紫贻贝体尺性状和体质量性状对足丝性状的影响分析

张守都[1,4], 张　伟[1,4], 李永仁[2], 赵文溪[1,4], 彭慧婧[3], 邹　杰[3], 宋爱环[1,4]

(1. 山东省海洋科学研究院(青岛国家海洋科学研究中心), 山东 青岛 266104; 2. 天津农学院, 天津 300384; 3. 广西海洋研究所有限责任公司, 广西 北海 536000; 4. 青岛市海洋生物种质资源挖掘与利用工程实验室 山东 青岛 266104)

摘要: 为研究紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)体尺性状和体质量性状对足丝性状的影响, 作者选取山东省青岛市即墨养殖区的紫贻贝为研究对象, 分别测量壳长、壳宽、壳高等 3 个体尺性状, 全湿质量、软体质量 2 个体质量性状以及足丝直径和足丝茎直径 2 个足丝性状, 通过相关性分析、多元回归分析和通径分析等方法分别研究了体尺性状和体质量性状对足丝性状的影响。结果显示: 所有性状间相关系数为 0.678~0.892, 性状间相关性达到极显著水平(P<0.01); 多元回归和通径分析结果显示, 壳高和全湿质量分别对足丝性状的影响最大, 壳高对足丝性状通径系数分别为 0.515 和 0.508, 全湿质量对足丝性状分别为 0.417 和 0.520; 建立了体尺性状、体质量性状对足丝直径和足丝茎直径的回归方程。

关键词: 紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*); 体尺性状; 足丝; 相关性分析; 通径分析

中图分类号: S917.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2022)12-0169-08

DOI: 10.11759/hykx20220422003

紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)营养价值丰富, 蛋白质含量高, 亦含有 8 种人体必需的氨基酸和丰富的钙、磷、铁、锌和维生素 B, 素有“海洋鸡蛋”的美誉[1], 从 20 世纪 70 年代开始大量人工养殖以来[2], 目前已经发展成为中国第四大贝类养殖品种, 2020 年中国贻贝养殖面积达 44 054 公顷, 产量达到 88.69 万吨[3]。

国内外通常采用筏式延绳的方式进行大规模商业养殖[4, 5], 由于在养殖过程中存在不同程度的脱落现象, 贻贝的足丝附着力成为一个关系产量的重要经济性状。围绕足丝国内外开展了大量生态和行为学研究, PRICE[6]研究认为贻贝足丝附着力同足丝的年龄和长度分别存在负相关和正相关, JOSE 等[7]研究发现海浪和规格大小对紫贻贝的足丝性状及附着力具有显著的影响, NEWCOMB 等[8]研究发现随着温度的升高对足丝分泌和足丝的近端区域具有明显的削弱现象, GEORGE 等[9]研究发现随着 pH 值和溶氧的降低显著减少了贻贝足丝的分泌数量, 从而降低了附着力。ZHAO 等[10]研究发现水下噪音显著降低了厚壳贻贝的足丝分泌, 总体足丝附着强度下降了 16.95%~44.50%。

相关性分析和通径分析是研究目标性状和其他性状之间关系的重要手段, 是开展间接选择育种的重要基础性工作。在牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)[11]、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)[12]、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)[13]、华贵栉孔扇贝(*Chlamys nobilis*)[14]和毛蚶(*Scapharca subcrenata*)[15]等双壳贝类中已经开展了大量的研究, 均发现表型性状之间存在显著的相关性, 同时对全湿质量或软体质量存在显著的决定作用, 为上述物种的选择育种提供了有效参考。在紫贻贝和厚壳贻贝中也开展了不同地区、不同情境下的体尺性状同全湿质量等性状的相关性分析和通径分析研究, 朱爱意等[16]研究了舟山近海紫贻贝体尺性状的相关性, 发现壳长与壳高、壳宽、壳重、软组织湿质量均存在显著相关, 而雌雄群体在壳长, 壳宽, 壳高, 体质量等指标上无显著性差异。陆雅凤等[17]对东极厚壳贻贝(*Mytilus coruscus*)养殖群体体尺性状进行了相关性与通径分析, 发现表型性状之间均达到显著相关, 认为在厚壳贻贝育种计划中可以壳高为选择目标。张新明等[18]通过相关性分析和通径分析方法对日照海域紫贻贝体尺性状对体质量的影响进行了研究, 发现体尺性状和体

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-06-17

基金项目: 山东省农业良种工程项目(2021LZGC027); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2021024)

[Foundation: The Earmarked Fund for Agriculture Seed Improvement Project of Shandong Province, No. 2021LZGC027; The Central Guidance Fund on Local Science and Technology Development, No. YDZX2021024]

作者简介: 张守都(1984—), 男, 山东日照人, 副研究员, 主要从事贝类遗传育种和健康养殖学研究, 电话: 0532-89016564, E-mail: shouduzhang@163.com; 邹杰, 通信作者, 电话: 18177963125, E-mail: 229566654@qq.com; 宋爱环, 通信作者, E-mail: zjusah@163.com

质量性状相关性非常显著，影响体质量和壳重的主要因子是壳长和壳宽，影响软体质量的主要因子是壳长，为协同选择提供了参考。

迄今，贻贝体尺性状、体质量性状与足丝性状的相关性及通径分析还未见报道。作者用相关性分析和通径分析等方法研究了山东省青岛市即墨养殖海区紫贻贝壳长、壳宽、壳高、全湿质量、软体质量同足丝直径和足丝茎直径等性状之间的相关性，建立了回归方程，可为贻贝的选择育种和养殖方式改良提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 材料来源

2022 年 3 月，在青岛市即墨区贝类养殖海区筏架随机采集野生紫贻贝 106 个，贝龄约为 12 月龄。

1.2 数据测量

相关指标定义：足丝茎根部直径是指贻贝足丝柄部发生器最新分泌露出体外的足丝茎的直径；足丝直径是指生长在足丝茎上的足丝的临近足丝茎根部的直径。

样品带回实验室后洗刷贝的表面，去除外表附着物并擦干体表，用游标卡尺测量其壳长、壳高、壳宽、足丝茎根部直径等指标，精确到 0.01 mm。用电子天平称量全湿质量，然后解剖称量软体质量，精确到 0.01 g。用尼康 YS100 摄像显微镜的 S-Viewer 软件测量足丝根部直径，精确到 0.1 μm，每个个体测量 5 根最新形成足丝并取平均值作为个体足丝直径值(BT)。

1.3 数据分析

各性状测定结果经统计分析，计算均值、标准差和变异系数，利用 SPSS19.0 统计分析软件对各变量进行正态性检验、相关性和通径分析，各性状变量的正态检验采用 Kolmogorov-Smirnov 法，相关系数采用 Pearson 相关系数。以足丝直径和足丝茎直径为因变量，以壳长、壳宽、壳高等体尺性状和全湿质量、软体质量等体质量性状为自变量，在进行多重共线性诊断基础上，分别利用逐步回归分析自变量对因变量的直接作用和间接作用，建立最优多元回归方程。相关计算和分析方法参照邹杰等[19]的方法进行。

2 结果与分析

2.1 表型参数统计

各个性状的表型性状参数统计见表 1，各性状参数经 Kolmogorov-Smirnov 检验，符合正态分布特征(P>0.05)。7 个表型性状的变异系数由大到小依次为：软体质量、全湿质量、足丝茎直径、足丝直径、壳高、壳长、壳宽、壳高。

表 1 紫贻贝表型性状描述性参数统计(n=106)

Tab. 1 Descriptive statistical analysis of the phenotypic traits of *Mytilus galloprovincialis*(n=106)

参数	壳长/mm	壳高/mm	壳宽/mm	全湿质量/g	软体质量/g	足丝直径/μm	足丝茎直径/mm
平均值	58.28	23.29	29.68	20.02	6.52	170.3	1.69
标准差	7.21	3.03	3.64	7.11	2.56	24.6	0.28
变异系数(%)	12.37	13.00	12.26	35.52	39.29	14.5	16.34

2.2 各性状间的相关性分析

各性状的相关性分析结果见表 2，不同性状间呈极显著正相关(P<0.01)，表明所选指标进行相关性分析具有重要的分析价值。壳长、壳高、壳宽等体尺性状同全湿质量和软体质量等体质量性状相关性较高，而体尺性状和体质量性状同足丝直径、足丝茎直径等足丝性状的相关系数相对较低。考虑到体尺性状和体质量性状间相关系数多大于 0.8 和样本量小于 5 000，上述自变量间存在共线性的可能，但经多重共线性诊断，方差膨胀因子均低于 10，未达到显著水平。

2.3 表型性状的偏回归分析和通径分析

以壳长、壳高、壳宽等体尺性状和全湿质量、软体质量等质量性状分别对足丝直径性状和足丝茎性状进行回归分析，受共线性影响较大的壳长性状被剔除，对足丝直径性状和足丝茎直径性状影响达到显著水平(P<0.01)的壳宽、壳高 2 个体尺性状以及全湿质量、软体质量 2 个体质量性状保留(表 3、表 4)，体尺性状中壳高对足丝直径和足丝茎直径影响较大，通径系数分别为 0.515 和 0.508，壳高通过壳宽的间接通径系数分别为 0.370 和 0.365(表 5)，

表 2　紫贻贝表型性状间相关系数(*n*=106)

Tab. 2　Correlation coefficients of the phenotypic traits of *Mytilus galloprovincialis* (*n*=106)

性状	壳长	壳高	壳宽	全湿质量	软体质量	足丝直径	足丝茎直径
壳长	1	0.804**	0.892**	0.891**	0.840**	0.845**	0.869**
壳高	—	1	0.718**	0.835**	0.746**	0.678**	0.751**
壳宽	—	—	1	0.858**	0.815**	0.737**	0.785**
全湿质量	—	—	—	1	0.877**	0.706**	0.770**
软体质量	—	—	—	—	1	0.695**	0.741**
足丝直径	—	—	—	—	—	1	0.728**
足丝茎直径	—	—	—	—	—	—	1

注: **. 相关性达到极显著水平(P<0.01)

表 3　紫贻贝体尺性状对足丝性状的偏回归系数检验(*n*=106)

Tab. 3　Test of the partial regression coefficients of the body measurement traits on the byssus traits in *Mytilus galloprovincialis* (*n* =106)

足丝性状	参数	偏回归分析	标准误差	回归系数	T 值	显著性
足丝直径	常数	8.427	13.431	—	0.627	0.532
	壳宽	2.505	0.739	0.308	3.392	0.001**
	壳高	3.486	0.614	0.515	5.675	0.000**
足丝茎直径	常数	–0.089	0.117	—	–0.761	0.448
	壳宽	0.032	0.006	0.386	4.885	0.000**
	壳高	0.035	0.005	0.508	6.440	0.000**

注: *. 相关性达到显著水平(P<0.05), **. 相关性达到极显著水平(P<0.01)

表 4　紫贻贝体质量性状对足丝性状的偏回归系数检验(*n*=106)

Tab. 4　Test of the partial regression coefficients of the weight traits on the byssus traits in *Mytilus galloprovincialis* (*n*=106)

足丝性状	参数	偏回归分析	标准误差	回归系数	T 值	显著性
足丝直径	常数	120.712	5.010	—	24.096	0.000**
	全湿质量	1.443	0.490	0.417	2.945	0.004**
	软体质量	3.171	1.360	0.330	2.331	0.022*
足丝茎直径	常数	1.129	0.045	—	24.838	0.000**
	全湿质量	0.018	0.004	0.520	4.067	0.000**
	软体质量	0.028	0.012	0.285	2.230	0.028*

注: *.相关性达到显著水平(P<0.05), **.相关性达到极显著水平(P<0.01)

表 5　紫贻贝体尺性状对足丝性状的通径分析(*n*=106)

Tab. 5　Path analysis of the body measurement traits to the byssus traits of *Mytilus galloprovincialis* (*n*=106)

足丝性状	体尺性状	相关系数	直接作用	间接作用		
				壳宽	壳高	合计
足丝直径	壳宽	0.678	0.308	—	0.370	0.678
	壳高	0.737	0.515	0.221	—	0.736
足丝茎直径	壳宽	0.751	0.386	—	0.365	0.751
	壳高	0.785	0.0508	0.277	—	0.785

说明壳高是影响足丝直径和足丝茎直径的主要因素，而在体质量性状对足丝性状影响分析中，全湿质量对足丝直径和足丝茎直径影响较大，通径系数分别达到 0.417 和 0.520，软体质量通过全湿质量的间接通径系数分别为 0.366 和 0.456，说明全湿质量是影响足丝直径和足丝茎直径的主要因素(表 6)。

表 6　紫贻贝体质量性状对足丝性状的通径分析(n=106)

Tab. 6　Path analysis of the weight traits to the byssus traits of *Mytilus galloprovincialis*(n=106)

足丝性状	质量性状	相关系数	直接作用	间接作用		
				壳宽	壳高	合计
足丝直径	全湿质量	0.706	0.417	—	0.289	0.706
	软体质量	0.695	0.330	0.366	—	0.696
足丝茎直径	全湿质量	0.770	0.520	—	0.250	0.770
	软体质量	0.741	0.285	0.456	—	0.741

2.4　表型性状对足丝性状决定程度分析

体尺性状和体质量性状对足丝性状的决定程度分析分别见表 7 和表 8。对体尺性状分析中，壳高对足丝性状的直接决定系数分别为 0.265 和 0.258，而壳宽的直接决定系数为 0.095 和 0.149，而通过壳高的间接决定系数分别达到 0.228 和 0.282，说明在体尺性状中壳高是决定足丝性状的主要因素。对体质量性状分析中，全湿质量对足丝性状的直接决定系数分别为 0.174 和 0.270，软体质量对足丝性状的直接决定系数分别为 0.109 和 0.081，而通过全湿质量对足丝性状的间接决定系数分别达到 0.241 和 0.260，说明在体质量性状中全湿质量是决定足丝性状的主要因素。

表 7　紫贻贝体尺性状对足丝性状的决定系数

Tab. 7　Determination coefficient of the body measurement traits on the byssus traits of *Mytilus galloprovincialis*

足丝性状	体尺性状	壳宽	壳高
足丝直径	壳宽	0.095	0.228
	壳高	—	0.265
足丝茎直径	壳宽	0.149	0.282
	壳高	—	0.258

表 8　紫贻贝体质量性状对足丝性状的决定系数

Tab. 8　Determination coefficient of the weight traits on the byssus traits of *Mytilus galloprovincialis*

足丝性状	体质量性状	全湿质量	软体质量
足丝直径	全湿质量	0.174	0.241
	软体质量	—	0.109
足丝茎直径	全湿质量	0.270	0.260
	软体质量	—	0.081

2.5　多元回归方程的建立

根据逐步多元回归分析结果(表 3 和表 4)，分别建立壳宽、壳高等 2 个体尺性状对足丝直径和足丝茎直径等 2 个足丝性状，全湿质量、软体质量等 2 个体质量性状对足丝直径和足丝茎直径等 2 个足丝性状，共计 4 个不同的回归方程：

BT_1=8.427+2.505 W_S+3.486 H_S (R^2=0.588),

BS_1= –0.089+0.032 W_S +0.035 H_S (R^2=0.689),

BT_2=120.712+1.443 W_B +3.171 W_{SB} (R^2=0.523),

BS_2=1.129+0.018 W_B +0.028 W_{SB} (R^2=0.611),

其中，BT_1、BT_2 为足丝直径，BS_1、BS_2 为的足丝茎直径，H_S 为壳长，W_B 为全湿质量，W_{SB} 为软体质量。

此段不空格，“其中，”齐头排

3　讨论

3.1　影响贻贝足丝的因素

贻贝通常生活在海洋潮间带，通过分泌茂盛的足丝将自己固定在礁石、船底或等其他固体附着物上，以抵御天敌捕食或者海浪的冲刷。贻贝的众多足丝通常通过一个足丝茎同足丝牵引肌肉相连[20]。贻贝足丝附着力的强弱关系到在面临海浪冲刷及天敌捕食时的能否有效维持种群的稳定，因此，足丝附着能力对贻贝来讲是一个极为重要的生理生态特征[21-22]，同时也是开展贻贝养殖过程一个关键的生产指标[23]。国外开展了大量的贻贝足丝附着的研究，研究内容涵盖了足丝的分泌、数量、规格、韧性以及总体附着力等，大部分研究结论认为影响贻贝附着的是贻贝自身因素和环境因素共同作用的结果，其中贻贝自身因素主要包括贻贝的不同群体、规格、年龄等，环境因素包括温度、盐度、附着物、pH 值、海流速度、季节等[24-29]，ZARDI 等[30]研究发现紫贻贝和褐菜蛤(*Perna perna*)的壳长同足丝的直径存在显著正相关，但是单独生长个体和贝床上个体的相关度存在明显差别，壳长同足丝茎也存在显著的正相关，单独生长个体和贝床上个体的相关度也存在明显差别。KIRK 等[31]研究发现贻贝的壳长同附着力存在显著的正相关，而且潮间带群体的相关系数要高于养殖群体的相关系数。JOSE 等[7]研究发现在同

等条件下紫贻贝的稚贝能够分泌比成贝更多数量的足丝，成贝的足丝附着力比稚贝要高 2.8 倍，但认为附着力的提高主要跟足丝数量有关，BABARRO 等[32]在研究中发现在海浪暴露区贻贝能够产生更粗和更强壮的足丝，认为在海洋暴露区贻贝倾向于分配更多能量给足丝而不是生长和繁殖，并导致贻贝壳小而薄和足丝变得强壮。综上，足丝性能是贻贝的一个重要性状，在受到环境因素影响的同时，也取决于自身的遗传因素。因此，开展足丝性状同其他表型性状的相关性和通径分析对开展下一步足丝其他研究具有重要的现实意义。

3.2 表型性状相关性分析和通径分析

利用表型性状相关性分析可以计算各性状之间关系的密切程度，在育种实践中可以排除一些相关性小的性状，但是表型性状的相关关系既包括变量间的直接关系，又包括通过其他变量影响的间接关系，因此，单纯性状间的相关性分析存在一定局限性。通径分析可以把相关系数剖分成直接影响和间接影响两部分，从而可以得出两个性状之间的真正关系，更加有利于制定合理的多性状选育方案[33]。研究中为进一步提高准确性和可信度，通常会采用相关系数、通径系数、决定程度及多元回归等综合分析方法[34]。目前在贝类中已经开展了大量的表型性状相关及通径分析的研究[35-39]，结果发现大部分体尺性状和体质量性状间存在显著的相关性和较好的回归关系，为相关贝类的选择育种提供了有效参考。在紫贻贝和厚壳贻贝中也开展了不同海区和不同养殖群体的表型性状间的相关和通径分析[40-41]，基本阐明了贻贝体尺性状同质量性状间的关系。本研究聚焦贻贝附着能力的重要影响因素—足丝的直径和足丝茎直径，将壳长、壳宽和壳高等体尺性状和全湿质量、软体质量等质量性状均设置为自变量，将足丝的直径和足丝茎的直径设置为因变量进行相关和通径分析。结果显示，紫贻贝体尺性状同足丝性状的相关系数为 0.678~0.869，质量性状同足丝性状的相关系数为 0.695~0.770，且均达到极显著水平，研究结果一定程度上同 ZARDI[30]和 KIRK[31]的研究结论一致。但以上相关系数同体尺性状之间或体尺性状与体质量性状之间的相关系数相比要小，这可能印证了前人研究中提出的足丝的发生和生长更容易受到外界环境因素的影响。

由于贻贝外形的相似性极强，形态指标受到共线性影响可能性较大，在通径分析和多元回归分析中，为降低未知强共线性影响，在模型选择中选择逐步回归模型，并舍弃了干扰性极强的壳长性状，结果表明，相关性分析、回归分析、通径分析和决定程度分析所获得的结果一致，壳宽、壳高、全湿质量和软体质量均能显著影响足丝性状，壳高和全湿质量对足丝性状决定因子最大。本研究中，体尺性状对足丝性状总的决定系数为 0.558~0.689，质量形状对足丝性状总的决定系数为 0.524~0.611，均未达到 0.85 的标准[35]，说明所用自变量性状中尚有影响足丝性状的其他性状未被考虑其中。另外，本研究只对青岛市即墨区贝类养殖海区一个区域内一个年龄段的个体进行了取样和统计，研究结果的准确性可能也受到一定限制，在下一步研究中有待进一步完善。

4 结论

足丝是贻贝附着力的基本载体，是养殖过程中防止脱落提升经济效益的重要研究对象。本研究通过相关性分析、通径分析及逐步回归分析研究了紫贻贝体尺性状、体质量性状同足丝性状的相关情况，发现体尺性状、体质量性状和足丝性状显著相关，并主要通过壳高和全湿质量等性状影响足丝性状，分别建立了体尺性状、体质量性状同足丝性状的回归方程，初步阐明了足丝性状同体尺性状、体质量性状的关系，为紫贻贝选育计划制定和健康养殖提供了新的思路。

参考文献:

[1] 毛玉英，陈玉新，冯志哲. 紫贻贝营养成份分析[J]. 上海水产大学学报, 1993, 2(4): 220-223.
MAO Yuying, CHEN Yuxin, FENG Zhizhe. Analysis of nutritive composition in *Mytilus edulis*[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1993, 2(4): 220-223.

[2] 张福绥，楼子康，马江虎，等. 春季繁殖期两茬贻贝苗的培育[J]. 海洋与湖沼, 1982, 13(1): 87-96.
ZHANG Fusui, LOU Zikang, MA Jianghu. The rearing of two crops of mussel spats in a spring spawning season[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1982, 13(1): 87-96.

[3] 农业部渔业渔政管理局. 2020 中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社, 2021.
Fisheries Administration of the Ministry of agriculture. China Fisheries Statistical Yearbook 2020[M] . Beijing: China Agricultural Press, 2021.

[4] 任宗伟，谢光东. 贻贝浅海筏式养殖方法[J]. 中国水产, 2003, 3: 65.

REN Zongwei, XIE Guangdong. Method of culture mussel by raft in shallow offshore[J]. China Fisheries, 2003, 3: 65.

[5] JEFFS A G, HOLLAND R C, HOOKER S H, et al. Overview and bibliography of research on the green-shell mussel, *Perna canaliculus*, from New Zealand waters[J]. Journal of Shellfish Research, 1999, 18(2): 347-360.

[6] PRICE H A. Byssus thread strength in the mussel, *Mytilus edulis*[J]. Proceedings of the Zoological Society of London, 2010, 194(2): 245-255.

[7] JOSE M F B, EMILY C. Attachment strength of the mussel *Mytilus galloprovincialis*: Effect of habitat and body size[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2013, 443(May): 188-196.

[8] NEWCOMB L A, GEORGE M N, O'DONNELL M J, et al. Only as strong as the weakest link: structural analysis of the combined effects of elevated temperature and pCO_2 on mussel attachment[J]. Conservation Physiology, 2019, 7(1): coz068.

[9] GEORGE M N, ANDINO J, HUIE J, et al. Microscale pH and dissolved oxygen fluctuations within mussel aggregations and their implications for mussel attachment and raft aquaculture[J]. Journal of Shellfish Research, 2019, 38(3): 795-809.

[10] ZHAO Xinguo, SUN Shuge, SHI Wei, et al. Mussel byssal attachment weakened by anthropogenic noise[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 1-12.

[11] 孙泽伟, 郑怀平, 杨彦鸿, 等. 近江牡蛎养殖群体数量性状间的相关及通径分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 332-336.
SUN Zewei, ZHENG Huaiping, YANG Yanhong, et al. Correlation and path analysis to quantitative traits for a cultured population of jinjiang oyster *Crassostrea hongkongensis*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 332-336.

[12] 王光花, 蒋增杰, 方建光. 浅海远岸水域筏养栉孔扇贝数量性状的相关性及通径分析[J]. 现代农业科技, 2011, 19: 327-328, 330.
WANG Guanghua, JIANG Zengjie, FANG Jianguang. Correlation and path analysis on quantitative traits of *Chlamys farreri* in offshore area[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011, 19: 327-328, 330.

[13] 李朝霞, 王春德. 海湾扇贝自交与杂交子代的生长比较和通径分析[J]. 中国农学通报, 2009, 8: 282-285.
LI Zhaoxia, WANG Chunde. Comparison of growth and path analyses of inbred and cross-bred populations in the bay scallop *Argopecten irradians irradians*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 8: 282-285.

[14] 郑怀平, 孙泽伟, 张涛, 等. 华贵栉孔扇贝 1 龄贝数量性状的相关性及通径分析[J]. 中国农学通报, 2009, 20: 322-326.
ZHENG Huaiping, SUN Zewei, ZHANG Tao, et al. Correlation and path analysis to quantitative traits of noble scallop *Chlamys nobilis* reeve at one-year old[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 20: 322-326.

[15] 张超, 李永仁, 郭永军, 等. 毛蚶天津群体形态性状对体质量的影响研究[J]. 海洋通报, 2019, 38(4): 400-404.
ZHANG Chao, LI Yongren, GUO Yongjun, et al. Effects of shell morphological traits on total weight in *Scapharca subcrenata* Lischke from Tianjin[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(4): 400-404.

[16] 朱爱意, 吴常文, 赵向炯. 舟山近海紫贻贝生物学性状初步研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2006, 1: 1-4.
ZHU Aiyi, WU Changwen, ZHAO Xiangjiong. Primary research on the biological characteristics of *Mytilus edulis* linnaeus in zhoushan costal area[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science), 2006, 1: 1-4.

[17] 陆雅凤. 东极厚壳贻贝养殖群体表型性状的相关与通径分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(3): 147-150.
LU Yafeng. Correlation analysis and path analysis on the morphological traits of *Mytilus coruscus* population in Dongji culture region[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 147-150.

[18] 张新明, 程顺峰, 张敏. 日照海域紫贻贝形态性状对体质量的影响[J]. 水产学杂志, 2020, 33(4): 29-34.
ZHANG Xinming, CHENG Shunfeng, ZHANG Min. Effects of morphological traits on body weight of mussel *Mytilus edulis* in rizhao sea area[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2020, 33(4): 29-34.

[19] 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 Jie, PENG Huijing, ZHANG Shoudu, et al. Effects of shell phenotypic traits on body weight of clam *Lutraria sieboldii*[J]. Fisheries Science, 2020, 39(4): 573-578.

[20] BROWN C H. Some structural proteins of *Mytilus edulis* L[J]. Quart J Micros Sci, 1952, 93: 487-502.

[21] CARRINGTON E. The ecomechanics of mussel attachment: From molecules to ecosystems[J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42(4): 846-852.

[22] 赵信国. 海洋酸化对厚壳贻贝物理与行为防御的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
ZHAO Xinguo. Studies on the effects of ocean acidification on physical and behavioral defense of thick shell mussel *Mytilus coruscus*[D]. Hangzhou: Zhejiang Uni-

versity, 2017.

[23] GEORGE M N, ANDINO J, HUIE J, et al. Microscale pH and dissolved oxygen fluctuations within mussel aggregations and their implications for mussel attachment and raft aquaculture[J]. Journal of Shellfish Research, 2019, 38(3): 795-809.

[24] SMEATHERS J E, VINCENT J F V. Mechanical properties of mussel byssus threads[J]. Journal of Molluscan Stud, 1979, 451(45): 219-230

[25] BELL E C, GOSLINE J M. Mechanical design of mussel byssus: material yield enhances attachment strength[J]. Journal of Experimental Biology, 1996, 199: 1005-1017.

[26] BELL E C, GOSLINE J M. Strategies for life in flow: tenacity, morphometry, and probability of dislodgment of two *Mytilus* species[J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 159: 197-208.

[27] HUNT H, SCHEIBLING R E. Predicting wave dislodgment of mussels: variation in attachment strength with body size, habitat, and season[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 213: 157-164.

[28] ZaARDI G I, MCQUAID C D, NICASTRO K R. Balancing survival and reproduction: seasonality of wave action, attachment strength and reproductive output in indigenous *Perna perna* and invasive *Mytilus galloprovincialis* mussels[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 334: 155-163.

[29] GARNER Y L, LITVAITISs M K. Effects of wave exposure, temperature and epibiont fouling on byssal thread production and growth in the blue mussel, *Mytilus edulis*, in the Gulf of Maine[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2013, 446(5): 52-56.

[30] ZARDI G I, NICASTRO K R, MCQUAID C D, et al. Hydrodynamic stress and habitat partitioning between indigenous (*Perna perna*) and invasive (*Mytilus galloprovincialis*) mussels: constraints of an evolutionary strategy[J]. Marine Biology, 2006, 150: 79-88.

[31] KIRK M, ESLER D, BOYD W S. Morphology and density of mussels on natural and aquaculture structure habitats: implications for sea duck predators[J]. Marine Ecology Progress Series, 2007, 346: 179-187.

[32] BABARRO J M F, FEMFINDEZ-REIRIZ M J, LABARTAa U. Secretion of byssal threads and attachment strength of *Mytilus galloprovincialis*: the influence of size and food availability[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2008, 88: 783-791.

[33] 王庆恒, 邓岳文, 杜晓东, 等. 翡翠贻贝形态性状对软体部质量的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2009, 29(4): 1-4.
WANG Qingheng, DENG Yuewen, DU Xiaodong, et al. Effect of morphometric traits on edible part weight of *Perna viridis*[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2009, 29(4): 1-4.

[34] 高玮玮, 袁媛, 潘宝平, 等. 青蛤(*Cyclina sinensis*)贝壳形态性状对软体部重的影响分析[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 166-169.
GAO Weiwei, YUAN Yuan, PAN Baoping, et al. The relationship between shell morphology and body weight of *Cyclina sinensis*[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 166-169.

[35] 刘小林, 常亚青, 相建海, 等. 栉孔扇贝壳尺寸性状对活体质量的影响效果分析[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(6): 673-678.
LIU Xiaolin, CHANG Yaqing, XIANG Jianhai, 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.

[36] 林清, 王亚骏, 王迪文, 等. 太平洋牡蛎和葡萄牙牡蛎养殖群体数量性状比较分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 106-111.
LIN Qing, WANG Yajun, WANG Diwen, et al. Comparison analysis of quantitative traits and path between two cultured populations of *Crassostrea gigas* and *C. angulata*[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(1): 106-111.

[37] 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 Meirong, FANG Jianguang, GAO Yaping, 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.

[38] ZHANG A G, WANG L L, YANG X L, et al. Relationship between shell morphological traits and body weight in two estuarine clams, *Meretrix meretrix* and *Cyclina sinensis* in Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea in China[J]. Journal of Shellfish Research, 2018, 37(5): 989-996.

[39] 李莉, 郑永允, 徐科凤, 等. 不同贝龄毛蚶壳形态性状对体质量的影响[J]. 海洋科学, 2015, 39(6): 54-58.
LI Li, ZHENG Yongyun, XU Kefeng, et al. The relationship between morphometric traits and body weight of *Scapharca subcrenata* at different ages[J]. Marine Sciences, 2015, 39(6): 54-58.

[40] 白晓倩, 杨阳, 邹李昶, 等. 嵊泗列岛海域三种贻贝贝体框架特征的差异[J]. 海洋与湖沼, 2014, 45(5): 1078-1084.
BAI Xiaoqian, YANG Yang, ZOU Lichang, et al. Variations in shell frame characteristic among three species of *Mytilus* in Shengsi waters of the east China sea[J].

Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2014, 45(5): 1078-1084.

[41] 郑晓静, 杨阳, 邹李昶, 等. 嵊泗列岛海域三种贻贝贝体框架性状对壳重的影响效应[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 165-172.

ZHENG Xiaojing, YANG Yang, ZOU Lichang, et al. Effects of shell frame characteristics on shell weight of three species of *Mytilus* in Shengsi waters of the east China sea[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2015, 46(1): 165-172.

Effects of body measurement and weight traits on byssus traits of *Mytilus galloprovincialis*

ZHANG Shou-du [1, 4], ZHANG Wei[1, 4], LI Yong-ren[2], ZHAO Wen-xi[1, 4], PENG Hui-Jing[3], ZOU Jie[3], SONG Ai-huan[1, 4]

(1. Marine Science Research Institute of Shandong Province(National Oceanographic Center, Qingdao), Qingdao 266104, China; 2. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. Guangxi Institute of Oceanology, Beihai 536000, China; 4. Qingdao Marine Germplasm Resources Exploration and Utilization Engineering Laboratory, Qingdao 266104, China)

Received: Apr. 22, 2022
Key words: *Mytilus galloprovincialis*; body measurement traits; byssus traits; correlation analysis; path analysis

Abstract: To evaluate the effects of body measurement and weight traits on the byssus traits of *Mytilus galloprovincialis*, approximately 106 individuals were randomly collected from the mussel cultivation raft of Jimo, Shandong Province, China. Three body measurement traits (including the shell length, shell width (W_S), and shell height (H_S), two weight traits (including the body weight (W_B) and soft BW (W_{SB}), and two byssus traits (including the byssal thread (BT) and byssal stem (BS) diameters) were measured. The effects of body measurement traits on the weight traits were examined by correlation, multiple regression, and path analysis. The results showed that all the measured traits correlated with each other significantly ($P < 0.01$), and the correlation coefficient of all the traits ranged from 0.678 to 0.892. The multiple regression and path analysis results showed that the SH and BW substantially impacted the byssus traits. The path coefficients of the SH on byssus traits were 0.515 and 0.508, respectively, and that of the BW on byssus traits were 0.417 and 0.520, respectively. The regression equations are expressed as: BT_1=8.427+2.505 W_S +3.486 H_S (R^2=0.588); BS_1=–0.089+0.032 W_S +0.035 H_S (R^2=0.689); BT_2=120.712+1.443 W_B + 3.171 W_{SB} (R^2=0.523); BS_2=1.129+0.018 W_B +0.028 W_{SB} (R^2=0.611). This study provides new insights into the selective breeding and healthy aquaculture of blue mussels.

(本文编辑: 谭雪静)