and female groups with pale brown shell colors. The effect of main morphological traits on weight traits in each experimental group was consistent with the results of path analysis. Therefore, in the breeding process of *C. farreri*, the selection of male and female parents with different shell colors should represent different morphological traits according to different breeding objectives. Shell length should be the main selected trait. When wet weight and soft weight are the breeding targets, shell length should be taken as the main morphological trait. At the same time, we should also pay attention to collaborative selection of other morphological traits for different shell colors and genders. When adductor weight was the breeding target, shell length was the selective trait for *C. farreri* with light red shell color, including male and female groups, and the male group with pale brown shell color. However, for the female group with pale brown shell color, shell width should be the selective trait, while shell height should be the cooperative selective trait. Since morphological traits of groups with different shell colors had different effects on the adductor weight, shell color could be taken as an important reference trait when the adductor weight is the breeding target in *C. farreri*.

Key words: *Chlamys farreri*; shell color; relevance; path analysis

Corresponding author: WANG Xiaomei. E-mail: xiaomei_wang328@126.com