文章编号：1674-5566(2025)03-0499-11 DOI：10. 12024/jsou. 20240704607

不同季节菲律宾蛤仔表型性状与出肉率相关性及通径分析

魏 涛[1,2]，刘雨佳[1,2]，高 榕[2]，易茂龙[2]，郑汉丰[2]，唐保军[1,2]

（1. 上海海洋大学 水产与生命学院，上海 201306；2. 中国水产科学研究院东海水产研究所，上海 200090）

摘 要：为了研究不同季节菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)表型性状与干出肉率之间的相关性，采集了象山港春季群体270个、夏季群体141个、秋季群体55个，分别测量了壳长(X_1)、壳高(X_2)、壳宽(X_3)、后缘长(X_4)、前缘长(X_5)、活体质量(X_6)、软体质量(X_7)和壳质量(X_8)，对软体部脱水后得到干肉质量(X_9)。计算了壳长/壳高(X_{10})、壳长/壳宽(X_{11})、壳高/壳宽(X_{12})、前缘长/后缘长(X_{13})及干出肉率(Y)。通过相关性分析、通径分析、决定系数分析和回归分析，确定了影响蛤仔出肉率的主要性状，建立了出肉率与表型性状的回归方程。结果显示，秋季群体蛤仔的软体质量变异系数最高，形态性状的变异系数相对较低。夏季群体与干出肉率呈显著相关的表型性状最多。通径分析显示壳长、壳高和壳宽是影响干出肉率的重要因素，其中壳宽对菲律宾蛤仔的出肉率影响尤为明显，秋季和春季时壳宽对干出肉率有显著正向影响，夏季时壳高与壳宽的比值对干出肉率有显著负向影响。春季群体干出肉率回归方程：$Y=-9.765+0.888X_1-1.470X_6-0.379X_4+0.609X_3$，$R^2=0.157$；夏季群体干出肉率回归方程：$Y=5.89+0.884X_2-5.473X_{12}-0.413X_5$，$R^2=0.474$；秋季群体干出肉率回归方程：$Y=35.286-11.076X_{11}$，$R^2=0.161$。本研究可为菲律宾蛤仔出肉率选育提供理论参考。

关键词：菲律宾蛤仔；出肉率；表型性状；相关分析；通径分析

中图分类号：S 917.4 **文献标志码：**A

菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)，俗称花蛤，隶属软体动物门(Mollusca)双壳纲(Bivalvia)帘蛤目(Veneroida)帘蛤科(Veneridae)蛤仔属(*Ruditapes*)，具有生长速度快、耐盐耐温性强等特点，广泛分布于中国的辽宁、山东、江苏、浙江、福建等沿海地区[1]。蛤仔不仅味道鲜美，还富含各种必需氨基酸和不饱和脂肪酸等人体所需的营养物质，具有较高的营养价值[2]。中国菲律宾蛤仔的年产量占世界养殖总产量的90%以上，为国内海水贝类产业的发展做出了巨大贡献[3]。长期以来，我国北方地区菲律宾蛤仔养殖苗种主要依靠南方土池育苗获得，长期的异地引种导致蛤仔种质退化、抗逆性差。同时，因育苗的亲贝来自同一地理种群，长期的近亲繁殖导致种质退化，产生个体小型化、生长缓慢、品质下降、存活率低等问题[3-4]。因此，有必要开展菲律宾蛤仔育种研究，培育生长快、品质优良的新品种。

出肉率是评估贝类品质的重要指标，比壳长等性状更具有经济价值，直接影响养殖效益的高低。在贝类出肉率的测量过程中，通常需要解剖待测个体，这就存在一个问题：测定的出肉率较高的个体无法作为亲本进行繁育[5]，而且出肉率性状的测量需解剖大量贝类，工作量较大，有必要建立一种间接的、无损检测方法。因此，找到与出肉率显著相关的表型性状并建立回归方程对于贝类育种工作至关重要。

通径分析是一种多元统计分析方法，由数量遗传学家WRIGHT于1921年首次提出[6]。通过分析贝类表型性状与出肉率之间的相关性，筛选出关联程度较高的性状，可为优良品种的选育提供依据。在海洋贝类中，利用相关分析和通径分

收稿日期：2024-07-29 **修回日期：**2024-10-28

基金项目：中国水产科学研究院东海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2022ZD03)；国家贝类产业体系建设项目(CARS-49)

作者简介：魏 涛(2001—)，男，硕士研究生，研究方向为海水贝类遗传育种。E-mail：wt18020479686@163.com

通信作者：唐保军，E-mail：bjtang@yeah.net

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)
Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0) http://www.shhydxxb.com

析方法研究表型性状与体质量之间的关系已在合浦珠母贝（*Pinctada fucata*）、硬壳蛤（*Mercenaria mercenaria*）、大珠母贝（*Pinctada maxima*）等贝类中进行了大量研究[7-9]。这些研究为海水贝类选育工作提供了参考。在虾类[10]、鱼类[11]中有表型性状与出肉率的研究报道，但在贝类中表型性状与干出肉率之间相关性与通径分析的研究较少[12]。

水生动物的出肉率受季节等因素影响较大。研究[13]发现，四角蛤蜊（*Mactra veneriformis*）的出肉率表现出明显的季节性变化，以4、5、6月为最高。太平洋牡蛎（*Crassostrea gigas*）2龄贝的出肉率随季节变化而波动，在初夏和年底达到高峰，夏季繁殖期则较低[14]。本研究以象山港不同季节的菲律宾蛤仔为研究对象，对其表型性状进行测量，利用相关性分析、通径分析和多元回归分析探究表型性状与干出肉率之间的关联程度，筛选出显著相关的性状并建立回归方程，可为菲律宾蛤仔高出肉率品系的人工选育提供参考。

1 材料与方法

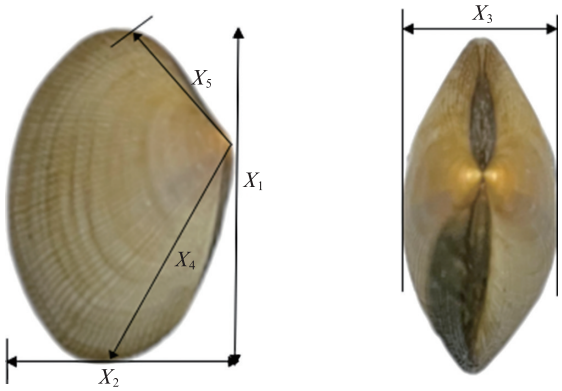
1.1 实验材料

分别于2023年7月、10月和2024年4月从宁波象山港铁港海域采集141个、55个和270个菲律宾蛤仔样本，用保温箱加冰袋运输回实验室后进行测量分析。实验方案遵守中国科学技术部制定的《实验动物伦理待遇指南》。

1.2 数据测量

擦去蛤仔表面的泥沙和水分后，使用游标卡尺（精度为0.01 mm）分别测量壳长（X_1）、壳高（X_2）、壳宽（X_3）、后缘长（X_4）、前缘长（X_5）。解剖后使用电子天平（精度为0.01 g）测量活体质量（X_6）、软体质量（X_7）和壳质量（X_8），将软体部分放入烘箱，60 ℃烘干24 h，测量干肉质量（X_9），最后计算干出肉率（Y）。为充分考量蛤仔的形态特征，将壳长/壳高（X_{10}）、壳长/壳宽（X_{11}）、壳高/壳宽（X_{12}）、前缘长/后缘长（X_{13}）也纳入分析。由壳质量（X_8）和干肉质量（X_9）计算得到干出肉率（Y）：

$$Y=X_9/(X_8+X_9)\times 100\% \quad (1)$$



X_1. 壳长；X_2. 壳高；X_3. 壳宽；X_4. 后缘长；X_5. 前缘长。
X_1. Shell length; X_2. Shell height; X_3. Shell thickness; X_4. Back edge length; X_5. Frond edge length.

图1 菲律宾蛤仔表型性状测量位点

Fig. 1 Measurement sites for phenotypic traits of the *Ruditapes philippinarum*

1.3 数据处理

使用Excel软件整理测得的表型性状数据，计算平均值（Mean）、标准差（SD）及变异系数（CV）。利用SPSS 26.0软件对各性状进行相关性分析；以干出肉率（Y）为因变量，壳长（X_1）、壳高（X_2）、壳宽（X_3）、后缘长（X_4）、前缘长（X_5）、活体质量（X_6）、壳长/壳高（X_{10}）、壳长/壳宽（X_{11}）、壳高/壳宽（X_{12}）和前缘长/后缘长（X_{13}）为自变量，以逐步回归法进行多元回归分析得到直接通径系数并建立最优的回归方程；采用杜家菊等[15]的方法进行通径分析，计算出间接通径系数及决定系数。间接通径系数和决定系数计算公式：

$$\sum r_{ij}P_j=r_{XiXj}\times P_{Xi} \quad (2)$$

$$D_{Xi}=P_{Xi}^{\ 2} \quad (3)$$

$$D_{XiXj}=2r_{XiXj}\times P_{Xi}\times P_{Xj} \quad (4)$$

式中：$\sum r_{ij}P_j$为间接通径系数；P_{Xi}为X_i的直接通径系数；r_{XiXj}为X_i与X_j之间的相关系数；D_i是X_i的决定系数；D_{ij}为X_i、X_j的共同决定系数。

2　结果与分析

2.1　不同季节菲律宾蛤仔表型性状统计结果

不同季节菲律宾蛤仔表型性状的平均值和标准差及单因素方差分析结果见表1。3个季节蛤仔的表型性状均存在显著差异（P>0.05），其中10月各性状的平均值最大，7月各性状平均值最小。

由表2可知：春季蛤仔形态性状的变异系数为6%~7%，夏季蛤仔形态性状的变异系数为7%~11%，秋季蛤仔形态性状的变异系数为6%~8%。活体质量及软体质量的变异系数高于形态性状的变异系数，秋季软体质量的变异系数最大（35%）。干出肉率变异系数大于表型性状的变异系数，但小于活体质量和软体质量的变异系数，其中秋季蛤仔的变异系数大于春季和夏季（31%）。

表1　不同季节象山港群体表型性状的平均值、标准差及单因素方差分析结果

Tab. 1　Average values, standard deviations and results of one-way analysis of variance for phenotypic traits of Xiangshan Bay populations in different seasons

性状 Traits	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn
X_1/mm	31.57±1.93^b	26.87±2.17^c	36.30±2.30^a
X_2/mm	21.52±1.33^b	18.46±1.57^c	26.00±1.73^a
X_3/mm	13.59±0.83^b	11.60±1.34^c	16.51±1.20^a
X_4/mm	24.71±1.61^b	21.59±1.56^c	26.61±1.72^a
X_5/mm	14.99±1.10^b	13.89±1.07^c	16.06±1.26^a
X_6/g	6.02±0.97^b	3.75±0.87^c	9.32±1.80^a
X_7/g	1.43±0.30^b	0.80±0.26^c	2.57±0.90^a
Y/%	0.08±0.02^b	0.08±0.02^c	0.11±0.03^a

注：上标英文小写字母表示群体间的差异程度，字母相同或包含关系表示差异不显著，不同或交集表示差异显著。

Notes: English superscript means the difference among populations. The same superscript or inclusion relation means the differences are not significant, while different superscripts or inclusion relations mean significant differences.

表2　不同季节象山港群体表型性状变异系数

Tab. 2　Coefficient of variation of phenotypic traits of Xiangshan Bay populations in different seasons　%

季节 Season	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	Y
春季 Spring	6	6	6	7	7	16	21	19
夏季 Summer	8	8	11	7	8	23	33	21
秋季 Autumn	6	7	7	6	8	19	35	31

2.2　不同季节菲律宾蛤仔表型性状的相关性分析

菲律宾蛤仔表型性状与干出肉率的相关系数见表3~5。3个季节大多数性状之间都显示出显著或极显著的相关性，但相关程度有所不同。春季蛤仔的干出肉率与壳长、软体质量、壳长/壳高、壳长/壳宽之间呈现极显著正相关（P<0.01），相关系数最高为软体质量（0.548）。夏季蛤仔的大多数表型性状与干出肉率之间都呈极显著相关性（P<0.01），相关系数从大到小依次为软体质量>壳高>活体质量>壳长>壳宽>后缘长>前缘长/后缘长>壳长/壳宽>壳高/壳宽。秋季蛤仔的壳宽、软体质量、壳长/壳宽、壳高/壳宽与干出肉率间呈显著或极显著相关，其余性状与干出肉率未显示出显著相关性（P>0.05）。3个季节蛤仔的干出肉率与壳长/壳宽间均呈显著负相关（P<0.05）。

2.3　不同季节菲律宾蛤仔表型性状对干出肉率的通径分析

以干出肉率为因变量，壳长、壳高、壳宽、前缘长、后缘长、壳长/壳高、壳长/壳宽、壳高/壳宽、前缘长/后缘长、活体质量为自变量，进行通径分析，保留直接通径系数达到显著水平的性状，剔除不显著的性状。分析检验结果见表6，春季蛤仔保留下来的性状包括活体质量、壳长、后缘长、壳宽，夏季蛤仔保留了壳高、前缘长、壳高/壳宽，秋季蛤仔保留了壳长/壳宽。从直接作用的角度看，春季对蛤仔干出肉率影响最大的是壳长（1.079），其次是活体质量（−0.898）和后缘长（−0.383），在间接作用方面，后缘长通过壳长对干出肉率的影响最为显著。在夏季群体中，直

接作用最大的是壳高(0.682),而前缘长通过壳高的间接作用最大。秋季群体只保留了壳长/壳宽,但其与干出肉率呈极显著相关,直接作用为−0.401。

表3 春季象山港群体表型性状与干出肉率的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between phenotypic traits and dry meat yield of Xiangshan Bay populations in spring

性状 Traits	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	Y
X_1	1	0.889**	0.650**	0.886**	0.674**	0.880**	0.793**	0.201**	−0.121*	−0.141*	0.132*	0.164**
X_2		1	0.698**	0.857**	0.728**	0.925**	0.762**	−0.270**	−0.149**	−0.123*	0.034	0.075
X_3			1	0.614**	0.576**	0.762**	0.629**	−0.123*	−0.683**	−0.672**	−0.041	0.094
X_4				1	0.648**	0.834**	0.680**	0.028	−0.108	−0.111	0.287**	0.045
X_5					1	0.729**	0.571**	−0.139*	−0.115*	−0.102	−0.540**	−0.027
X_6						1	0.791**	−0.125*	−0.124*	−0.112	0.008	0.020
X_7							1	0.033	−0.142*	−0.145*	0.040	0.548**
X_{10}								1	0.060	−0.036	0.201**	0.181**
X_{11}									1	0.995**	0.018	−0.127*
X_{12}										1	−0.001	−0.145*
X_{13}											1	0.088
Y												1

注:**表示差异极显著(P<0.01),*表示差异显著(P<0.05)。

Notes: ** indicates the highly significant difference (P<0.01), and * indicates the significant difference (P<0.05).

表4 夏季象山港群体表型性状与干出肉率的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between phenotypic traits and dry meat yield of Xiangshan Bay populations in summer

性状 Traits	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	Y
X_1	1	0.899**	0.708**	0.861**	0.384**	0.946**	0.830**	0.141	−0.015	−0.102	0.425**	0.597**
X_2		1	0.734**	0.764**	0.334**	0.929**	0.806**	−0.303**	−0.192*	−0.001	0.382**	0.610**
X_3			1	0.559**	0.242**	0.755**	0.697**	−0.131	−0.686**	−0.650**	0.280**	0.591**
X_4				1	0.452**	0.805**	0.702**	0.153	0.066	−0.019	0.488**	0.441**
X_5					1	0.378**	0.299**	0.078	0.063	0.018	−0.554**	0.005
X_6						1	0.879**	−0.053	−0.182*	−0.156	0.376**	0.609**
X_7							1	−0.034	−0.209*	−0.199*	0.358**	0.796**
X_{10}								1	0.420**	−0.198*	0.070	−0.100
X_{11}									1	0.805**	0.003	−0.291**
X_{12}										1	−0.034	−0.247**
X_{13}											1	0.402**
Y												1

注:**表示差异极显著(P<0.01),*表示差异显著(P<0.05)。

Notes: ** indicates the highly significant difference (P<0.01), and * indicates the significant difference (P<0.05).

表5　秋季象山港群体表型性状与干出肉率的相关系数

Tab. 5　Correlation coefficients between phenotypic traits and dry meat yield of Xiangshan Bay populations in autumn

性状 Traits	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	Y
X_1	1	0.835**	0.679**	0.910**	0.764**	0.862**	0.512**	0.203	0.267*	0.184	−0.054	0.017
X_2		1	0.832**	0.759**	0.682**	0.926**	0.660**	−0.368**	−0.126	0.172	−0.111	0.160
X_3			1	0.553**	0.533**	0.892**	0.751**	−0.338*	−0.523**	−0.401**	−0.129	0.318*
X_4				1	0.692**	0.746**	0.394**	0.193	0.332*	0.284*	0.138	−0.047
X_5					1	0.683**	0.341*	0.083	0.189	0.190	−0.617**	−0.089
X_6						1	0.722**	−0.188	−0.167	−0.052	−0.114	0.186
X_7							1	−0.309*	−0.387**	−0.244	−0.027	0.797**
X_{10}								1	0.684**	0.016	0.104	−0.263
X_{11}									1	0.740**	0.105	−0.401**
X_{12}										1	0.045	−0.305*
X_{13}											1	0.076
Y												1

注：**表示差异极显著（P<0.01），*表示差异显著（P<0.05）。

Notes: ** indicates the highly significant difference (P<0.01), and * indicates the significant difference (P<0.05).

表6　不同季节象山港群体表型性状对干出肉率的通径分析

Tab. 6　Path analysis of phenotypic traits on dry meat yield in the Xiangshan Bay populations across different seasons

季节 Season	性状 Traits	相关系数 Correlation coefficient	直接作用 Direct effects	间接作用 Indirect effects			
				X_1	X_6	X_4	X_3
春季 Spring	X_1	0.171**	1.079	–	−0.793	−0.344	0.228
	X_6	0.017	−0.898	0.953	–	−0.325	0.286
	X_4	0.047	−0.383	0.969	−0.761	–	0.222
	X_3	0.017	0.317	0.778	−0.810	−0.269	–
				X_2	X_{12}	X_5	
夏季 Summer	X_2	0.610**	0.682	–	0	−0.073	
	X_{12}	−0.247**	−0.242	−0.001	–	−0.004	
	X_5	0.005	−0.218	0.228	−0.004	–	
				X_{11}			
秋季 Autumn	X_{11}	−0.401**	−0.401	–			

注：**表示差异极显著（P<0.01），*表示差异显著（P<0.05）。

Notes: ** indicates the highly significant difference (P<0.01), and * indicates the significant difference (P<0.05).

2.4　不同季节菲律宾蛤仔表型性状对干出肉率的决定系数分析

由表7可以看出，对春季群体干出肉率决定系数最大的性状为壳长（1.165），其次是活体质量（0.806）、后缘长（0.147）以及壳宽（0.100），壳长和活体质量的共同决定系数最大（−1.712）。在夏季群体中，决定系数最大的为壳高（0.465）。秋季群体壳长/壳宽性状的决定系数为0.161。3个季节各性状对干出肉率的决定系数总和分别为0.157、0.474和0.161。

2.5　不同季节菲律宾蛤仔表型性状对干出肉率的多元回归分析

利用逐步回归方法进行多元线性回归分析，并进行显著性检验，保留对干出肉率有显著影响的性状，检验结果如表8所示，保留的性状均能显著影响干出肉率（P<0.05），说明自变量与因变量之间的线性关系显著。尽管3个季节蛤仔的软体质量（X_7）与干出肉率显著相关（P<0.05），由于该性状无法直接测得，在实际的育种工作中难以用来判断蛤仔的出肉率，在建立回归方程时需舍弃该性状。剔除软体

质量后，以干出肉率为因变量建立多元回归方程。

春季群体：

$$Y=-9.765+0.888X_1-1.470X_6-0.379X_4+0.609X_3,\ R^2=0.157 \quad (5)$$

夏季群体：

$$Y=5.89+0.884X_2-5.473X_{12}-0.413X_5,\ R^2=0.474 \quad (6)$$

秋季群体：

$$Y=35.286-11.076X_{11},\ R^2=0.161 \quad (7)$$

式中：X_1为壳长，mm；X_2为壳高，mm；X_3为壳宽，mm；X_4为后缘长，mm；X_5为前缘长，mm；X_6为活体质量，g；X_{11}为壳长/壳宽；X_{12}为壳高/壳宽；Y为干出肉率，%。

表7 不同季节象山港群体表型性状对干出肉率的决定系数

Tab. 7 Determination coefficients of phenotypic traits on dry meat yield in the Xiangshan Bay populations across different seasons

季节 Season		性状 Traits				总和 Sum
		X_1	X_6	X_4	X_3	
春季 Spring	X_1	1.165				0.157
	X_6	−1.712	0.806			
	X_4	−0.743	0.583	0.147		
	X_3	0.493	−0.513	-0.170	0.100	
		X_2	X_{12}	X_5		
夏季 Summer	X_2	0.465				0.474
	X_{12}	0	0.059			
	X_5	−0.099	0.002	0.047		
		X_{11}				
秋季 Autumn	X_{11}	0.161				0.161

表8 不同季节象山港群体干出肉率回归方程中回归系数显著性检验

Tab. 8 Significance tests of regression coefficients in the regression equations for the dry meat yield in the Xiangshan Bay populations across different seasons

季节 Season	性状 Traits	偏回归系数 Partial regression coefficient		标准化回归系数 Standardized regression coefficient	t	P	VIF
		B	标准误差				
春季 Spring	常量	−9.765	3.992		−2.446	0.015	
	X_1	0.888	0.128	1.079	6.920	0	7.649
	X_6	−1.470	0.349	−0.898	−4.216	0	14.253
	X_4	−0.379	0.132	−0.383	−2.878	0.004	5.572
	X_3	0.609	0.271	0.317	2.244	0.026	6.265
夏季 Summer	常量	5.890	2.926		2.013	0.046	
	X_2	0.884	0.085	0.682	10.382	0	1.126
	X_{12}	−5.473	1.399	−0.242	−3.913	0	1.000
	X_5	−0.413	0.124	−0.218	−3.321	0.001	1.126
秋季 Autumn	常量	35.286	7.677		4.596	0	
	X_{11}	−11.076	3.479	−0.401	−3.184	0.002	1.000

注：t值为偏回归系数（B）与其标准误差的比值，当$|t|>2$或$P<0.05$时，该回归系数具有统计学显著性。

Notes: The t-value is the ratio of the partial regression coefficient (B) to its standard error. A regression coefficient is considered statistically significant when the absolute t-value exceeds 2 or the associated P-value falls below 0.05.

3 讨论

3.1 不同季节菲律宾蛤仔群体变异系数和相关性分析

变异系数是用于衡量数据变异程度的相对统计量，通常用于比较具有不同均值的两个或多个样本数据的变异程度。利用变异系数可以有效比较不同组别数据的离散程度，有助于分析数据的异质性，并为进一步的数据分析提供基础。邹杰等[16]指出，进行数据分析时，变异系数应小

于15%，否则数据可能存在异常。在本研究中，3个季节蛤仔软体质量、活体质量和干出肉率的变异系数均超过了15%。梁健等[17]统计的3个不同地理群体的菲律宾蛤仔的活体质量和软体质量的变异系数在30%~40%，与本研究相似。野生大珠母贝的活体质量和壳质量的变异系数均超过了15%，分别为37.9%和41.8%[18]。雄性香港巨牡蛎（*Crassostrea hongkongensis*）软体质量变异系数为29.3%，雌牡蛎为28.85%[19]。这些研究表明，贝类活体质量及软体质量的变异程度较大。变异系数较高的现象不仅揭示了贝类出肉率在不同季节和不同个体之间的显著差异，还反映了贝类在生长和发育过程中对环境变化的敏感性。

贝类出肉率易受到多种因素的影响，例如水温、盐度、水质、品种、贝龄和养殖密度等[20-21]。单因素方差分析结果显示，3个季节蛤仔活体质量、软体质量及出肉率之间均存在显著差异。这可能因为夏秋季节水温较高，浮游植物生长旺盛，贝类摄食率高，生长能增大；冬季时生长能迅速下降，能量代谢较低[22]。菲律宾蛤仔的繁殖高峰期为4—6月和8—10月[3]，冬季蛤仔生长缓慢，故在取样时排除了冬季，主要分析春夏秋蛤仔表型性状与出肉率之间的关系，这3个季节的测量分析数据可以为蛤仔的选育提供参考。

较高的出肉率意味着更多可用的贝肉，从而提高养殖者的收益。孙泽鹏等[12]测得的菲律宾蛤仔平均出肉率为29.03%，与本研究有所差异。本研究选择干出肉率作为因变量，有助于减少因含水量变化而对鲜出肉率产生的影响，从而提高数据的准确性。在针对菲律宾蛤仔的干出肉率选育时，需要找到与出肉率相关性高的性状。本研究发现，干出肉率与3个季节蛤仔的壳高/壳宽及壳长/壳宽有较高的相关性。壳高/壳宽主要反映壳的宽度相对于其高度的比例，可用来评估壳的凸度或扁平程度，壳长/壳宽主要反映壳的宽度相对于其长度的比例，可用来评估壳的紧凑程度[23]。本研究中，壳高/壳宽、壳长/壳宽分别在夏秋季时与干出肉率呈显著负相关，表明象山港地区菲律宾蛤仔的干出肉率与壳形有关，且两个比值越低，越接近球形，干出肉率越高。在现有研究中，也存在蛤仔呈球状但出肉率较低的现象，武禹安[24]在对菲律宾蛤仔5个群体的表型性状比较中发现，大连群体的壳形宽且形态饱满，但该群体的出肉率低于斑马蛤群体和葫芦岛群体，说明在分析出肉率与表型性状的相关性时，应考虑季节等环境因素的影响。

3.2　影响不同季节群体菲律宾蛤仔出肉率的主要因素分析

为了更深入地了解变量之间的关系，需要采用更高级的分析方法，如通径分析和多元回归分析[25]。本研究中，通径分析结果显示春季群体壳长、活体质量直接通径系数较高。虽然壳宽、后缘长的直接通径系数不高，但是仍达到了显著影响水平从而得到保留。夏季群体壳高的直接作用最大，其次是前缘长和壳高/壳宽；秋季群体只保留了壳长/壳宽。结合相关分析与通径分析，壳宽、壳长/壳宽及壳长/壳宽与干出肉率关联程度较高，并且这3个性状均与壳宽有关，因此在进行以出肉率为目标的选育时要将壳宽重点纳入考虑范围。

决定系数分析结果显示，春季、夏季、秋季群体的总决定系数为0.157、0.474和0.161，均小于0.85，这表明在本实验中所选择的性状尚不足以精确预测菲律宾蛤仔的出肉率[26]。研究认为，性腺重量是影响软体质量的因素之一，菲律宾蛤仔的性腺重量有季节的周期性变化，这种变化增加了出肉率的不确定性[27]。因此，为了更准确地预测菲律宾蛤仔的出肉率，还需要探索更多的表型性状。不同地理群体织锦巴非蛤（*Paphia textile*）表型性状对其质量影响不同，且外韧带长和前缘长对织锦巴非蛤软体质量有一定影响[28]。刁宏山等[29]在研究钝缀锦蛤（*Tapes dorsatus*）时发现，壳长、壳高和壳宽是影响其活体质量的主要因素。对不同贝龄的栉孔扇贝（*Chlamys farreri*）研究发现：1龄时湿重主要受壳长和壳高影响，2龄时湿重主要受壳高和壳宽影响[30]。

在出肉率与各性状的通径分析中，自变量无法准确预测出肉率的问题一直存在[10, 31-32]。多元回归分析的显著性检验结果表明，所有偏回归系数均达到显著水平（$P<0.05$），这说明虽然该方程还不够精确，但出肉率与这些性状间仍存在显著的线性关系。因此，可以通过这些性状对出肉率进行估计，在实际育种工作中具有一定的参考价值。

3.3 多重共线性问题考量下的各季节干出肉率回归分析

本研究中，菲律宾蛤仔的活体质量，包括软体质量和壳质量，存在显著的共线性。由于壳质量是活体质量的一部分，且软体质量不易直接测量，故本研究在建立回归方程时选择排除了这2个变量。方差膨胀因子（VIF）是一种用于评估多重共线性的统计指标，它衡量了由于多重共线性而导致的回归系数估计的不稳定性程度。由表8可知，只有春季蛤仔活体质量的VIF值超过了10，这表明活体质量与干出肉率之间存在一定的共线性[33]。尽管共线性会对结果产生影响，但其影响的严重程度取决于共线性的程度以及研究的具体情况。除了活体质量之外，进入方程的其他性状的VIF值均在10以下，这表明模型的拟合是可靠的。

相关系数的大小并不直接决定变量的直接通径系数。本研究中，活体质量、前缘长、壳宽和后缘长与干出肉率之间的相关性较弱，但这些性状在回归分析中仍被纳入到各自方程中[34]。最终得到的估计出肉率回归方程表明：在春季，壳宽、壳长、后缘长和活体质量对干出肉率有正向影响。夏季的模型显示壳高与壳宽的比值对干出肉率有显著的负向影响，而壳高本身有正向影响。秋季的模型显示壳长与壳宽的比值对干出肉率有显著的负向影响。

通过比较不同季节菲律宾蛤仔的表型性状与出肉率的关系，可在特定季节有针对性地选择具有较高出肉率潜力的性状进行选育。通过多元回归方程，可以量化不同性状对出肉率的具体影响，通过选择具有最佳预测值的性状组合，提高育种效率。通径分析有助于理解不同性状如何直接和间接影响出肉率，从而制定适宜的育种策略。本研究可为不同季节菲律宾蛤仔高出肉率品系的选育提供基础数据和理论指导。

4 结论

本研究测量了象山港不同季节菲律宾蛤仔群体的表型性状，并进行了相关性分析和通径分析。结果表明壳长、壳高、壳宽均能显著影响象山港群体菲律宾蛤仔的干出肉率。壳宽对干出肉率有正向影响，3个季节蛤仔壳宽的增加均有助于提高干出肉率。在选育高出肉率的蛤仔时，应重点考虑与菲律宾蛤仔壳宽相关的性状。同时，壳高、壳长也是一个重要的考虑因素，在夏秋季，壳高、壳长与壳宽的比值对干出肉率有显著负向影响。因此，选择壳形凸出紧凑的蛤仔会带来更高的干出肉率。本研究结果可为菲律宾蛤仔的良种选育科学依据，有助于优化蛤仔的出肉率表现，提高养殖效益和可持续发展。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献：

[1] 吴耀泉. 中国近海菲律宾蛤仔的生态研究[J]. 海洋科学集刊，1995(1)：213-216.
WU Y Q. Ecological studies on *Ruditapes philippinarum* in the Chinese coast[J]. Studia Marina Sinica，1995(1)：213-216.

[2] 杨金兰，李刘冬，黄珂，等. 菲律宾蛤仔全脏器的营养成分分析与评价[J]. 中国渔业质量与标准，2014，4(2)：26-31.
YANG J L，LI L D，HUANG K，et al. Analysis and evaluation on nutrients in whole viscera of *Ruditapes philippinarum* [J]. Chinese Fishery Quality and Standards，2014，4(2)：26-31.

[3] 闫喜武. 菲律宾蛤仔养殖生物学、养殖技术与品种选育[D]. 青岛：中国科学院研究生院(海洋研究所)，2005.
YAN X W. The culture biology and technology and selective breeding in Manila clam，*Ruditapes philippinarum*[D]. Qingdao：Institute of Oceanology，Chinese Academy of Sciences，2005.

[4] 闫喜武，霍忠明，张跃环，等. 菲律宾蛤仔白斑马蛤[J]. 中国水产，2017(12)：72-74.
YAN X W，HUO Z M，ZHANG Y H，et al. *Ruditapes philippinarum* with zebra-patterned shells and a dark stripe on the valve[J]. China Fisheries，2017(12)：72-74.

[5] VAN SANG N，THOMASSEN M，KLEMETSDAL G，et al. Prediction of fillet weight，fillet yield，and fillet fat for live river catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*)[J]. Aquaculture，2009，288(3/4)：166-171.

[6] 张琪，丛鹏，彭励. 通径分析在Excel和SPSS中的实现[J]. 农业网络信息，2007(3)：109-110，91.
ZHANG Q，CONG P，PENG L. Implementation of path analysis in Excel and SPSS[J]. Agriculture Network Information，2007(3)：109-110，91.

[7] 陈健，白丽蓉，罗会，等. 2种贝龄合浦珠母贝数量性状的相关与通径分析[J]. 南方农业学报，2020，51(10)：2557-2564.
CHEN J，BAI L R，LUO H，et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of pearl oyster *Pinctada*

fucata at two different ages［J］. Journal of Southern Agriculture，2020，51（10）：2557-2564.

［8］ 王元宁，李华煜，孟良，等．三种壳色硬壳蛤（*Mercenaria mercenaria*）的生长性状差异及通径分析［J］. 海洋科学，2023，47（8）：23-32.
WANG Y N，LI H Y，MENG L，et al. Differences in the growth traits and path analysis of the three shell colors of *Mercenaria mercenaria*［J］. Marine Sciences，2023，47（8）：23-32.

［9］ 张钰伟，邓正华，黄星美，等．三亚和北海群体大珠母贝表型性状比较及通径分析［J］. 中国渔业质量与标准，2023，13（4）：24-31.
ZHANG Y W，DENG Z H，HUANG X M，et al. Comparison and path analysis of phenotypic traits of *Pinctada maxima* in Sanya and Beihai populations［J］. Chinese Fishery Quality and Standards，2023，13（4）：24-31.

［10］ 张倩，王全超，于洋，等．凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）形态性状与净肉重和出肉率的关系［J］. 海洋与湖沼，2018，49（3）：653-661.
ZHANG Q，WANG Q C，YU Y，et al. Correlation of morphometric attributes to net weight and fillet yield of *Litopenaeus vannamei*［J］. Oceanologia et Limnologia Sinica，2018，49（3）：653-661.

［11］ 姜绪，林香青，马惠，等．5月龄大口黑鲈形态性状与体重的相关及通径分析［J］. 山东农业科学，2020，52（5）：124-129.
JIANG X，LIN X Q，MA H，et al. Correlation and path analysis on body weight and morphometric traits of 5-month-old *Micropterus salmoides*［J］. Shandong Agricultural Sciences，2020，52（5）：124-129.

［12］ 孙泽鹏，夏青，段海宝，等．4种常见帘蛤目贝类表观性状与出肉率通径分析［J］. 海洋渔业，2023，45（3）：372-378.
SUN Z P，XIA Q，DUAN H B，et al. Path analysis of apparent traits and meat yield of four common clam species of Veneroida［J］. Marine Fisheries，2023，45（3）：372-378.

［13］ 王李宝，凌云，黎慧，等．不同季节四角蛤蜊软体中主要营养成分分析［J］. 水产养殖，2013，34（1）：4-6.
WANG L B，LING Y，LI H，et al. Analysis of nutritional compositions in *Mactra venerformis* muscles with the seasonal changes［J］. Journal of Aquaculture，2013，34（1）：4-6.

［14］ 王志松，孙景伟，刘忠颖，等．太平洋牡蛎2龄贝的生长［J］. 水产科学，2000，19（6）：17-18.
WANG Z S，SUN J W，LIU Z Y，et al. Growth of the second-years Pacific oyster（*Greasstrea gigas*）［J］. Fisheries Science，2000，19（6）：17-18.

［15］ 杜家菊，陈志伟．使用SPSS线性回归实现通径分析的方法［J］. 生物学通报，2010，45（2）：4-6.
DU J J，CHEN Z W. Method of path analysis with SPSS linear regression［J］. Bulletin of Biology，2010，45（2）：4-6.

［16］ 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.
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.

［17］ 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［J］. 水产科学，2020，39（1）：40-47.
LIANG J，WANG J J，GUO Y J，et al. Correlation and path analysis of phenotypic traits in different geographical groups of Manila clam *Ruditapes philippinarum*［J］. Fisheries Science，2020，39（1）：40-47.

［18］ 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.
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.

［19］ 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.
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.

［20］ 范超，温子川，霍忠明，等．盐度胁迫对不同发育时期菲律宾蛤仔生长和存活的影响［J］. 大连海洋大学学报，2016，31（5）：497-504.
FAN C，WEN Z C，HUO Z M，et al. Influence of salinity stress on growth and survival of Manila clam *Ruditapes philippinarum* at various developmental stages［J］. Journal of Dalian Ocean University，2016，31（5）：497-504.

［21］ 吴磊，涂康，周丽青，等．温度、盐度和密度对菲律宾蛤仔稚贝生长和存活的影响［J］. 中国海洋大学学报（自然科学版），2024，54（1）：58-66.
WU L，TU K，ZHOU L Q，et al. Effects of temperature，salinity，and density on the growth and survival in spats of clam（*Ruditapes philippinarum*）［J］. Periodical of Ocean University of China，2024，54（1）：58-66.

［22］ 范建勋．文蛤能量代谢的研究［D］. 宁波：宁波大学，2010.
FAN J X. Studies on metabolism of *Meretrix meretrix* Linnaeus［D］. Ningbo：Ningbo University，2010.

［23］ HUO Z M，WANG Z X，LI D D，et al. Shell shape polymorphism analysis of the Manila clam *Ruditapes philippinarum* across different geographical populations in

China [J]. Frontiers in Marine Science, 2024, 11: 1328752.

[24] 武禹安. 菲律宾蛤仔群体间壳形态及生长性状比较研究[D]. 大连：大连海洋大学，2018.
WU Y A. Comparative study on the properties of the shell type of *Ruditapes philippinarum* in China, Japan and North Korea [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2018.

[25] 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.
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.

[26] 刘小林，吴长功，张志怀，等. 凡纳对虾形态性状对体重的影响效果分析[J]. 生态学报，2004，24(4)：857-862.
LIU X L, WU C G, ZHANG Z H, et al. Mathematical analysis of effects of morphometric attributes on body weight of *Penaeus vannamei*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 857-862.

[27] 尹聪，邱焗维，刁宏山，等. 不同地理群体织锦巴非蛤表型性状的相关性及通径分析[J]. 南方农业学报，2023，54(6)：1868-1875.
YIN C, QIU J W, DIAO H S, et al. Correlation and path analysis of phenotypic traits in different geographical groups of *Paphia textile* (Gmelin) [J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(6): 1868-1875.

[28] HUO Z M, YAN X W, ZHAO L Q, et al. Effects of shell morphological traits on the weight traits of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 251-256.

[29] 刁宏山，赖胜琪，尹聪，等. 北部湾海域不同地理群体钝缀锦蛤表型性状的相关分析与通径分析[J]. 安徽农业科学，2023，51(18)：87-93.
DIAO H S, LAI S Q, YIN C, et al. Correlation analysis and path analysis of the phenotypic characters of *Tapes dorsatus* from different geographical populations in Beibu Gulf[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(18): 87-93.

[30] 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.
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.

[31] 柴展，栾生，罗坤，等. 基于家系水平的凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)保种群体出肉率与表型性状的相关性分析[J]. 渔业科学进展，2015，36(6)：63-70.
CHAI Z, LUAN S, LUO K, et al. Correlation analysis of fillet yield with phenotypic traits for families from conservation population of *Litopenaeus vannamei* [J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(6): 63-70.

[32] 王庆春，陶易凡，李岩，等. 不同大口黑鲈群体形态性状与体重和出肉率的相关性及通径分析[J]. 中国水产科学，2023，30(5)：617-629.
WANG Q C, TAO Y F, LI Y, et al. Effects of morphological traits on body weight and fillet yield of largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(5): 617-629.

[33] 王辉，刘志刚，符世伟. 南海毛蚶形态特征对体重的相关分析[J]. 热带海洋学报，2007，26(6)：58-61.
WANG H, LIU Z G, FU S W. Correlation between morphological traits and body weight of *Scapharca subcrenata* from South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(6): 58-61.

[34] 孙俭，王国栋，周玮，等. 三个海湾扇贝群体可量性状对闭壳肌重的通径分析[J]. 河北渔业，2017(3)：31-36.
SUN J, WANG G D, ZHOU W, et al. Path analysis of quantitative traits in three Atlantic bay scallop (*Argopecten irradians*) populations influencing adductor muscle weight[J]. Hebei Fisheries, 2017(3): 31-36.

Correlation and path analysis of phenotypic traits on meat yield of *Ruditapes philippinarum* in different seasons

WEI Tao[1,2], LIU Yujia[1,2], GAO Rong[2], YI Maolong[2], ZHENG Hanfeng[2], TANG Baojun[1,2]

(1. *College of Fisheries and Life Science*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*; 2. *East China Sea Fisheries Research Institute*, *Chinese Academy of Fishery Sciences*, *Shanghai* 200090, *China*)

Abstract: In order to study the correlation between phenotypic traits and dry meat yield of *Ruditapes philippinarum* in different seasons, 270 individuals in spring, 141 individuals in summer, and 55 individuals in autumn were sampled in Xiangshan Bay, respectively. The shell length (X_1), shell height (X_2), shell width (X_3), back edge length (X_4), frond edge length (X_5), live body mass (X_6), soft part mass (X_7), and shell mass (X_8) were measured. The dry meat weight (X_9) was then obtained by dehydrating the soft part mass. SL/SH (X_{10}), SL/SW (X_{11}), SH/SW (X_{12}), FEL/BEL (X_{13}) and dry meat yield were calculated. Correlation analysis, path analysis, determination coefficient analysis, and regression analysis were conducted to identify the main traits affecting the meat yield of the clams and to establish regression equations. The results showed that the coefficient of variation for the soft part mass of the autumn populations was the highest, while the coefficient of variation for morphological traits was relatively lower. In summer, the number of phenotypic traits significantly correlated with dry meat yield were the highest. Path analysis indicated that shell length, shell height, and shell width were important factors affecting dry meat yield. In particular, shell width had a significant positive impact on the meat yield of the *R. philippinarum*, especially in autumn and spring. In summer, the ratio of shell height to shell width had a significant negative impact on dry meat yield. The regression equation for the dry meat yield of the spring population is: $Y=-9.765+0.888X_1-1.470X_6-0.379X_4+0.609X_3$, $R^2=0.157$. The regression equation for the dry meat yield of the summer population is: $Y=5.89+0.884X_2-5.473X_{12}-0.413X_5$, $R^2=0.474$. The regression equation for the dry meat yield of the autumn population is: $Y=35.286-11.076X_{11}$, $R^2=0.161$. These research findings provide theoretical reference for the selection of high meat yield strains in *R. philippinarum*.

Key words: *Ruditapes philippinarum*; meat yield; phenotypic traits; correlation analysis; path analysis