

# 缢蛏耐高盐性能及其与生长性状的相关性分析

陈义华<sup>1,3</sup>, 牛东红<sup>1,2</sup>, 董志国<sup>3</sup>, 李家乐<sup>1,2</sup>

(1. 上海海洋大学 上海水产养殖动物良种培育与绿色养殖协同创新中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 江苏海洋大学 江苏省海洋生物技术重点实验室, 江苏 连云港 222005)

**摘要:** 缢蛏(*Sinonovacula constricta*)是我国重要的水产经济贝类, 开展耐高盐新品种选育对平衡不同地区缢蛏良种养殖意义重大。本研究对不同家系缢蛏幼贝进行高盐胁迫, 运用统计学方法和相关性分析探究了缢蛏耐高盐性能及其与生长性状的相关性。结果显示, 缢蛏家系间壳长、壳高、壳宽和体质量表型值差异较大, 体质量变异系数达 15.53%。不同家系对高盐耐受性差异较大, 家系间死亡率范围在 0~100%。胁迫实验共持续 9 d, 各家系缢蛏首粒死亡时间在第 1~9 d 之间, 而且死亡率较高的家系内缢蛏死亡时间离散程度较大, 说明不同个体间高盐耐受性差异也较大。缢蛏开始出现大量死亡的时间主要在胁迫后第 8 d, 第 9 d 部分家系死亡率高于 80%, 说明缢蛏对高盐耐受存在一个阈值, 超过该阈值会开始或大量死亡。皮尔逊和斯皮尔曼相关性分析显示, 缢蛏存活时间和生长性状为正相关, 其中存活时间与缢蛏壳长、体质量相关性均达到显著水平( $P < 0.05$ )。缢蛏存活率与体质量、生长速度均显著正相关( $P < 0.05$ )。整体而言, 壳长较长和体质量较重的缢蛏个体耐高盐性能较强, 在高盐环境中具有生长优势。本研究揭示了缢蛏的高盐耐受性及其与生长性状的相关性, 为缢蛏耐高盐选育工作提供了重要的参考依据。

**关键词:** 缢蛏(*Sinonovacula constricta*); 耐盐性; 生长性能; 相关性分析

中图分类号: S968 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)10-0051-08

DOI: 10.11759/hyxx20210928004

缢蛏(*Sinonovacula constricta*)是双壳纲, 竹蛏科的一种软体动物, 因其壳体表面有一条形似被绳索勒过的痕迹而得名<sup>[1]</sup>。缢蛏具有生长快, 养殖周期短等优点, 一年就可达到商品规格<sup>[2]</sup>, 在浙江、福建和江苏等省份养殖广泛, 是我国重要的水产经济物种。

盐度是影响海水贝类生长发育重要的环境因子之一。不同海水贝类最适生长盐度范围不同, 例如缢蛏在 15~20 盐度下生长较快, 而波纹巴非蛤(*Paphia undulata*)适宜盐度范围为 25~30<sup>[3]</sup>。正常海水的平均盐度为 35, 由于气候和内陆径流等原因, 河口及周围地区海水盐度变动较大<sup>[4]</sup>。当水体盐度超过海洋贝类适应范围将会对其生长、存活造成巨大压力<sup>[5-6]</sup>。高盐对缢蛏生长、存活等具有一定影响, 研究发现盐度 30 下缢蛏存活率和特定生长率均显著低于低盐度组<sup>[7]</sup>。在我国北方沿海和西北地区存在大量的高盐水体, 例如山东盐场有面积约 14 万  $\text{hm}^2$  的盐度在 30 以上的水体<sup>[8]</sup>。而在江苏省连云港部分养殖池塘, 干旱

时期水体盐度最高可达到 28 以上。生长性能是影响缢蛏产量的重要因素, 选育适合高盐水域生长的缢蛏新品种对平衡南北区缢蛏养殖差异具有重要意义。

据早期研究发现, 缢蛏重要壳体指标和体质量等生长性状在高盐下的遗传力为中高水平, 可以通过选育来提升高盐水域中缢蛏的生长性能<sup>[9]</sup>。当把耐盐、耐温、抗病等抗逆性状视作敏感与否时, 则称为阈性状; 以存活时间评判时, 则为数量性状<sup>[10]</sup>。上述二者都无法从表型直接判断其耐盐性, 但是表型性状较为直观。关于贝类耐受性的研究较为多见, 例如缢蛏<sup>[11]</sup>、虾夷扇贝(*Mizuhopecten yessoensis*)<sup>[12]</sup>的高

收稿日期: 2021-09-28; 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项项目(2019YFD0900400)

[Foundation: National Key R&D Plan “Blue Granary Science and Technology Innovation” special project, No. 2019YFD0900400]

作者简介: 陈义华 (1993—), 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事海洋贝类遗传育种研究, E-mail: cyihua@163.com; 牛东红, 通信作者, E-mail: dhniu@shou.edu.cn

温耐受性, 香港牡蛎(*Crassostrea hongkongensis*)的高盐耐受性<sup>[13]</sup>, 菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)的低氧耐受性<sup>[14]</sup>等, 但是关于贝类耐受性和生长性状相关性的研究较为少见。本研究首次通过高盐胁迫实验评估了缢蛭不同家系耐盐性, 在此基础上分析了缢蛭耐盐性能和生长性状的相关性。本研究结果将为缢蛭耐盐新品种选育奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

实验用对象为本实验于 2020 年 10 月建立的缢蛭家系, 繁育基地位于浙江省台州市三门东航水产育苗科技有限公司。

### 1.2 缢蛭家系的建立

缢蛭繁育用亲本壳长(5.31±0.93) cm, 体质量(11.45±1.07) g。采用阴干加流水刺激的方法进行催产, 先将亲本均匀置于产床上, 黑暗环境下阴干 6~8 h, 后将产床直接转移至育苗池中, 底部曝气模拟水流。海水盐度 12, 水温 26 °C。待亲本排精、排卵时, 将其拿出分别放入预先装好同盐度过滤海水的烧杯中。采用一雄配一雌的配对方法, 建立了 30 个全同胞家系。

### 1.3 家系培育和池塘养殖

幼虫培育方法参照已有研究<sup>[11, 15]</sup>, 并稍作调整。缢蛭不同家系分别养殖在 200 L 的长方形塑料箱内, 饵料为育苗场培养的球等边金藻(*Isochrysis galbana*)和牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*)。D 形幼虫及以前的时期投喂球等边金藻, 投喂次数根据水体藻色而定, 每天换水量 50%。后期投喂牟氏角毛藻, 每天换水量 100%, 换水时直接加藻水, 视藻水浓度调整每天换水次数, 期间严格控制家系间交叉混杂。

经过约 2 个月室内养殖, 当年 12 月将缢蛭全部家系转移至育苗场自有室外池塘进行中间培育。不同家系间以围网隔离, 标记位置并记录家系号。2021 年 4 月将缢蛭家系挖出, 转移至连云港养殖池塘进行养殖, 池塘海水周年平均盐度 24。养殖实验选用 17 个缢蛭家系, 初始壳长(2.67±0.38) cm, 体质量(1.48±0.26) g。缢蛭家系采用围网养殖(1.2 m×1 m), 家系内缢蛭个数为 200~300 粒。

### 1.4 高盐胁迫实验

池塘养殖 2 个月后, 采集缢蛭样本, 除其中一个家系缢蛭样本数为 45 粒外, 其余 16 个家系缢蛭均采

集 60 粒。缢蛭由池塘运至实验室后, 在长方形塑料箱(0.45 m×0.35 m×0.15 m)中暂养 3 d, 然后进行高盐条件下的胁迫实验。根据缢蛭半致死盐度为 35.8<sup>[16]</sup>, 本实验设置胁迫盐度为 36。实验用高盐水体用海水水晶配置, 期间每天 100%换水, 饵料为小球藻浓缩液(6×10<sup>9</sup>~8×10<sup>9</sup> ind./mL)。胁迫前期缢蛭正常摄食, 水体小球藻浓度(4×10<sup>5</sup>~5×10<sup>5</sup>) ind./mL。由于长期暴露于高盐环境, 缢蛭后期摄食能力下降, 此时视摄食情况投喂。实验开始后, 每隔 1 h 观察 1 次, 及时将死亡缢蛭捞出, 擦干体表海水, 记录壳长、壳高、壳宽、体质量等生长性状。死亡判定标准为: 缢蛭闭壳肌失去作用, 触摸刺激后闭壳肌无反应, 双壳无闭合动作。当其中一个家系内缢蛭全部死亡后实验结束。

### 1.5 数据处理

数据处理用 Excel 2016 完成, 箱线图用 Sigma-Plot 12.5 绘制, 皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient, PCC)和斯皮尔曼相关系数(Spearman's rank correlation coefficient, SCC)由 SPSS 24 完成。 $P<0.05$ , 表示差异显著;  $P<0.01$ , 表示差异极显著。根据之前的研究结果<sup>[17]</sup>, 长期生活在高盐环境下的缢蛭有较强的耐盐性, 即缢蛭对高盐环境有适应能力。因此为增加结果准确性, 在观察缢蛭耐盐性和生长速度的相关性时取缢蛭最近 1 个月的特定增长率。文中所用相关数据的计算公式如下:

$$\text{存活率}(\%) = N_c / N_m \times 100, \quad (1)$$

$$\text{死亡率}(\%) = 1 - \text{存活率}, \quad (2)$$

$$\text{特定增长率}(\%/d) = (\ln X_2 - \ln X_1) / t \times 100^{[18]}, \quad (3)$$

$$\text{变异系数}(\%) = (\text{标准差} / \text{平均值}) \times 100, \quad (4)$$

式中,  $N_c$  为实验结束时缢蛭各家系存活个数,  $N_m$  为实验开始时各家系缢蛭总个数;  $X_2$  为各家系缢蛭平均壳长, 壳高, 壳宽和体质量,  $X_1$  为采样前 1 个月缢蛭的平均壳长, 壳高, 壳宽和体质量;  $t$  为养殖时间, 30 d。

## 2 结果

### 2.1 缢蛭家系间生长性状生物学数据分析

经过 2 个月养殖, 不同家系间缢蛭壳长、壳高、壳宽和体质量表型值出现较大的差异(表 1)。其中, 对于体质量和壳长性状, 最大值和最小值间的差异在生长性状中较为突出。本次用于胁迫实验的缢蛭壳长为(3.759 7±0.152 7)cm, 体质量为(3.299 4±0.512 3) g。根据变异系数, 家系间缢蛭体质量离散程度最大, 超过 15%; 壳高的离散程度最小。

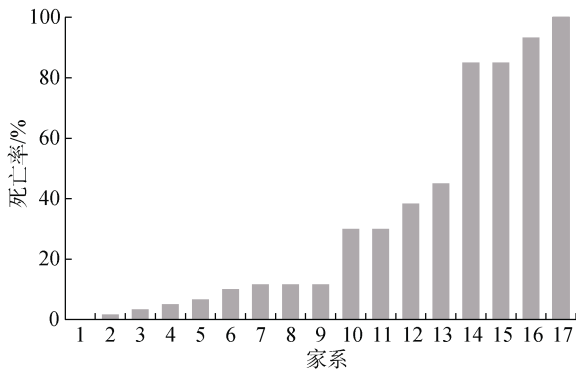
表 1 缢蛭家系间生长性状生物学数据

Tab. 1 The data of biometric measurements in *S. constricta* from the different families

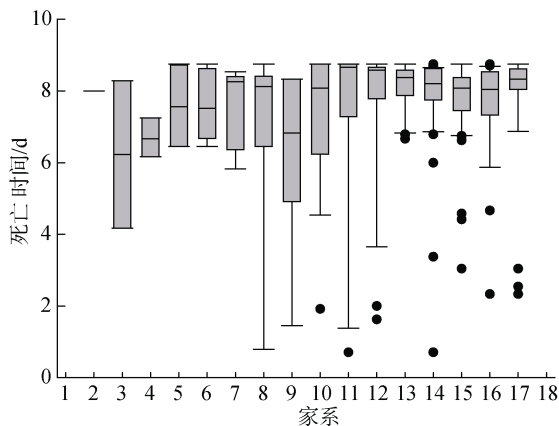
性状	壳长/cm	壳高/cm	壳宽/cm	体质量/g
最小值	3.546 6	1.245 8	0.930 2	2.671 7
最大值	4.014 5	1.431 1	1.170 4	4.546 5
均值	3.759 7	1.350 1	1.017 6	3.299 4
标准差	0.152 7	0.047 4	0.070 3	0.512 3
变异系数/%	4.06	3.51	6.91	15.53

## 2.2 高盐胁迫下缢蛭不同家系死亡情况

本实验设定其中一个家系内缢蛭死亡率达到 100% 时实验结束，实验结束时仍有一个家系死亡率为 0 (图 1)。图 1a 为不同家系缢蛭的死亡率，高盐胁迫后缢蛭不同家系间死亡率由低到高差异较大，部分家系死亡率高于 80%。剔除没有统计学意义的两个家系 (图 1b)，死亡率低的家系由于死亡个数较少，死亡时间离散程度较小。死亡率较高的家系，其缢蛭死亡时间离散程度较大，死亡时间范围较广。



(a) 高盐胁迫下缢蛭不同家系死亡率



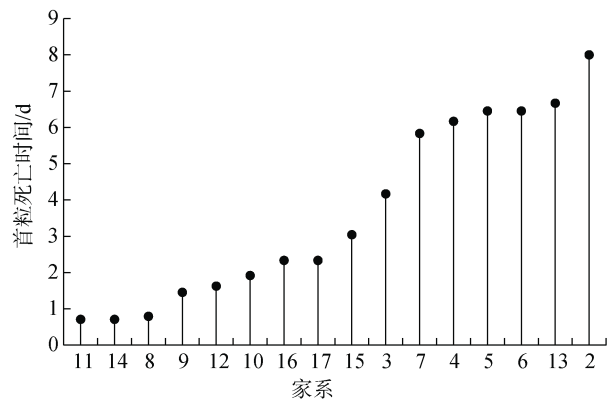
(b) 高盐胁迫下不同家系缢蛭死亡时间

图 1 高盐胁迫下缢蛭各家系的死亡情况

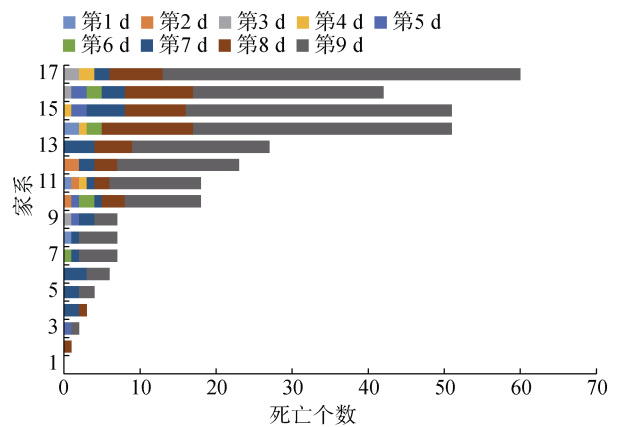
Fig. 1 Death of *S. constricta* among different families under high salt stress

## 2.3 高盐胁迫下缢蛭不同家系死亡时间

自开始高盐胁迫至其中一个家系缢蛭全部死亡，胁迫历时 9 d (图 2)。实验期间，不同家系缢蛭首粒死亡时间差异较大 (图 2A)。结合死亡率分析表明，缢蛭首粒死亡时间较晚的家系其整体死亡率较低，说明该类家系内缢蛭整体对高盐有较强的耐受性。缢蛭各家系大量死亡暴发时间开始于第 8 d，第 9 d 死亡数量最多 (图 2b)。



(a) 高盐胁迫下不同家系缢蛭首粒死亡时间



(b) 高盐胁迫下不同家系缢蛭每天死亡数量

图 2 高盐胁迫下缢蛭各家系死亡历时

Fig. 2 Time of death for *S. constricta* among different families under high salt stress

## 2.4 缢蛭存活时间和生长性能相关性

缢蛭存活时间和生长性状的皮尔逊和斯皮尔曼相关性如表 2 所示。根据相关性分析理论，结合各家系死亡数量，对 6 个家系进行统计分析。各家系缢蛭存活时间与壳长、壳高、壳宽、体质量的皮尔逊和斯皮尔曼相关性除家系 16 外差异不大。家系 12、15、16 缢蛭存活时间与生长性状的相关整体呈现负相关，家系 13、14、17 呈现正相关。将所有死亡缢蛭个体

做一个整体统计, 缢蛏存活时间与生长性状的皮尔逊和斯皮尔曼相关性均是正相关关系。缢蛏存活率和壳长、体质量的皮尔逊相关性达到显著水平 ( $P < 0.05$ ), 而所有性状的斯皮尔曼相关性达到了极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

表 2 缢蛏存活时间和生长性状的相关性  
Tab. 2 Correlation between survival time and growth traits of *S. constricta*

家系	相关指标	壳长	壳高	壳宽	体质量
12	PCC	-3.98	-0.242	-0.127	0.022
	SCC	-0.028	-0.079	-0.08	0.015
15	PCC	-0.081	-0.168	-0.150	-0.193
	SCC	0.081	0.066	0.132	-0.045
16	PCC	-0.028	-0.079	-0.08	0.015
	SCC	0.110	0.038	0.003	0.028
13	PCC	0.118	0.119	0.016	0.251
	SCC	-0.055	0.022	0.069	0.256
14	PCC	0.306*	0.231	0.120	0.265
	SCC	0.304*	0.161	0.011	0.168
17	PCC	0.193	0.138	0.237	0.194
	SCC	0.198	0.215	0.222	0.092
整体	PCC	0.121*	0.095	0.079	0.140*
	SCC	0.166**	0.150**	0.159**	0.187**

注: \* 代表  $P < 0.05$ ; \*\* 代表  $P < 0.01$ 。下同

### 2.5 各家系缢蛏存活率和生长性能的相关性

将各家系缢蛏存活率和生长指标均值、增长率分别做相关性分析, 结果如表 3 和表 4 所示。各家系缢蛏存活率和生长性状的皮尔逊相关性显示, 存活率与壳长、壳高为负相关, 与壳宽、体质量为正相关, 且与体质量相关水平显著 ( $P < 0.05$ )。斯皮尔曼相关性显示, 存活率仅与壳长为负相关, 且与壳宽 ( $P < 0.05$ )、体质量 ( $P < 0.01$ ) 相关性水平均显著。各家系缢蛏存活率和生长性状增长率的相关性方面, 综合皮尔逊和斯皮尔曼相关结果, 相关性均为正相关且水平显著 ( $P < 0.05$ ), 其中存活率与体质量相关性达到极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

表 3 各家系缢蛏存活率和生长性状的相关性  
Tab. 3 Correlation between survival rate and growth traits of *S. constricta* in different families

相关指标	壳长	壳高	壳宽	体质量
PCC	-0.242	-0.233	0.434	0.530*
SCC	-0.026	0.012	0.550*	0.724**

表 4 各家系缢蛏存活率和生长性状增长率的相关性  
Tab. 4 Correlation between survival rate and specific growth rate of *S. constricta* in different families

相关指标	壳长增长率	壳高增长率	壳宽增长率	体质量增长率
PCC	0.514*	0.497*	0.289	0.817**
SCC	0.509*	0.410	0.647*	0.834**

## 3 讨论

近年来, 养殖缢蛏面临品质下降, 抗逆性差等众多挑战<sup>[19]</sup>, 不同养殖区域水体环境的差异是导致缢蛏品质不同的一个重要因素。选育缢蛏抗逆新品种对改善缢蛏养殖现状, 消除缢蛏区域品质和产量差异意义重大。类似耐温、耐盐等性状选育中抗性指标的判定是一个难点, 即如何判断哪个个体具有潜在抗性。缢蛏的耐盐性状为典型的数量性状范畴, 还没有技术能通过壳体形态等比较直观的外在性状判断。目前有关于水产动物抗逆性判断的方法大致有三种, 第一种为急性胁迫法, 主要思路是将大量受试个体直接放入极端的条件, 然后记录死亡率, 先死亡个体定义没有抗逆性, 后死亡或存活个体定义有抗逆性<sup>[20]</sup>; 第二种为缓慢胁迫法, 与急性胁迫法类似, 不同之处在于将直接改变生存环境变为缓慢改变生存环境<sup>[21]</sup>; 第三种就是一种基于心跳指标的快速评估贝类抗性的方法<sup>[22]</sup>。但是以上三种方法在实际的育种中实现难度还较大, 现在主流育种应用较多的还是将某一优良性状作为定向选育指标的传统选育方式。壳体指标可以较直观地反应双壳贝类的生长状况<sup>[23]</sup>, 因此研究高盐养殖缢蛏生长性状与耐盐性的相关关系, 对高盐选育亲本的选择以及高盐养殖下缢蛏的生长性能评估具有非常重要的指导意义。

缢蛏是广盐性贝类, 但是研究发现其滤水率、摄食率、同化率在盐度 5~30 的范围内先上升后下降, 盐度 15~20 是一个比较适宜的范围<sup>[24]</sup>。高盐环境会增加其渗透调节和生物代谢的耗能, 对其生长造成不利影响<sup>[7]</sup>。本研究中缢蛏首先在连云港池塘养殖两个月, 该养殖水体相对最适养殖条件为高盐环境, 对缢蛏有一定的选择作用。选择是育种的基础<sup>[25]</sup>, 表型变异是选择的首要条件。本研究不同家系间缢蛏重要壳体指标和体质量均出现不同程度的表型变异, 尤其是体质量, 家系间表型值离散程度最大。而在贝类养殖中产量多以重量计算, 所以高盐环境下

提高缢蛭养殖产量,以体质量为主选性状是可行且必要的。以死亡率判定水产动物抗逆性的研究已有报道<sup>[26-27]</sup>,本研究缢蛭不同家系死亡率差异较大。实验结束后,有的家系死亡率达到 100%,而有的家系却无死亡个体出现,并且家系间第一只缢蛭死亡的时间差异也较大,说明缢蛭不同家系对高盐敏感性差异较大,可以通过死亡率来判定缢蛭抗性家系和敏感家系,进而进行家系间选育。家系内选育是动植物育种中遗传改良的有效方法<sup>[28]</sup>,本研究中死亡率高的家系内缢蛭死亡时间差别较大,说明家系内缢蛭不同个体间高盐敏感性差异也较大,可根据家系内缢蛭个体的表现进行选择<sup>[29]</sup>。阈性状是指它们的遗传是由多基因决定的,而它们的表型是非连续性的一类性状<sup>[30]</sup>。阈性状是一类重要的数量性状,动植物包括人类在内的抗病能力如“患病”或“正常”;“存活”或“死亡”等都可视为阈性状。这类性状存在一个阈值,超过这一阈值才会显示相应的性状<sup>[30]</sup>。在持续 9 d 的高盐胁迫中,缢蛭大量死亡时间爆发于第 8 d。第 8 d 以前,各家系缢蛭死亡缓慢,死亡数量较少,并且家系间首粒缢蛭死亡时间具有早晚差异,说明缢蛭对高盐耐受有一个阈值,超过该阈值会开始或大量死亡。结合死亡情况和死亡时间来看,不同家系的阈值不同,不同个体的阈值也不同。

性状间相关性是反映物种各性状间相关程度的重要参数,对指导育种早期选择和间接选择等策略的准确制定具有重要意义<sup>[31]</sup>。间接选择指利用一个性状与另一个性状的显著相关,通过改变其中一个性状来间接改变另一个性状的选择<sup>[32]</sup>。直接施加选择的性状叫副性状,要改良的目标性状叫主性状。目前缺少判断缢蛭个体耐盐性的精确指标,依照传统的选育理论,可进行高盐胁迫或高盐养殖,然后留取存活个体做亲本继续选育。考虑产量问题,个体大、体质量重的个体应被优先选择当做亲本。因此,探究缢蛭壳体指标及体质量与耐盐性的相关性,对于间接选择至关重要。皮尔逊相关和斯皮尔曼相关是分析相关性的两个常用相关指标<sup>[33-34]</sup>,本研究在分析缢蛭存活时间和生长性状相关性时,两种指标分析结果一致。不同家系,其缢蛭存活时间与壳体指标的相关性有正有负,主要原因可能是样本量较小,这一观点可以从基于整体统计后的结果得到证实。通过对所有个体的数据分析表明,缢蛭存活时间和所有生长性状均为正相关,其中壳长、体质量与存活时间为显著正相关。首先,壳长、壳高、壳宽和体质量

是数量性状,其数值是连续的,存活时间也为连续的,可以用皮尔逊相关性和斯皮尔曼相关性进行分析。但是,皮尔逊相关性分析是要求数值符合正态分布或者接近正态的单峰分布<sup>[35]</sup>。不同家系内缢蛭虽然具有统计学意义,但是数量相对较少,同时存活时间跨度较大,这可能是导致皮尔逊相关性和斯皮尔曼相关性结果差异的主要原因。本研究中参与统计的全部死亡缢蛭数量达到 300 粒以上,误差相对单个家系而言更小,分析结果更加可靠。因此,整体而言个体大的缢蛭具有较强的耐盐性。分析缢蛭各个家系存活率及其生长性状平均值的皮尔逊和斯皮尔曼相关性,二者均显示存活率和不同生长性状的相关性有正有负,这可能是由家系内缢蛭不同个体耐受性差异较大导致。但是皮尔逊和斯皮尔曼相关性显示存活率和体质量间为显著正相关,说明体质量重的家系高盐耐受性整体较高。特定增长率可以校正分析数据的不等方差<sup>[18]</sup>,降低数据分析误差。各家系缢蛭存活率和生长性状增长率的皮尔逊和斯皮尔曼相关性结果一致,都为正相关,说明生长速度快的缢蛭一般耐盐性较强。张兴志等<sup>[10]</sup>在香港牡蛎家系耐高盐性筛选的研究发现,幼虫期生长与存活率两个性状间不存在相关性,与本结果不同,这种差异可能与物种、生长阶段、养殖环境等因素有关<sup>[26]</sup>。综合分析,壳长、体质量、在高盐环境中生长速度快的缢蛭个体具有较强的耐高盐性能。

## 4 结论

本研究结果证明了缢蛭家系间以及个体间均存在高盐耐受性差异,说明了缢蛭耐盐性是阈性状。整体而言,壳长较长和体质量较重的缢蛭个体耐高盐性能较强,在高盐环境中具有生长优势。本研究为缢蛭耐高盐性状与生长性能的关系判定提供了有力证据,对进一步开展缢蛭耐高盐选育具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 常亚青. 贝类增养殖学[M]. 北京: 中国农业出版社. 2007: 108-109.  
CHANG Yaqing. Science of shellfish culture and propagation[M]. Beijing: China Agricultural Press. 2007: 108-109.
- [2] NIU D H, FENG B B, LIU D B, et al. Significant genetic differentiation among ten populations of the razor clam *Sinonovacula constricta* along the coast of china revealed by a microsatellite analysis[J]. Zoological Studies, 2012, 51(3): 406-414.

- [3] 张鹏飞. 波纹巴非蛤生理生态学研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.  
ZHANG Pengfei. Study on physiological ecology of the undulated surf clam, *Paphia undulata*[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [4] 陈敏. 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 1-200.  
CHEN Min. Chemical oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009: 1-200.
- [5] BURDON D, CALLAWAY R, ELLIOTT M, et al. Mass mortalities in bivalve populations: A review of the edible cockle *Cerastoderma edule*[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 150: 271-280.
- [6] CARREGOSA V, FIGUEIRA E, GIL A M, et al. Tolerance of *Venerupis philippinarum* to salinity: Osmotic and metabolic aspects[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2014, 171: 36-43.
- [7] 丁红兵, 李浩宇, 陈义华, 等. 高盐对缢蛏生长存活、 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase 活性及能量代谢相关指标的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 5: 1-17.  
DING Hongbing, LI Haoyu, CHEN Yihua, et al. Effects of high salinity on growth and survival,  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase activity and energy metabolism related indexes of razor clam *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 5: 1-17.
- [8] 李娜, 赵玉超, 王仁杰, 等. 高盐胁迫对凡纳滨对虾消化及免疫相关酶活力的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1411-1417.  
LI Na, ZHAO Yuchao, WANG Renjie, et al. Effects of high salinity on digestive and immunity-related enzymes in *Litopenaeus vannamei*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1411-1417.
- [9] CHEN Y H, LI H Y, DING H B, et al. Heritability estimation and path analysis for growth traits of the razor clam *Sinonovacula constricta* under high salinity[J]. Aquaculture, 2021, 545: 737175.
- [10] 陈泽辉. 群体与数量遗传学[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2009: 123-125.  
CHEN Zehui. Population and quantitative genetics[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House Co., Ltd. 2009: 123-125.
- [11] 孟德龙, 薛宝宝, 申奔龙, 等. 缢蛏抗高温新品系的早期选育与筛选[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(1): 71-74.  
MENG Delong, XUE Baobao, SHEN Benlong, et al. Early selective breeding and screening of new high temperature resistant lines of razor clam *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2020, 35(1): 71-74.
- [12] 王庆志, 李石磊, 付成东, 等. 虾夷扇贝耐高温育种家系的建立与早期筛查[J]. 水产学报, 2014, 38(3): 371-377.  
WANG Qingzhi, LI Shilei, FU Chengdong, et al. Establishment of high temperature resistance families and use of laboratory assays to predict subsequent survival in juvenile stage of the Japanese scallop (*Mizuhopecten yessoensis*)[J]. Journal of Fisheries China, 2014, 38(3): 371-377.
- [13] 张兴志, 官俊良, 何莘萍, 等. 香港牡蛎野生群体家系建立及耐高盐性筛选[J]. 南方农业学报, 2019, 50(2): 385-390.  
ZHANG Xingzhi, GUAN Junliang, HE Pingping, et al. Establishment of families and subsequent high salinity resistance testing for wild population of *Crassostrea hongkongensis*[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(2): 385-390.
- [14] 王化敏, 丁鉴锋, 杨东敏, 等. 4 种壳色菲律宾蛤仔在低氧胁迫下的耐受能力比较研究[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(2): 181-189.  
WANG Huamin, DING Jianfeng, YANG Dongmin, et al. Comparison of hypoxia stress tolerance among Manila clam *Ruditapes philippinarum* with four shell-colors[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2018, 33(2): 181-189.
- [15] NIU D H DU Y C, WANG Z, et al. Construction of the first high-density genetic linkage map and analysis of quantitative trait loci for growth-related traits in *Sinonovacula constricta*[J]. Marine Biotechnology, 2017, 19(5): 488-496.
- [16] 李炼星, 杜文俊, 王成东, 等. 缢蛏家系生长和耐热、耐高盐性能的对比较研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016(4): 515-521.  
LI Lianxing, DU Wenjun, WANG Chengdong, et al. Comparative analysis of growth and heat tolerance, salt tolerance traits among *Sinonovacula constricta* families[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2016(4): 515-521.
- [17] CHEN Y H, YE B, NIU D H, et al. Changes in metabolism and immunity in response to acute salinity stress in Chinese razor clams from different regions[J]. Aquaculture Reports, 2021, 19(6): 100624.
- [18] MAS-MUÑOZ J, BLONK R, SCHRAMA J W, et al. Genotype by environment interaction for growth of sole (*Solea solea*) reared in an intensive aquaculture system and in a semi-natural environment[J]. Aquaculture, 2013, 410-411: 230-235.
- [19] RAN Z S, LI Z Z, YAN X J, et al. Chromosome-level genome assembly of the razor clam *Sinonovacula constricta* (Lamarck, 1818)[J]. Molecular Ecology Resources, 2019, 19(6): 1647-1658.
- [20] 王金鹏. 牡蛎生长与高温耐受性状的遗传解析[D].

- 北京: 中国科学院大学, 2016.
- WANG Jinpeng. Genetic architecture dissection of growth-related and thermo-tolerant traits in oysters[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [21] 刘宝锁, 张天时, 孔杰, 等. 大菱鲆生长和耐高温性状的遗传参数估计[J]. 水产学报, 2011, 35(11): 1601-1606.
- LIU Baosuo, ZHAN Tianshi, KONG Jie, et al. Estimation of genetic parameters for growth and upper thermal tolerance traits in turbot *Scophthalmus maximus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(11): 1601-1606.
- [22] 林思恒, 吴富村, 张国范. 高温胁迫下皱纹盘鲍不同养殖群体心率变化比较[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 84-90.
- LIN Siheng, WU Fucun, ZHANG Guofan. Variation in cardiac response to thermal stress in two different cultured populations of *Pacific abalones*[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 84-90.
- [23] 曹学顺, 丁君, 常亚青, 等. 加州扁鸟蛤(*Clinocardium californiense*)数量性状的相关性及通径分析[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 139-146.
- CAO Xueshun, DING Jun, CHANG Yaqing, et al. Correlation and Path Analysis on Quantitative Traits of *Clinocardium californiense*[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(5): 139-146.
- [24] 吕昊泽, 刘健, 陈锦辉, 等. 盐度对长江口 3 种滤食性贝类滤水率、摄食率、同化率的影响[J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 10-17.
- LU Haoze, LIU Jian, CHEN Jinhui, et al. Effects of salinity on filtration, ingestion, and assimilation rates of three filter-feeding bivalves in the Yangtze River estuary[J]. Marine Sciences, 2016, 40(8): 10-17.
- [25] 张晓娟, 周莉, 桂建芳. 遗传育种生物技术创新与水产养殖绿色发展[J]. 中国科学: 生命科学, 2019(11): 1409-1429.
- ZHANG Xiaojuan, ZHOU Li, GUI Jianfang. Biotechnological innovation in genetic breeding and sustainable green development in Chinese aquaculture[J]. Scientia Sinica(Vitae), 2019(11): 1409-1429.
- [26] 马爱军, 黄智慧, 王新安, 等. 大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)耐高温品系选育及耐温性能评估[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(4): 797-804.
- MA Aijun, HUANG Zhihui, WANG Xinan, et al. The selective breeding of thermal tolerance family and appraisal of performance in turbot *scophthalmus maximus*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(4): 797-804.
- [27] 杨淞, 韦其锋, 严大明, 等. 孔雀鱼、月光鱼耐温限度的初步研究[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(1): 106-110.
- YANG Song, WEI Qifeng, YAN Taiming, et al. The preliminary study on temperature resistance of *Poecilia reticulata* and *Xiphophorus maculatus*[J]. Journal Of Sichuan Agricultural University, 2009, 27(1): 106-110.
- [28] 桑士田, 闫喜武, 霍忠明, 等. 家系内大、小两种规格菲律宾蛤仔的双列杂交[J]. 水产学报, 2012, 36(6): 832-837.
- SANG Shitian, YAN Xiwu, HUO Zhongming, et al. The diallel cross between large and small sizes within family of Manila clam (*Ruditapes philippinarum*)[J]. Journal Of Fishries China, 2012, 36(6): 832-837.
- [29] 户国, 谷伟, 白庆利, 等. 鲑鳟鱼类育种中常用策略、方法及其应用概述[J]. 水产学杂志, 2014, 27(6): 66-72.
- HU Guo, GU Wei, BAI Qingli, et al. An overview of common strategies, methods and applications in salmon and trout breeding[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2014, 27(6): 66-72.
- [30] 戴灼华, 王亚馥, 粟翼玟. 遗传学.第 2 版[M]. 北京: 高等教育出版社. 2008: 215-220.
- DAI Zhuohua, WANG Yafu, LI Yiwen. Genetics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 215-220.
- [31] 栾生, 孔杰, 张天时, 等. 基于表型值和育种值的中国对虾生长、抗逆性状相关分析[J]. 渔业科学进展, 2008, 29(3): 14-20.
- LUAN Sheng, KONG Jie, ZHANG Tianshi, et al. Phenotype and breeding value based correlation analyses of arowth and stress-resistance traits in *Fenneropenaeus chinensis*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2008, 29(3): 14-20.
- [32] 李加纳. 数量遗传学概论[M]. 重庆: 西南师范大学出版社. 2007.
- LI Jiana. An outline of quantitative genetics[M]. Chongqing: Southwest Normal University Press. 2007.
- [33] WANG B, WANG R D, WANG Y M. Compatible matrices of Spearman's rank correlation[J]. Statistics & Probability Letters, 2019, 151: 67-72.
- [34] 陈敏嫣, 水珊珊, 周晓娇, 等. 沿海紫贻贝体内重金属含量及相关性分析[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 24-29.
- CHEN Minyan, SHUI Shanshan, ZHOU Xiaojiao, et al. Analysis on the content and correlation of heavy metals in *Mytilus edulis*[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(6): 24-29.
- [35] 陈平雁, 黄浙明. IBM SPSS 19 统计软件应用教程[M]. 北京: 人民卫生出版社. 2012.
- CHEN Pingyan, HUANG Zheming. IBM SPSS 19 statistical software application tutorial[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2012.

# Correlation between high salt tolerance and growth performance of the razor clam *Sinonovacula constricta*

CHEN Yi-hua<sup>1, 3</sup>, NIU Dong-hong<sup>1, 2</sup>, DONG Zhi-guo<sup>3</sup>, LI Jia-le<sup>1, 2</sup>

(1. Shanghai Collaborative Innovation Center for Cultivating Elite Breeds and Green-culture of Aquaculture animals, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Marine Biotechnology, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Received: Sep. 28, 2021

**Key words:** *Sinonovacula constricta*; high salt tolerance; growth performance; correlation analysis

**Abstract:** The razor clam, *Sinonovacula constricta*, is an aquatic species of economic importance in China. Breeding for a new razor clam variety with improved salt tolerance can balance the yield of clams in different regions. In this study, the young razor clams from different families with a  $2.67 \pm 0.38$ -cm mean shell length and  $1.48 \pm 0.26$ -g mean body weight were used for the high salt stress experiment. Data were tested for correlation between high salt tolerance and growth performance of razor clams. The results showed that there was a wide variation in the phenotypic values of shell length, shell height, shell width, and body weight among different families. The coefficient of variation of body weight was 15.53%. The mortality among different families ranged from 0% to 100%, indicating that tolerance to high salt stress differed among the families. The family with the highest mortality had a large degree of variation in time to death, which indicated that there were great differences in high salt tolerance among individuals within the family. The stress experiment lasted for 9 days, and the razor clams died in large numbers on the 8th day. This showed that there was a threshold for high salt tolerance in razor clams. Pearson and Spearman correlation analysis showed that the survival time of the razor clam was significantly and positively correlated with shell length and body weight ( $P < 0.05$ ). The survival rate of razor clams in each family was significantly and positively correlated with body weight and specific growth rate ( $P < 0.05$ ). Overall, razor clams with longer shell lengths and heavier body weights were more tolerant to high salt stress and had a higher growth rate in the high salt environment. This study provides a baseline for the selection and breeding of the razor clam for high salt tolerance.

(本文编辑: 康亦兼)