

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20220412001

http://www.yykxjz.cn/

王松林, 许星鸿, 涂康, 刘志鸿, 张天时, 吴彪, 周丽青, 孙秀俊. 不同地理群体菲律宾蛤仔壳形态对体重性状的影响研究. 渔业科学进展, 2023, 44(6): 142-154

WANG S L, XU X H, TU K, LIU Z H, ZHANG T S, WU B, ZHOU L Q, SUN X J. Effects of shell morphology on the weight traits of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) from different geographical populations. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(6): 142-154

# 不同地理群体菲律宾蛤仔壳形态 对体重性状的影响研究\*

王松林<sup>1,2</sup> 许星鸿<sup>1</sup> 涂康<sup>3</sup> 刘志鸿<sup>2</sup>  
张天时<sup>2</sup> 吴彪<sup>2</sup> 周丽青<sup>2</sup> 孙秀俊<sup>2①</sup>

(1. 江苏海洋大学海洋科学与水产学院 江苏 连云港 222005; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 农业农村部海洋渔业与可持续发展重点实验室 山东 青岛 266071; 3. 莆田市水产研究所 福建 莆田 351100)

**摘要** 采集我国南北沿海9个地理群体的菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*), 利用通径分析等方法评估各群体形态性状对活体重和软体重的影响。结果显示, 各群体壳长、壳高、壳宽和壳厚4个形态性状对菲律宾蛤仔活体重和软体重的影响存在显著差异。除壳厚外, 其他形态性状与活体重和软体重呈显著相关( $P < 0.05$ )。通径分析和决定系数分析显示, 大多数群体的壳宽对活体重和软体重的直接作用最大。2个形态比例参数(壳宽/壳长和壳高/壳长)最大值出现在山东莱州群体(0.49和0.74), 而最小值出现在大连东港群体(0.42和0.67)。壳厚的变异系数最大(22.74), 而壳高的变异系数最小(9.47)。通过检验偏回归系数的显著性, 建立了各群体形态性状对软体重的最优回归方程。聚类分析表明, 菲律宾蛤仔不同群体未出现明显的地域分布特征, 而呈现出不规律的南北交替聚类现象。本研究查明了不同地理群体菲律宾蛤仔壳形态性状对体重性状的影响, 为菲律宾蛤仔地理群体的形态判别、种质资源分析和遗传育种研究等提供了重要科学依据。

**关键词** 菲律宾蛤仔; 壳形态性状; 软体重; 通径分析; 聚类分析

**中图分类号** S966 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2023)06-0142-13

贝壳的形态是贝类重要的数量性状, 受到生态环境和遗传等多方面因素的影响, 是“自然选择-微进化-可遗传”综合作用的结果(刘括等, 2021)。通过对壳形态学性状的测定, 不仅有助于认识贝类物种间或种内群体间的种质资源现状, 还可作为重要育种性状应用于贝类遗传育种工作。此外, 贝类活体重和软体重等

体重性状是贝类育种过程中需要重点考虑的育种性状, 但经常面临无法进行活体测量或直接测量难度大等问题。众所周知, 贝类体重性状与壳形态性状密切相关, 但体重性状和形态性状之间的简单相关分析并不能充分解释这些性状之间的所有内在联系。

通径分析是在相关分析的基础上进一步剖析各

\* 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202203803)、国家重点研发计划项目(2018YFD0900702)、中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费(20603022022001)、青岛市市南区科技计划项目(2022-2-026-ZH)、莆田市科技计划项目(2021NJ002)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2023TD30)共同资助。王松林, E-mail: 1436602256@qq.com.

① 通信作者: 孙秀俊, 副研究员, E-mail: xjsun@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2022-04-12, 收修改稿日期: 2022-05-06

性状之间的联系,已广泛应用于动植物种质资源评估和遗传育种领域(Hazel *et al*, 1942; Khalil *et al*, 2016)。利用通径分析的方法能弥补形态学数据相关性分析的不足,可以更细致、更有效地反映各性状之间存在的内在联系,有利于提高形态变异的判别能力和选种的准确性(Trygve, 2005; 杜家菊等, 2010)。利用通径分析方法研究壳形态对体重性状的影响,在许多海洋贝类中得到广泛应用,如黑蝶贝(*Pinctads margaritifera*)、福建牡蛎(*Ostreidae*)和青蛤(*Cyclina sinensis*)等(严俊贤等, 2015; 巫旗生等, 2018; 张雷雷等, 2019)。因此,采用通径分析方法揭示贝类壳形态性状中影响体重性状的主要因素,可为贝类种群遗传变异和形态学鉴定等提供重要科学依据,同时,对于加快优良壳型品种和体重性状选育等具有重要的指导意义。

菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)具有生长速度快、养殖周期短、适应性强等优点,是我国南北方沿海广泛养殖的重要滩涂经济贝类。我国是菲律宾蛤仔养殖大国,其产业已成为我国南北方沿海渔业经济的重要组成部分(Zhang *et al*, 2006)。与其他双壳贝类相似,菲律宾蛤仔的壳形态同样受到生态环境等因素的影响。如在泥含量较高的底质中,双壳贝类的壳高/壳长比值较大,壳外部形态趋向球形,而在砂砾底质中,壳高/壳长比值较小,壳形态趋向细长型或扁长型(Eagar *et al*, 1978; 刘括等, 2021)。然而,多年来,南方育苗和北方养殖的南北接力模式逐渐成为蛤仔养殖的主要产业模式(张士军等, 2013)。这种南苗北养的模式导致我国菲律宾蛤仔的种质资源混杂、地理群体判别困难和群体间遗传变异不清楚等问题日益加剧。

本研究采集我国南北沿海 9 个地理位置的菲律宾蛤仔群体,测量和分析不同群体壳形态和体重性状,采用通径分析等方法探究壳形态对活体重和软体重的影响,确定各群体影响体重性状的主要因素,利用聚类分析揭示各群体之间的亲缘关系,建立各群体形态性状对软体重的最优回归方程。研究结果不仅为菲律宾蛤仔不同地理群体的形态判别及种质资源评价提供必要的科学依据,而且有助于辅助设计合理的育种策略来预测育种性状,对于指导菲律宾蛤仔选育和养殖生产具有重要的理论和应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

2019 年 4—6 月,从我国南北沿海采集 9 个不同

地理群体的菲律宾蛤仔,主要包括 8 个养殖群体(辽宁大连庄河、大连东港、大连金州、山东红岛、浙江宁波、广东潮州、福建莆田和福建连江)和 1 个野生群体(山东莱州),各群体的采样个体数见表 1。

### 1.2 数据测量

使用游标卡尺(精确度为 0.01 mm)分别测量 9 个不同地理群体菲律宾蛤仔的壳长、壳高、壳宽,采用厚度仪测量蛤仔贝壳最凸的中心位置,即壳厚。将菲律宾蛤仔表面水分用滤纸擦拭干净,在电子天平(精确度为 0.01g)上分别称出活体重。然后,使用解剖刀将软体部分去除干净,晾干后用电子天平称出壳重,再用活体重减去壳重得出软体重。

### 1.3 数据处理

通过 Excel 软件将 9 个不同地理群体菲律宾蛤仔各性状测量出的形态数据进行整理。采用 SPSS26.0 软件进行统计分析,求其平均值、标准差和变异系数,获得不同地理群体菲律宾蛤仔表型参数(杜家菊等, 2010)。为消除个体间大小差异的影响,通过计算 2 个形态比例参数(壳宽/壳长和壳高/壳长)反映贝壳形态特征。此外,采用 SPSS26.0 软件逐步线性回归分析得出相关系数、直接通径系数与相关指数,进一步求出间接通径系数、单性状决定系数和共同性状决定系数。对性状间的相关系数和多元回归分析进行评价,建立多元回归方程。再对获得的数据参数进行聚类分析,分别将各性状进行特征校准(求各性状与壳长的比值),然后,利用热图绘制软件通过欧氏距离的最短距离方法进行分析并作图(张尧庭等, 1982)。间接通径系数( $P_{di}$ ),如  $i$  通过  $j$  对  $y$  的间接通径系数公式:

$$P_{di} = r_{di}P_{iy} \quad (1)$$

式中,自变量通过其他自变量对因变量间接作用。 $r_{di}$  为 2 个不同性状间的相关系数, $P_{iy}$  为  $i$  对  $y$  的直接通径系数。

2 个不同性状共同对体重的决定系数( $d_{ydi}$ )计算公式:

$$d_{ydi} = 2P_{yd}P_{yi}r_{di} \quad (2)$$

式中, $P_{yd}$ 、 $P_{yi}$  分别代表了某个性状与体重的直接通径系数, $r_{di}$  代表 2 个不同性状间的相关系数。

线性回归方程式:

$$Q = b_0 + b_1S_L + b_2S_H + b_3S_W + b_4S_T \quad (3)$$

式中, $Q$  为所测的体重性状, $b_0$  为常数项, $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  和  $b_4$  分别为 4 个形态性状的偏回归系数。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同地理群体中菲律宾蛤仔形态性状和体重性状的比较分析

菲律宾蛤仔群体的形态性状和体重性状的相关统计结果见表 1。从表 1 可以看出, 菲律宾蛤仔各群体间壳长、壳高、壳宽、壳厚、活体重和软体重等形态性状的平均值大小相近, 但仍存在一定差异。对于所有群体而言, 平均壳长最大值出现在大连金州群体, 为(37.11±2.56) mm, 而最小值出现在山东莱州群体, 仅为(28.15±2.04) mm。大连庄河群体的平均软体

重最大, 为(4.21±0.75) g, 而福建莆田群体的平均软体重最小, 为(2.51±0.50) g。与形态性状和体重性状不同, 2 个形态比例参数(壳宽/壳长和壳高/壳长)的最大值出现在山东莱州群体(0.49 和 0.74), 而最小值出现在大连东港群体(0.42 和 0.67)。

变异系数反映了各个菲律宾蛤仔群体形态性状和体重性状的离散程度。对于形态性状而言, 变异系数最大的是壳厚, 其最大值出现在大连金州群体(22.74), 而变异系数最小的是壳高, 其最大值出现在广东潮州群体(9.47)。对于体重性状, 软体重的变异系数最大, 均超过 17%。

表 1 菲律宾蛤仔不同地理群体的形态和体重性状统计

Tab.1 The statistics of morphological and weight traits of Manila clams from different geographical populations

群体 Populations	个数 Number	壳长 (变异系数) Shell length/mm	壳高 (变异系数) Shell height/mm	壳宽 (变异系数) Shell width/mm	壳厚(变异 系数)Shell Thickness /mm	活体重 (变异系数) Live weight/g	软体重 (变异系数) Soft body weight/g	壳宽/壳长 Shell width/shell length	壳高/壳长 Shell height/shell length
福建莆田 Fujian Putian	35	29.30±1.87 (6.39)	20.23±1.32 (6.52)	12.99±1.00 (7.68)	0.67±0.12 (18.09)	4.99±1.00 (19.95)	2.51±0.50 (19.81)	0.44	0.69
福建连江 Fujian Lianjiang	50	34.09±2.54 (7.46)	23.66±1.64 (6.91)	15.67±1.88 (12.00)	1.04±0.14 (12.54)	8.08±1.66 (20.57)	3.78±0.83 (21.94)	0.46	0.69
山东莱州 Shandong Laizhou	50	28.15±2.04 (7.23)	20.85±1.15 (6.84)	13.82±0.95 (5.52)	0.81±0.14 (16.92)	5.38±0.96 (17.89)	2.57±0.50 (19.58)	<b>0.49</b>	<b>0.74</b>
大连庄河 Dalian Zhuanghe	40	36.55±2.04 (5.59)	24.99±1.27 (5.09)	16.44±1.01 (6.11)	0.79±0.17 (21.53)	8.69±1.33 (15.36)	4.21±0.75 (17.79)	0.45	0.68
大连金州 Dalian Jinzhou	35	37.11±2.56 (6.88)	25.16±1.76 (7.00)	16.59±1.29 (7.80)	0.91±0.21 (22.74)	9.23±1.84 (19.96)	4.09±0.96 (23.57)	0.45	0.68
大连东港 Dalian Donggang	35	36.57±3.54 (9.67)	24.37±1.85 (7.61)	15.52±1.20 (7.76)	0.94±0.19 (19.78)	8.65±2.02 (23.34)	3.78±1.17 (30.89)	<b>0.42</b>	<b>0.67</b>
浙江宁波 Zhejiang Ningbo	40	35.10±2.48 (7.14)	24.28±1.74 (7.38)	15.85±1.29 (7.97)	0.98±0.14 (14.38)	9.08±2.01 (22.40)	4.03±1.04 (27.10)	0.45	0.69
山东红岛 Shandong Hongdao	46	34.57±2.36 (6.82)	23.81±1.48 (6.21)	15.37±1.28 (8.31)	0.73±0.12 (16.48)	8.08±1.57 (19.46)	3.71±0.71 (19.16)	0.44	0.69
广东潮州 Guangdong Chaozhou	50	32.88±3.31 (10.07)	23.66±1.99 (9.47)	15.54±1.47 (8.39)	0.90±0.10 (11.02)	7.82±1.98 (25.29)	3.93±1.25 (31.91)	0.47	0.72

### 2.2 不同地理群体中菲律宾蛤仔形态性状与体重性状之间的相关性分析

各群体中, 各个体重性状与壳形态性状之间存在一定相关性, 但相关程度大小不一。总体而言, 所有群体的壳长、壳高和壳宽都与活体重和软体重呈显著相关, 但壳厚与体重性状之间在群体间呈现不同的相关性(表 2 和表 3)。除大连东港群体外, 大部分群体的壳厚与活体重呈显著相关( $P<0.05$ ), 但潮州、宁波

和大连群体的壳厚与软体重相比无显著相关性。

尽管壳长、壳高和壳宽等形态性状与体重性状之间呈现显著的相关性, 但各形态性状与体重性状之间的相关性存在一定差异。福建连江群体壳高与活体重和软体重的相关性最高, 分别为 0.916 和 0.911; 山东莱州群体的壳宽与活体重和软体重的相关性最高, 分别为 0.900 和 0.838; 山东红岛群体的壳长与活体重的相关性最大, 为 0.936; 大连 3 个群体的壳宽与活体重相关性最大, 分别为 0.874、0.850 和 0.904。

表 2 不同地理群体菲律宾蛤仔壳形态性状对活体重量的通径分析  
 Tab.2 The analysis of path coefficients of morphological traits for live body weight of Manila clams  
 from different geographical populations

群体 Populations	形态性状 Morphological traits	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effects	间接作用 Indirect effects				总和 Sum
				壳长 Shell length	壳高 Shell height	壳宽 Shell width	壳厚 Shell thickness	
广东潮州 Guangdong Chaozhou	壳长 Shell length	0.916**	0.404**		0.149	0.380	0.008	0.537
	壳高 Shell height	0.916**	0.194**	0.311		0.368	0.013	0.692
	壳宽 Shell width	0.884**	<b>0.456**</b>	0.337	0.150		0.010	0.497
	壳厚 Shell thickness	0.344*	0.036	0.090	0.144	0.124		0.358
福建莆田 Fujian Putian	壳长 Shell length	0.905**	0.407**		0.125	0.341	0.032	0.498
	壳高 Shell height	0.897**	0.147**	0.347		0.354	0.049	0.750
	壳宽 Shell width	0.941**	<b>0.443**</b>	0.313	0.117		0.068	0.498
	壳厚 Shell thickness	0.542**	0.119**	0.110	0.061	0.253		0.424
福建连江 Fujian Lianjiang	壳长 Shell length	0.872**	0.329**		0.485	0.051	0.057	0.593
	壳高 Shell height	0.916**	<b>0.582**</b>	0.274		0.059	0.060	0.393
	壳宽 Shell width	0.678**	0.095	0.176	0.361		0.055	0.592
	壳厚 Shell thickness	0.544**	0.148**	0.128	0.235	0.035		0.398
浙江宁波 Zhejiang Ningbo	壳长 Shell length	0.904**	0.312**		0.303	0.264	0.024	0.591
	壳高 Shell height	0.927**	<b>0.346**</b>	0.273		0.267	0.040	0.580
	壳宽 Shell width	0.913**	0.317**	0.260	0.291		0.045	0.596
	壳厚 Shell thickness	0.403*	0.132**	0.057	0.106	0.107		0.270
山东红岛 Shandong Hongdao	壳长 Shell length	0.936**	<b>0.407**</b>		0.283	0.189	0.057	0.529
	壳高 Shell height	0.923**	0.322**	0.358		0.191	0.052	0.601
	壳宽 Shell width	0.888*	0.236**	0.326	0.260		0.066	0.652
	壳厚 Shell thickness	0.551**	0.133**	0.175	0.126	0.116		0.417
山东莱州 Shandong Laizhou	壳长 Shell length	0.822**	0.142		0.320	0.463	0.048	0.831
	壳高 Shell height	0.880**	0.462**	0.098		0.418	0.075	0.591
	壳宽 Shell width	0.900**	<b>0.547**</b>	0.120	0.353		0.052	0.525
	壳厚 Shell thickness	0.632**	0.110	0.062	0.316	0.259		0.637
大连庄河 Dalian Zhuanghe	壳长 Shell length	0.845**	0.345**		0.006	0.500	0.022	0.528
	壳高 Shell height	0.725**	0.009	0.246		0.476	0.021	0.743
	壳宽 Shell width	0.912**	<b>0.644**</b>	0.268	0.007		0.036	0.311
	壳厚 Shell thickness	0.407*	0.094	0.081	0.002	0.247		0.330
大连金州 Dalian Jinzhou	壳长 Shell length	0.881**	0.301**		0.195	0.385	0.031	0.611
	壳高 Shell height	0.899**	0.235*	0.249		0.415	0.028	0.692
	壳宽 Shell width	0.924**	<b>0.471**</b>	0.246	0.207		0.026	0.479
	壳厚 Shell thickness	0.418**	0.081	0.115	0.082	0.152		0.349
大连东港 Dalian Donggang	壳长 Shell length	0.802**	0.174		0.404	0.346	-0.021	0.729
	壳高 Shell height	0.921**	<b>0.485**</b>	0.145		0.436	-0.013	0.568
	壳宽 Shell width	0.921**	0.484**	0.124	0.437		-0.004	0.557
	壳厚 Shell thickness	-0.079	0.061	-0.061	-0.101	-0.032		-0.194

注: \*\*表示差异极显著( $P<0.01$ ), \*表示差异显著( $P<0.05$ ), 下同。

Note: \*\* indicates the highly significant difference ( $P<0.01$ ), and \* indicates the significant difference ( $P<0.05$ ), the same as below.

表3 不同地理群体菲律宾蛤仔壳形态性状对软体重量的通径分析  
Tab.3 The analysis of path coefficients of morphological traits for soft body weight of Manila clams from different geographical populations

群体 Population	形态性状 Morphological traits	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effects	间接作用 Indirect effects				总和 Sum
				壳长 Shell length	壳高 Shell height	壳宽 Shell width	壳厚 Shell thickness	
广东潮州 Guangdong Chaozhou	壳长 Shell length	0.897**	0.560**		0.095	0.395	-0.027	0.463
	壳高 Shell height	0.859**	0.124	0.431		0.367	-0.046	0.752
	壳宽 Shell width	0.834**	0.474**	<b>0.467</b>	0.096		-0.033	0.530
	壳厚 Shell thickness	0.181	-0.122*	0.125	0.046	0.129		0.300
福建莆田 Fujian Putian	壳长 Shell length	0.924**	0.380**		0.249	0.328	-0.034	0.543
	壳高 Shell height	0.906**	0.292**	0.324		<b>0.341</b>	-0.052	0.613
	壳宽 Shell width	0.882**	0.427**	0.292	0.233		-0.071	0.454
	壳厚 Shell thickness	0.342*	-0.125*	0.103	0.121	0.243		0.467
福建连江 Fujian Lianjiang	壳长 Shell length	0.882**	0.391**		<b>0.412</b>	0.078	-0.020	0.47
	壳高 Shell height	0.911**	0.494**	0.326		0.091	-0.021	0.396
	壳宽 Shell width	0.662**	0.147*	0.209	0.306		-0.019	0.496
	壳厚 Shell thickness	0.391**	-0.052	0.151	0.200	0.055		0.406
浙江宁波 Zhejiang Ningbo	壳长 Shell length	0.925**	0.573**		0.351	0.175	0.013	0.539
	壳高 Shell height	0.903**	0.401**	<b>0.502</b>		0.177	0.021	0.700
	壳宽 Shell width	0.868**	0.210	0.477	0.337		0.023	0.837
	壳厚 Shell thickness	0.288	0.068	0.105	0.123	0.071		0.299
山东红岛 Shandong Hongdao	壳长 Shell length	0.910**	0.380**		0.327	0.203	0.026	0.556
	壳高 Shell height	0.911**	0.372**	<b>0.334</b>		0.205	0.024	0.563
	壳宽 Shell width	0.858**	0.254**	0.304	0.301		0.030	0.635
	壳厚 Shell thickness	0.480**	0.061	0.164	0.145	0.125		0.434
山东莱州 Shandong Laizhou	壳长 Shell length	0.800**	0.263*		0.246	0.290	-0.020	0.516
	壳高 Shell height	0.801**	0.356**	0.182		0.262	-0.031	0.413
	壳宽 Shell width	0.838**	0.343*	0.222	<b>0.272</b>		-0.022	0.472
	壳厚 Shell thickness	0.496**	-0.046	0.115	0.243	0.162		0.52
大连庄河 Dalian Zhuanghe	壳长 Shell length	0.783**	0.263*		-0.015	0.521	-0.019	0.487
	壳高 Shell height	0.673**	-0.021	0.187		<b>0.495</b>	-0.018	0.664
	壳宽 Shell width	0.874**	0.670**	0.204	-0.016		-0.031	0.157
	壳厚 Shell thickness	0.250	-0.081	0.062	-0.005	0.257		0.314
大连金州 Dalian Jinzhou	壳长 Shell length	0.787**	0.276		0.126	0.694	-0.030	0.790
	壳高 Shell height	0.783**	0.152	0.229		<b>0.749</b>	-0.027	0.951
	壳宽 Shell width	0.850**	0.850**	0.225	0.134		-0.025	0.334
	壳厚 Shell thickness	0.204	-0.078	0.106	0.053	0.274		0.433
大连东港 Dalian Donggang	壳长 Shell length	0.785**	0.285**		0.093	0.501	0.019	0.613
	壳高 Shell height	0.881**	0.112	0.238		0.631	0.011	0.880
	壳宽 Shell width	0.904**	0.701**	0.203	0.101		0.003	0.307
	壳厚 Shell thickness	-0.188	-0.053	-0.100	-0.023	-0.046		-0.169

### 2.3 不同地理群体菲律宾蛤仔壳形态性状对活体重和软体重的通径分析

菲律宾蛤仔形态性状对活体重和软体重的通径分析结果见表2和表3。从表2可以看出,在壳形态

性状的直接作用中,壳长对山东红岛蛤仔影响最大,为0.407;壳高对福建连江、大连东港和浙江宁波群体的直接影响最大,分别为0.582、0.485和0.346;其他群体都是受壳宽的直接影响最大,其中,福建莆田群体为0.443,山东莱州群体为0.547,大连庄河群

体为 0.644, 大连金州群体为 0.471, 广东潮州群体为 0.456。在壳形态性状对活体重的间接作用中, 福建莆田和大连金州群体是在壳宽基础上的壳高影响最大, 分别为 0.354 和 0.415; 福建连江、浙江宁波和广东潮州群体都是在壳高基础上的壳长影响最大, 分别为 0.485、0.303 和 0.380; 山东莱州、大连庄河和大连东港群体都是在壳宽基础上壳长的影响最大, 分别为 0.463、0.500 和 0.437; 山东红岛群体是在壳长基础上的壳高的影响最大, 为 0.358。

从表 3 可以看出, 壳形态对软体重的直接作用中, 壳长对浙江宁波、山东红岛和广东潮州蛤仔软体重的影响最大, 分别为 0.573、0.380 和 0.560; 壳高对福建连江蛤仔软体重影响最大, 为 0.494; 其他群体都是壳宽影响最大, 其中, 福建莆田群体为 0.427, 山东莱州群体为 0.356, 大连庄河群体为 0.670, 大连金州群体为 0.850, 大连东港群体为 0.701。在壳形态对软体重的间接作用中, 福建莆田和大连金州群体都是在壳宽基础上壳高的影响最大, 分别为 0.341 和 0.749; 福建连江群体在壳高基础上壳长的影响最大, 为 0.412; 山东莱州和大连庄河群体在壳宽基础上壳长的影响最大, 分别为 0.290 和 0.521; 大连东港群

体在壳宽基础上壳高的影响最大, 为 0.631; 浙江宁波和山东红岛群体在壳长基础上壳高的影响最大, 分别为 0.502 和 0.334; 广东潮州群体是在壳长基础上壳宽的影响最大, 为 0.467。

#### 2.4 不同地理群体中菲律宾蛤仔壳形态性状对活体重量和软体重的决定系数分析

菲律宾蛤仔形态性状对活体重的决定系数分析结果见表 4。从表 4 可以看出, 福建莆田、大连金州和广东潮州蛤仔壳宽对活体重的决定作用较大, 决定系数分别为 0.277、0.232 和 0.307; 福建连江蛤仔壳高对活体重的决定作用最大, 决定系数为 0.339; 大连庄河蛤仔壳宽对活体重的决定作用最大, 决定系数为 0.415; 山东莱州和大连东港蛤仔壳宽对活体重决定作用最大, 决定系数分别为 0.386 和 0.423; 浙江宁波和山东红岛蛤仔壳高对活体重的决定作用最大, 决定系数分别为 0.189 和 0.231。

各形态对软体重的决定系数见表 5。从表 5 可以看出, 福建莆田和广东潮州蛤仔壳宽对软体重起最大的决定作用, 决定系数分别为 0.249 和 0.443; 福建连江、浙江宁波和山东红岛蛤仔壳高对软体重的决定

表 4 不同地理群体菲律宾蛤仔形态性状对活体重量的决定系数

Tab.4 The analysis of determination coefficients of morphological traits for live body weight of Manila clams from different geographical populations

群体 Population	形态性状 Morphological traits	壳长 Shell length	壳高 Shell height	壳宽 Shell width	壳厚 Shell thickness	总和 Sum	相关指数 $R^2$ Correlation Index $R^2$
广东潮州 Guangdong Chaozhou	壳长 Shell length	0.163				0.959	0.959
	壳高 Shell height	0.121	0.038				
	壳宽 Shell width	<b>0.307</b>	0.137	0.208			
	壳厚 Shell thickness	—	—	—	—		
福建莆田 Fujian Putian	壳长 Shell length	0.166				0.981	0.981
	壳高 Shell height	0.102	0.022				
	壳宽 Shell width	<b>0.277</b>	0.104	0.196			
	壳厚 Shell thickness	0.026	0.015	0.060	0.014		
福建连江 Fujian Lianjiang	壳长 Shell length	0.108				0.896	0.896
	壳高 Shell height	0.319	<b>0.339</b>				
	壳宽 Shell width	—	—	—			
	壳厚 Shell thickness	0.038	0.070	—	0.022		
浙江宁波 Zhejiang Ningbo	壳长 Shell length	0.097				0.946	0.946
	壳高 Shell height	<b>0.189</b>	0.120				
	壳宽 Shell width	0.165	0.184	0.100			
	壳厚 Shell thickness	0.015	0.028	0.028	0.017		
山东红岛 Shandong Hongdao	壳长 Shell length	0.166				0.961	0.961
	壳高 Shell height	<b>0.231</b>	0.104				
	壳宽 Shell width	0.154	0.123	0.056			
	壳厚 Shell thickness	0.047	0.034	0.031	0.018		

续表 4

群体 Population	形态性状 Morphological traits	壳长 Shell length	壳高 Shell height	壳宽 Shell width	壳厚 Shell thickness	总和 Sum	相关指数 $R^2$ Correlation Index $R^2$
山东莱州 Shandong Laizhou	壳长 Shell length	-				0.899	0.899
	壳高 Shell height	-	0.213				
	壳宽 Shell width	-	<b>0.386</b>	0.299			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		
大连庄河 Dalian Zhuanghe	壳长 Shell length	0.119				0.879	0.879
	壳高 Shell height	-	-				
	壳宽 Shell width	<b>0.345</b>	-	0.415			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		
大连金州 Dalian Jinzhou	壳长 Shell length	0.091				0.912	0.912
	壳高 Shell height	0.117	0.055				
	壳宽 Shell width	<b>0.232</b>	0.195	0.222			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		
大连东港 Dalian Donggang	壳长 Shell length	-				0.893	0.893
	壳高 Shell height	-	0.235				
	壳宽 Shell width	-	<b>0.423</b>	0.234			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		

表 5 不同地理群体菲律宾蛤仔形态性状对软体重的决定系数

Tab.5 The analysis of determination coefficients of morphological traits for soft body weight of Manila clams from different geographical populations

群体 Population	形态性状 Morphological traits	壳长 Shell length	壳高 Shell height	壳宽 Shell width	壳厚 Shell thickness	总和 Sum	相关指数 $R^2$ Correlation Index $R^2$
广东潮州 Guangdong Chaozhou	壳长 Shell length	0.314				0.887	0.887
	壳高 Shell height	-	-				
	壳宽 Shell width	<b>0.443</b>	-	0.225			
	壳厚 Shell thickness	-0.031	-	-0.016	0.015		
福建莆田 Fujian Putian	壳长 Shell length	0.144				0.950	0.950
	壳高 Shell height	0.189	0.085				
	壳宽 Shell width	<b>0.249</b>	0.199	0.182			
	壳厚 Shell thickness	-0.026	-0.030	-0.061	0.016		
福建连江 Fujian Lianjiang	壳长 Shell length	0.153				0.892	0.892
	壳高 Shell height	<b>0.322</b>	0.244				
	壳宽 Shell width	0.061	0.090	0.022			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		
浙江宁波 Zhejiang Ningbo	壳长 Shell length	0.328				0.892	0.892
	壳高 Shell height	<b>0.403</b>	0.161				
	壳宽 Shell width	-	-	-			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		
山东红岛 Shandong Hongdao	壳长 Shell length	0.144				0.903	0.903
	壳高 Shell height	<b>0.248</b>	0.138				
	壳宽 Shell width	0.154	0.153	0.065			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		
山东莱州 Shandong Laizhou	壳长 Shell length	0.069				0.783	0.783
	壳高 Shell height	0.130	0.127				
	壳宽 Shell width	0.152	<b>0.187</b>	0.118			

续表 5

群体 Population	形态性状 Morphological traits	壳长 Shell length	壳高 Shell height	壳宽 Shell width	壳厚 Shell thickness	总和 Sum	相关指数 $R^2$ Correlation Index $R^2$
大连庄河 Dalian Zhuanghe	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-	0.791	0.791
	壳长 Shell length	0.069					
	壳高 Shell height	-	-				
	壳宽 Shell width	0.273		<b>0.449</b>			
大连金州 Dalian Jinzhou	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-	0.723	0.723
	壳长 Shell length	-					
	壳高 Shell height	-	-				
	壳宽 Shell width	-	-	<b>0.723</b>			
大连东港 Dalian Donggang	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-	0.857	0.857
	壳长 Shell length	0.081					
	壳高 Shell height	-	-				
	壳宽 Shell width	0.285		<b>0.491</b>			
	壳厚 Shell thickness	-	-	-	-		

作用最大, 决定系数分别为 0.322、0.403 和 0.248; 山东莱州蛤仔壳宽对软体重的决定作用最大, 决定系数为 0.187; 大连庄河、大连金州和大连东港蛤仔都是壳宽对软体重起最大的决定作用, 决定系数分别为 0.449、0.723 和 0.491。

**2.5 不同地理群体菲律宾蛤仔壳形态性状对软体重的多元回归分析**

通过检验偏回归系数的显著性, 利用逐步回归法剔除不显著的形态性状, 估算壳长、壳高、壳宽相对于软体重的比例, 保留对软体重有显著和极显著回归关系的壳形态性状(不显著的舍去), 获得壳形态性状对软体重影响作用的最佳回归方程(表 6)。从表 6 可以看出, 回归方程预测的估计值和实际观察到的值相比无显著差异, 有效反映出各群体菲律宾蛤仔性状之间的内在联系。经过多元回归方差分析, 软体重与各

形态性状的回归关系呈极显著( $P<0.01$ ), 偏回归系数达到显著水平( $P<0.05$ )。在各群体的最佳回归方程中, 除浙江宁波、福建连江和山东红岛 3 个群体外, 其他各群体蛤仔壳宽对软体重的影响显著, 偏回归系数均 $>0.2$ 。而对于菲律宾蛤仔的壳厚, 除广东潮州和福建莆田群体外, 其他群体壳厚对软体重均无显著的影响。

**2.6 聚类分析**

通过分析菲律宾蛤仔不同地理群体之间的特征校正值, 进行不同地理群体的聚类分析, 结果见图 1。从图 1 可以看出, 方块颜色从蓝色逐渐变成白色, 再从白色逐渐变成红色, 数值为 0~0.25, 表示欧式距离越来越大。结果显示, 我国南北沿海菲律宾蛤仔群体主要分为两大支, 一支由福建莆田和山东莱州群体组成, 而另外一个主要分支由其他群体共同组成。浙江宁波和大连金州群体先聚类, 接着与大连东港群体聚

表 6 不同地理群体蛤仔形态对软体重的最佳回归方程

Tab.6 The optimal regression equations of morphological traits for soft body weight of Manila clams from different geographical populations

群体 Populations	软体重 Soft body weight
广东潮州 Guangdong Chaozhou	$Q_2 = -7.924 + 0.212S_L + 0.403S_W - 1.539S_T$
福建莆田 Fujian Putian	$Q_2 = -5.089 + 0.101S_L + 0.110S_H + 0.213S_W - 0.511S_T$
福建连江 Fujian Lianjiang	$Q_2 = -7.519 + 0.128S_L + 0.251S_H + 0.065S_W$
浙江宁波 Zhejiang Ningbo	$Q_2 = -10.169 + 0.239S_L + 0.239S_H$
山东莱州 Shandong Laizhou	$Q_2 = -5.001 + 0.065S_L + 0.190S_H + 0.250S_W$
山东红岛 Shandong Hongdao	$Q_2 = -6.671 + 0.114S_L + 0.179S_H + 0.141S_W$
大连庄河 Dalian Zhuanghe	$Q_2 = -7.510 + 0.096S_L + 0.499S_W$
大连金州 Dalian Jinzhou	$Q_2 = -6.426 + 0.634S_W$
大连东港 Dalian Donggang	$Q_2 = -10.212 + 0.094S_L + 0.680S_W$



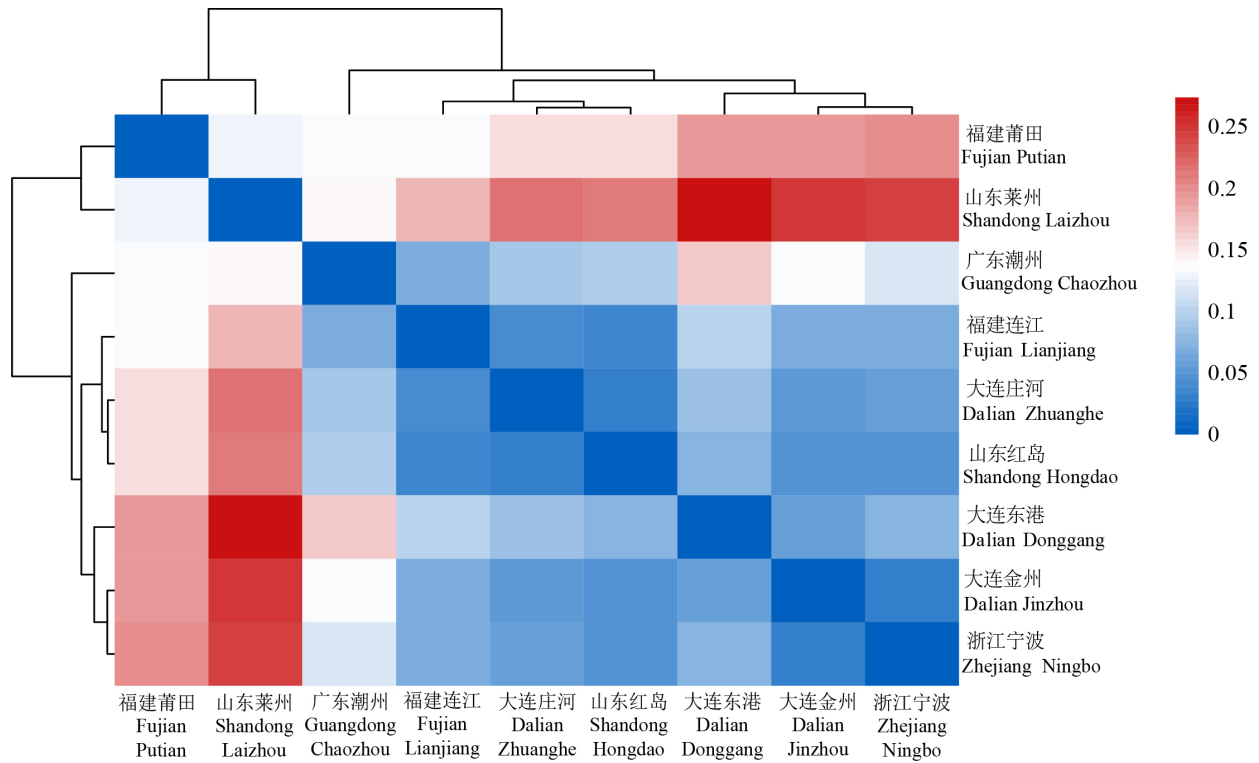


图1 不同地理群体菲律宾蛤仔聚类分析

Fig.1 Analysis of clustering for Manila clams from different geographical populations

为一支；大连庄河和山东红岛群体先聚类，再与福建连江群体聚为一支。浙江宁波、大连金州、东港、庄河、山东红岛和福建连江这6个群体聚为独立一支，与广东潮州群体共同组成上述其他群体组成的主要分支。结果表明，不同地理群体的菲律宾蛤仔没有表现出明显的南方和北方分化特征的地域聚类，而是呈现南北方群体交替聚类的现象。

### 3 讨论

#### 3.1 菲律宾蛤仔不同地理群体的形态变异

菲律宾蛤仔是广温、广盐性埋栖型贝类，从南海到渤海均有广泛分布，由于蛤仔在不同地理群体受到海域生态环境和遗传等因素的影响不同，因此，其外部形态和遗传结构在群体间出现明显变异(Nie *et al.*, 2015; 牛泓博等, 2015; 梁健等, 2020)。本研究中，采集的南北方沿海9个菲律宾蛤仔地理群体中，大部分北方群体各性状的平均值略大于南方群体，但壳长差异不显著。各群体的形态性状和体重性状的变异系数反映了各群体不同性状的离散程度，大多会对变异系数较大的性状进行选择，这样有利于获得更好的选育效果。本研究中，通过分析和比较我国南北沿海9个不同地理群体菲律宾蛤仔的壳形态和体重性状，发现

除大连庄河群体外，其他群体蛤仔体重性状的变异系数比壳形态变异系数大，其中，软体重的变异系数最大的群体是福建连江、山东莱州、大连金州和大连东港群体等。由此表明，与壳形态性状相比，蛤仔活体重和软体重等体重性状具有更大的选育潜力。另外，对于本研究中所有群体的菲律宾蛤仔而言，壳厚的变异系数均>壳长、壳高和壳宽等形态性状，说明壳厚的离散程度更大。研究表明，壳厚与蛤仔生长速度和营养状况密切相关，生长较快的蛤仔具有相对较薄的贝壳，而生长较慢的蛤仔贝壳较厚(Watanabe *et al.*, 2010)。与此相似的是贻贝(*Mytilus edulis*)壳厚与地理种群的纬度分布有直接关系，水温越低的海域，贻贝的壳厚越大，可能会更有利于适应寒冷的环境(Briones *et al.*, 2014)，与本研究结果中壳厚变化规律基本相一致，蛤仔壳厚的变异系数基本呈现从南往北逐渐增加的趋势，其最大值主要出现在大连地区。这可能与该地区冬季水温低有关，导致蛤仔贝壳厚度增加，生长速度减慢。因此，壳厚可以作为评价蛤仔生长速度和营养状况的重要指标。

除壳厚外，贝类的外部形态特征也容易受到外界环境因素的影响，壳宽与壳长等形态比值参数是反映贝类生长环境及其营养状况的重要指标(Watanabe *et al.*, 2010)。Seed 等(1980)研究发现，生活在高纬度的沙

蛤(*Macra antiquata*)群体壳长和壳宽存在异速生长现象,壳宽生长速度比壳长快,导致贝壳形态呈近球形,这更有利于其适应冰冷的水域环境。另外,贝类的壳高与壳长等形态比值参数与其生活的底质环境密切相关,泥含量较高的底质中,贝类壳外部形态趋向球形,而在砂砾底质中,壳形态趋向细长型或扁长型(Eagar *et al*, 1978)。蛤仔壳高、壳宽与壳长的比值参数,又称壳锐度指数,与个体生长率和营养状况呈显著负相关,生长速度快的个体外形呈扁平型(Watanabe *et al*, 2010)。同样,牛泓博等(2015)对辽宁沿海菲律宾蛤仔野生群体进行形态比较发现,长兴岛群体壳型最扁,金州群体壳型“凸”型最明显,但野生群体的地理距离与形态差异无明显关联,推测这可能与栖息地的长期适应及地理隔离有关。在本研究中,通过计算菲律宾蛤仔的壳宽与壳长比值和壳高与壳长比值发现,山东莱州群体菲律宾蛤仔的形态比值参数在所有群体中最大,表明该群体呈壳凸型或壳宽型的典型特征。这可能归因于蛤仔生活环境中,水温较低、底质中泥含量较高和饵料缺乏等因素,是自然选择和微进化共同作用的结果(Yokogawa *et al*, 1998)。

综上所述,蛤仔生长快的个体贝壳较薄,形态比值参数(壳高与壳长比值和壳宽与壳长比值)较小,可以作为评价蛤仔生长潜力和营养状况的重要指标。在养殖生产过程中,养殖户可以根据形态比值参数和壳厚指标来确定蛤仔收获的最佳时机,或者转移到更好的海域以提高养殖产量。因此,采用简单、快速的形态指标评估和预测养殖群体生长趋势对于养殖生产具有重要的指导意义。

### 3.2 菲律宾蛤仔不同地理群体形态性状对体重性状的影响及其育种应用前景

在贝类遗传育种领域,通径分析是研究壳形态对体重性状影响的重要途径,利用通径分析可确定影响体重性状的主要形态因素,有利于提高对贝类形态变异的判别能力和选种的准确性(刘括等, 2021)。梁健等(2020)在菲律宾蛤仔不同地理群体形态性状对软体重的通径分析中发现,影响北方土著群体蛤仔软体重的主要因素是壳长和壳高,而影响南方群体蛤仔软体重的主要因素是壳高,与本研究结果相一致。壳形态对体重性状的影响程度在不同群体有所不同,但并没有呈现规律性的地理分布特征。在本研究中,壳长对浙江宁波、山东红岛和广东潮州蛤仔的体重性状影响最大,壳高对福建连江蛤仔的体重性状影响最大,壳宽对山东莱州和福建莆田等蛤仔的体重性状影响最大。

在通径分析研究中,总决定系数 $\geq 0.850$ 是确定主

要影响因素的重要标准。在本研究中,对于所有菲律宾蛤仔群体而言,形态性状对活体重的决定系数 $> 0.850$ ,表明壳长、壳高、壳宽和壳厚是影响活体重的主要因素。然而,这些形态性状并不是影响软体重的主要因素,如山东莱州、大连庄河、大连东港和大连金州4个北方群体的总决定系数都 $< 0.850$ 。可能是这4个地理群体的菲律宾蛤仔还存在其他形态指标影响软体重,如外韧带槽宽、外韧带长、前缘长和后缘长等(牛泓博等, 2015)。与此类似的是,菲律宾蛤仔形态性状对软体重的通径分析发现,2龄和3龄的壳长、壳宽和壳高等形态性状对软体重的总决定系数均 $< 0.85$ ,表明性腺可能是影响菲律宾蛤仔软体重的一个主导因素(Seed *et al*, 1980)。虾夷扇贝(*Mizuhopecten yessoensis*)形态性状对软体重的总决定系数为0.737,表明还存在其他具有潜在影响的形态性状,可能与贝壳的凹凸性、两壳的绞合角度、表面积及水环境因子等有关(Chang *et al*, 2008)。本研究发现,影响软体重总决定系数 $< 0.850$ 的4个群体都分布在北方,这可能是北方春季水温低、性腺发育晚等原因所导致。

在贝类人工繁育过程中,亲本选择是一个关键阶段,主要依赖于对亲本形态性状的直接测量。然而,对于一些无法直接测量的体重性状(例如软体重等),可通过通径分析方法评估形态性状对软体重的直接和间接影响,揭示影响体重性状的主要形态指标,建立最优多元回归方程,可辅助设计合理的育种方案预测重要育种性状。如紫石房蛤(*Saxidomus purpuratu*)通径分析表明,影响体重性状的主要形态指标是壳宽,可以通过对亲本壳宽的选择实现对其体重性状的选育效果(Li *et al*, 2008);青蛤不同月龄幼贝的通径分析表明,壳高和壳宽是影响活体重的最主要因素,为青蛤高产新品系的选育提供基础数据(张雷雷等, 2019);福建牡蛎(*C. angulata*)通径分析表明,影响1~2龄牡蛎体重最主要的因素是壳宽,而影响3~4龄牡蛎体重最重要的因素是壳高,为福建牡蛎群体选育提供了重要参考依据(巫旗生等, 2018)。综上所述,尽管贝类不同地理群体或同一贝类不同年龄的形态性状对体重性状的影响有所差异,但通径分析结果为贝类高产新品种培育提供了重要的基础数据和科学依据。因此,本研究获得的通径分析结果及建立的最优多元回归方程,可根据不同地理群体影响体重性状的主要形态指标,制定合理的育种方案,提高选种的准确性,指导贝类遗传选育和养殖生产过程,加快培育具有壳型美观、高产等优良性状的蛤仔新品种(系)。

另外,本研究中聚类热图分析表明,各个菲律宾蛤仔地理群体没有出现典型的地理隔离特征,通过形

态性状计算的特征校正值无法将南北方各地理群体进行有效区分,而呈现南北方群体交替聚类的现象。这可能与我国多年来南方育苗和北方养殖的产业模式有关,北方养殖苗种主要依赖于南方引进,致使本地土著种群遗传多样性降低、种质资源混杂、群体遗传变异不清楚。这也启示在研究菲律宾蛤仔杂交育种过程中,需注意保护本地土著种群,促进我国蛤仔种质资源的合理开发和可持续利用。

## 参 考 文 献

- BRIONES C, RIVADENEIRA M M, FERNÁNDEZ M, *et al.* Geographical variation of shell thickness in the mussel *Perumytilus purpuratus* along the southeast Pacific coast. *Biological Bulletin*, 2014, 227(3): 221–231
- CHANG Y Q, ZHANG C S, CAO X B, *et al.* Effect of morphometrical traits on weight traits in one-year old yesso scallop *Patinopecten yessoensis*. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2008, 23(5): 330–334
- DU J J, CHEN Z W. A method for path analysis using SPSS linear regression. *Bulletin of Biology*, 2010, 45(2): 4–6 [杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法. *生物学通报*, 2010, 45(2): 4–6]
- EAGAR R M C. Shape and function of the shell: A comparison of some living and fossil bivalve mollusks. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 1978, 53(2): 169–210
- HAZEL L N, LUSH J L. The efficiency of three methods of selection. *Heredity*, 1942, 33(11): 393–399
- KHALIL M H, SHEBL M K, KOSBA M A, *et al.* Estimate the contribution of incubation parameters influence egg hatchability using multiple linear regression analysis. *Veterinary World*, 2016, 9(8): 806–810
- LIANG J, WANG J J, GUO Y J, *et al.* Correlation and path analysis of phenotypic traits of Filipina clam in different geographical groups. *Fisheries Science*, 2020, 39(1): 40–47 [梁健, 王俊杰, 郭永军, 等. 不同地理群体菲律宾蛤仔表型性状的相关性与通径分析. *水产科学*, 2020, 39(1): 40–47]
- LI J, WANG Z P, YU R H, *et al.* Quantitative analysis of the relationship between shell characters and live body weight of *Saxidomus purpuratus* Sowerby. *Marine Fisheries Research*, 2008, 29: 71–77
- LIU K, LI X T, CHE Z H, *et al.* Research progress on polymorphism of shell morphological traits in shellfish populations. *Marine Science*, 2021, 45(4): 213–221 [刘括, 李晓彤, 车宗豪, 等. 贝类种群壳形态性状多态性研究进展. *海洋科学*, 2021, 45(4): 213–221]
- NIE H B, NIU H T, ZHAO L Q, *et al.* Genetic diversity and structure of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) populations from Liaodong Peninsula revealed by SSR markers. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, 59: 116–125
- NIU H B, NIE H T, ZHAO L Q, *et al.* Morphological variation analysis of the Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) populations along the coast of Liaoning Province. *Marine Science*, 2015, 39(11): 54–60 [牛泓博, 聂鸿涛, 赵力强, 等. 辽宁沿海菲律宾蛤仔不同地理群体形态差异研究. *海洋科学*, 2015, 39(11): 54–60]
- SEED R, O'CONNOR R J. Shell shape and seasonal changes in population structure in *Lasaea rubra* (Bivalvia: Erycinidae). *Journal of Molluscan Studies*, 1980, 46(1): 66–73
- TRYGVE G. Selection and breeding programs in Aquaculture. Chapter, 2005, 18: 287–299
- WATANABE S, KATAYAMA S. Relationships among shell shape, shell growth rate, and nutritional condition in the Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) in Japan. *Journal of Shellfish Research*, 2010, 29(2): 353–359
- WU Q S, NING Y, ZENG Z N, *et al.* Correlation and path analysis of quantitative traits of different-age “Golden Oyster #1” *Crassostrea angulata*. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2018, 57(1): 72–78 [巫旗生, 宁岳, 曾志南, 等. 不同贝龄“金蛎 1 号”福建牡蛎数量性状的相关性和通径分析. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2018, 57(1): 72–78]
- YAN J X, LIU B S, LI Y N, *et al.* Analysis of the effect of phenotypic traits on body mass in wild black butterfly shell. *Fisheries Science*, 2015, 34(9): 560–564 [严俊贤, 刘宝锁, 李有宁, 等. 野生黑蝶贝表型性状对体重的影响分析. *水产科学*, 2015, 34(9): 560–564]
- YOKOGAWA K. Morphological variabilities and genetic features in Japanese common clam *Ruditapes philippinarum*. *Japanese Journal of Malacology*, 1998, 57(2): 121–132
- ZHANG G, YAN X. A new three-phase culture method for Manila clam, *Ruditapes philippinarum*, farming in northern China. *Aquaculture*, 2006, 258(1/2/3/4): 452–461
- ZHANG L L, TENG S S, LI T T, *et al.* Analysis of the effects of morphological traits on live mass of clams in different months. *Ocean Science*, 2019, 43(12): 74–80 [张雷雷, 滕爽爽, 李腾腾, 等. 不同月龄青蛤形态性状对活体重的影响分析. *海洋科学*, 2019, 43(12): 74–80]
- ZHANG S J, MU Y T. Typical culture mode and cost-benefit analysis of Hongdao clam industry. *China Fisheries Economy*, 2013, 31(1): 124–128 [张士军, 慕永通. 红岛蛤蜊产业典型养殖模式及成本收益分析. *中国渔业经济*, 2013, 31(1): 124–128]
- ZHANG Y T, FANG K T. Introduction to multivariate statistical analysis. Beijing: Science Press, 1982 [张尧庭, 方开泰. 多元统计分析引论. 北京: 科学出版社, 1982]

## Effects of Shell Morphology on the Weight Traits of Manila Clam (*Ruditapes philippinarum*) from Different Geographical Populations

WANG Songlin<sup>1,2</sup>, XU Xinghong<sup>1</sup>, TU Kang<sup>3</sup>, LIU Zhihong<sup>2</sup>, ZHANG Tianshi<sup>2</sup>,  
WU Biao<sup>2</sup>, ZHOU Liqing<sup>2</sup>, SUN Xiujun<sup>2①</sup>

(1. Marine Science and Fisheries College, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;  
2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes; Key Laboratory of Marine Fisheries and Sustainable Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266071, China; 3. Putian Fisheries Research Institute, Putian 351100, China)

**Abstract** Shell morphological traits are important quantitative traits in shellfish. Shell morphology is usually affected by many factors, such as the ecological environment and shellfish genetics. It is considered the results of comprehensive actions of natural selection, micro-evolution, and heredity. Measuring shell morphological traits aids our understanding of the current situation of germplasm resources among shellfish species or intraspecific populations and also provides important breeding traits for shellfish breeding programs. For most shellfish, quality traits (eg. live weight and soft body weight) are considered the important breeding traits, but there are practical issues in using these traits, such as the inability or difficulty in measuring them *in vivo*. It is well known that shellfish quality traits are closely related to shell morphological traits. However, a simple correlation analysis between quality and morphological traits cannot adequately explain all the intrinsic links between these traits. In this study, Manila clams (*Ruditapes philippinarum*) were collected from nine geographical locations along the north and south coasts of China. The shell morphology and quality characteristics were measured and analyzed for the nine different populations of clams. Furthermore, the main factors affecting the quality traits were analyzed using cluster analysis to reveal the genetic relationships among the populations. The optimal regression equations were constructed using the morphological traits with the soft weights of these populations. For all populations, shell length, shell height, shell width, and shell thickness were measured using a vernier caliper (with an accuracy of 0.01 mm) and a thickness gauge. After wiping the surface of clams with filter paper, their live weight was measured on an electronic balance (with an accuracy of 0.01 g). A scalpel was used to sample the soft body from the clams. After drying, soft body weights were calculated using the difference between live weight and shell weight. The morphological data, including mean values, standard deviation, and coefficient of variation, were calculated using SPSS 26.0. To eliminate the effects of size differences among individuals, two morphological scale parameters (shell width/shell length and shell height/shell length) were calculated to reflect the morphological characteristics of the clams. In addition, stepwise linear regression analyses were performed to obtain the correlation coefficients, direct path coefficients, correlation indexes, indirect path coefficients, and determine the coefficients using SPSS26.0 software. The correlation coefficient and multiple regression analyses of the traits were evaluated. The multiple regression equations were established for all populations. Cluster analysis was used to assess each trait using the calibrations (to calculate the ratio of each trait to shell length). The heatmap displayed the shortest distance method for the Euclidean distance between the different populations. There were significant differences in the effects of shell length, shell height,

① Corresponding author: SUN Xiujun, E-mail: xjsun@ysfri.ac.cn

shell width, and shell thickness on live weight and soft body weight of clams. Morphological traits were significantly correlated with body weight and soft weight ( $P < 0.05$ ), except for shell thickness. The results of determination coefficient revealed shell width had the greatest impact on live weights of the Putian, Jinzhou, and Chaozhou populations, with determination coefficients of 0.277, 0.232, and 0.307, respectively. The determination coefficients of soft body weights indicated that shell width played very important roles in determining soft body weights of the Putian and Chaozhou populations, with determination coefficients of 0.249 and 0.443, respectively. By calculating the total of determination coefficients, the results are consistent with the correlation index  $R^2$  for each trait. For the total determinant effects, the sum of determination coefficients for the morphological traits with soft body weights were greater than 0.850 in most populations. In contrast, the sum of determination coefficients for the morphological traits with soft body weights were less than 0.850 in Laizhou, Zhuanghe, Donggang, and Jinzhou. Based on the path analysis and the determination coefficient analysis, shell width had the greatest impact on live weights and soft body weights in most populations. The maximum values of the two morphological proportion parameters (shell width/shell length and shell height/shell length) were found in the Laizhou population (0.49 and 0.74), while the minimum proportion parameters were detected in the Dalian Donggang population (0.42 and 0.67). Among the shell morphological traits, shell thickness had the largest coefficient of variation (22.74), while shell height had the smallest coefficient of variation (9.47). By testing for statistically significant variation in the partial regression coefficient, the optimal regression equations of the morphological traits for soft body weight were constructed for all the populations. The cluster analysis revealed that different clam populations did not have a typically regional characteristic in terms of the shell morphological traits. There was an irregular north-south alternating clustering phenomenon. According to the present findings, shell thickness and morphological ratio parameters (ratio of shell height to shell length and ratio of shell width to shell length) are important indicators for evaluating the growth potential and nutritional status of clams in aquaculture. The present results provide a scientific basis for morphological discrimination and germplasm resource evaluation for geographical populations of clams and also aid breeding strategies to predict breeding traits for aquaculture breeding programs, including guidance for the selective breeding of clams.

**Key words** *Ruditapes philippinarum*; Shell morphology; Soft body weight; Path analysis; Cluster analysis