

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20221228001

http://www.yykxjz.cn/

杜鑫鑫, 牛东红, 张树源, 邓敏, 王杰, 李家乐. 不同缢蛭群体应对高盐养殖环境的潜沙和摄食响应能力. 渔业科学进展, 2024, 45(3): 203–213

DU X X, NIU D H, ZHANG S Y, DENG M, WANG J, LI J L. Burrowing and feeding responses of different populations of *Sinonovacula constricta* to high-salt culture environment. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(3): 203–213

## 不同缢蛭群体应对高盐养殖环境的 潜沙和摄食响应能力\*

杜鑫鑫<sup>1</sup> 牛东红<sup>1,3</sup> 张树源<sup>1</sup> 邓敏<sup>1</sup> 王杰<sup>2</sup> 李家乐<sup>1,3</sup>

(1. 上海海洋大学水产动物遗传育种中心 上海市协同创新中心 上海 201306;

2. 三门东航水产育苗科技有限公司 浙江 三门 317100;

3. 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)

**摘要** 为研究缢蛭(*Sinonovacula constricta*)生态行为应对高盐养殖环境的响应能力,以2个缢蛭群体(“申浙一号”群体 SZSC 和自然群体 ZRSC)为实验对象,研究了不同盐度(20、24、28 和 32)对缢蛭群体潜沙行为、摄食生理的影响。对比2个群体潜沙指标和摄食率(FR)的差异,其中,潜沙行为实验设置盐度应激组(缢蛭从暂养池取出放进各盐度组开始实验)和胁迫组(缢蛭在各盐度条件下胁迫24 h后开始实验)。结果显示, SZSC 的120 h半致死盐度为34.04, ZRSC 的120 h半致死盐度为32.04。应激组中, SZSC 的半数潜沙时间(BT<sub>50</sub>)显著大于 ZRSC ( $P<0.05$ ),盐度为24时, SZSC 的BT<sub>50</sub>为4.2 min,显著低于盐度为28和32时的BT<sub>50</sub>;盐度为32时, SZSC 潜沙深度分布更集中,潜沙率为88.33%,显著高于 ZRSC ( $P<0.05$ )。而在胁迫组, SZSC 中BT<sub>50</sub>显著低于 ZRSC,潜沙率显著大于 ZRSC ( $P<0.05$ )。摄食生理上,除对照组外, SZSC 的FR均显著大于 ZRSC ( $P<0.05$ ), SZSC 的FR在盐度为24时达到最大值[89.54 mL/(g·h)],显著大于其他盐度组 ( $P<0.05$ )。研究表明,2个群体的生态行为均会受到盐度的影响,盐度越高,应激反应越强烈,其中, SZSC 对高盐环境具有较好的耐受性。本研究从生态行为水平评估了2个缢蛭群体对高盐环境的耐受性,揭示了高盐养殖环境下缢蛭在底泥中的垂直分布情况和摄食能力,研究结果为进一步开展缢蛭耐高盐新品系的选育提供了理论参考。

**关键词** 缢蛭; 潜沙行为; 摄食率; 高盐

**中图分类号** S967.5 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2024)03-0203-11

缢蛭(*Sinonovacula constricta*)是我国滩涂养殖的主要经济贝类(Niu *et al.*, 2016),南起广东、北至辽宁均有人工养殖。2021年我国缢蛭养殖产量达859 651 t(农业农村部渔业渔政管理局等, 2021)。

盐度是影响贝类生长发育、生态行为和生理变化的重要环境因子,贝类无论在地理分布还是养殖区域

都始终处于盐度动态变化中。在河口、近海潮间带滩涂和半封闭海域等地区,盐度状况会因降水、淡水径流或季节性蒸发而波动(Casas *et al.*, 2018; Molly *et al.*, 2016; Ran *et al.*, 2017)。全球变暖和人类活动加剧了沿海生态环境因子发生变化,给养殖贝类带来不同程度的损伤,甚至死亡(Carregosa *et al.*, 2014)。缢蛭主要

\* 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2019YFD0900700)资助。杜鑫鑫, E-mail: 1934616073@qq.com

① 通信作者: 牛东红, 教授, E-mail: dhniu@shou.edu.cn

收稿日期: 2022-12-28, 收修改稿日期: 2023-02-06

栖息于淡、咸水交汇的河口附近和沿海滩涂中,最适盐度范围为15~25,对于池塘混养模式下的缢蛏,其容易受到高盐度海水的影响(丁红兵等,2022)。

目前,我国山东和江苏沿海地区较高的盐度给缢蛏的养殖带来了一定的影响(Chen *et al.*, 2022)。近年来,在缢蛏养殖及增殖放流过程中,因高盐度海水诱发的大规模死亡、生长慢和行为应激能力差的现象越来越普遍,随之而来的是这些地区的整体生产力和良种保护率不断下降(李炼星等,2016;陈铭等,2021;陈义华,2022;丁红兵等,2022)。本研究以缢蛏为对象,探究了高盐度环境对2个不同群体生态行为的影响,以期从行为学水平为缢蛏耐高盐新品种选育提供具体策略,同时,为评估缢蛏高盐耐受性和行为应激能力提供参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验缢蛏为“申浙1号”新品种群体(SZSC)和浙江省三门湾的自然群体(ZRSC),SZSC具备生长快、抗逆性强等特点。实验前,在三门湾滩涂不同位置挖取深度为5 cm左右的泥沙,运回实验车间,经100目筛绢网过滤后用于实验。实验在浙江省三门县实验基地进行。实验前,将缢蛏置于泥沙中暂养,暂养海水为近海经沉淀的沙滤海水,pH为8.2,暂养盐度为20,水温为23~24 °C,养殖密度为300只/m<sup>2</sup>。暂养期间,投喂牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*),每日2次。实验所用容器为聚乙烯塑料水箱(42 cm×30 cm×22 cm)和2 L的烧杯,实验前,采用漂白粉溶液浸泡消毒2 h,再用海水反复冲洗备用。缢蛏生物学信息见表1。

表1 缢蛏生物学信息测定  
Tab.1 Biological data of *S. constricta*

群体 Populations	壳长 Shell length/cm	壳高 Shell height/cm	壳宽 Shell width/cm	湿重 Wet mass/g
“申浙一号” 群体 SZSC	2.75±0.15	0.99±0.07	0.74±0.07	1.33±0.26
自然群体 ZRSC	2.74±0.22	0.99±0.12	0.73±0.10	1.32±0.50

### 1.2 实验方法

**1.2.1 半致死盐度** 2个缢蛏群体经过3 d暂养后,置于实验水箱中进行半致死盐度实验。根据李炼星等(2016)的研究方法,设置6个盐度梯度31、32、33、34、35、36和1个对照组(20),每组设置3个平

行,每个平行30个个体。各实验组从盐度为20开始按每小时升高1的速率升至设定盐度,统计缢蛏在胁迫120 h后的死亡个数,计算相对存活率(relative survival rate, *P*, %),并运用概率单位法计算120 h的半致死盐度(120 h LC<sub>50</sub>)。

绝对存活率(absolute survival rate, *R*, %)

=实验结束时缢蛏存活数/总数;

相对存活率=绝对存活率/对照组存活率。

**1.2.2 潜沙行为实验** 潜沙行为实验分2组:一组是直接缢蛏从暂养池取出放进各盐度组开始实验(以下简称应激组),另一组是将缢蛏在各盐度条件下胁迫24 h后开始实验(以下简称胁迫组),设置4个不同的盐度梯度,分别为20、24、28和32,其中,盐度为20设为对照组,将海盐和淡水按照一定比例调配到实验盐度充气备用。每个盐度设3个平行,每个平行缢蛏总数为20只。

在洗净的水箱底部铺上处理后的底质,厚度为15 cm,使用PVC软管贴紧箱壁,在底质上层缓慢加入深度为5 cm的配制海水,稳定后,使各水箱盐度同设定盐度保持不变。待海水澄清后,将缢蛏个体缓慢置于底质表面,使用佳能EOS 600D照相机(日本)观察并记录缢蛏的潜沙过程,采用秒表记录缢蛏的潜沙时间(*T*)以及50%受试个体潜沙所用的时间,即半数潜沙时间(BT<sub>50</sub>),同时,记录缢蛏在30 min内成功潜沙的个数(*n*)。使用鱼线(金色,直径为0.12 mm,长度为30 cm)通过强力胶固定于缢蛏外壳纵轴方向的斧足端,2 h后,测量泥层下鱼线长度即为缢蛏潜沙深度(*D*)。潜沙时间指缢蛏从放置于底质表面开始到完全没入泥层的一段时间。缢蛏潜沙率计算公式:潜沙率=成功完成潜沙的个体数量(*n*)/实验总数(*N*)。

**1.2.3 摄食实验** 缢蛏摄食实验在2 L烧杯中进行,所投喂饵料为广盐性牟氏角毛藻,密度为2.5×10<sup>6</sup>个/mL,盐度梯度设置同1.2.2。实验前,在烧杯中倒入1 L藻水,调配到设定盐度,持续充气,待盐度稳定后,每个烧杯投放6只缢蛏,实验进行6 h。实验结束后,将采集的水样加鲁戈氏液固定,待镜检,采用血球计数板于显微镜下计数,重复3次。将实验缢蛏去除双壳保留软体组织放入烘箱,在60 °C条件下烘干至恒重并称量,软组织干质量精确到0.001 g。

缢蛏摄食率[feeding rate, FR, mL/(g·h)]计算公式(刘其根,2020):

$$FR = V[\ln(C_{e0}/C_{et}) - \ln(C_{c0}/C_{ct})]/wt$$

式中,*V* (mL)为实验水体体积;*w* (g)为实验用贝组织干质量;*t* (h)为实验持续时间;*C*<sub>e0</sub> (cells/mL)为实验开始时空白对照组的藻类初始浓度;*C*<sub>et</sub> (cells/mL)为*t*

时间空白对照组的藻类浓度;  $C_{e0}$  (cells/mL)为实验开始时实验组的藻类浓度;  $C_{et}$  (cells/mL)为  $t$  时间实验组的藻类浓度。

### 1.3 数据处理

实验所得数据采用平均值±标准差(Mean±SD)表示, 并运用 IBM SPSS26 统计软件进行统计分析。采用三因素方差分析(three-way, ANOVA), 探讨群体、盐度和实验组别对缢蛏潜沙指标的影响, 采用双因素方差分析(two-way ANOVA)探讨群体和盐度对缢蛏 FR 的影响, 使用 Duncan's 检验进行多重比较。 $P<0.05$  为显著性水平,  $P<0.01$  为极显著性水平。使用 Origin

2019 软件制图。

## 2 结果

### 2.1 半致死盐度

本研究显示, 2 个缢蛏群体的相对存活率随着盐度的升高呈下降趋势(图 1)。其中, SZSC 在盐度为 34 和 35 时, 平均相对存活率分别为 55.68% 和 45.69%; ZRSC 在盐度为 32 和 33 时, 其平均相对存活率分别为 56.63% 和 37.35%。通过概率单位法确定 SZSC 的 120 h 半致死盐度为 34.04, ZRSC 的 120 h 半致死盐度为 32.04 (表 2)。

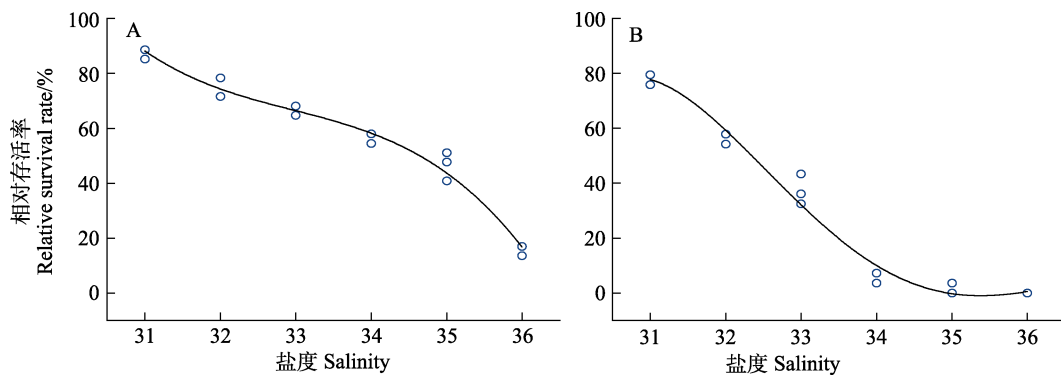


图 1 缢蛏在不同盐度下的相对存活率

Fig.1 Relative survival rates of *S. constricta* at different salinity levels

A: “申浙一号” 群体; B: 自然群体

A: “Shenzhen No.1” *S. constricta* population; B: Natural *S. constricta* population

表 2 概率单位法分析缢蛏 120 h 的半致死盐度

Tab.2 The salinity LC<sub>50</sub> of *S. constricta* at 120 h using the probit analysis method

群体 Populations	回归方程 Regression equation	120 h 半致死盐度 120 h LC <sub>50</sub>	下限 Lower limit	上限 Upper limit
“申浙一号” 群体 “Shenzhen No.1” <i>S. constricta</i>	$y=0.361x-12.301$	34.04	33.43	34.81
自然群体 Natural <i>S. constricta</i>	$y=0.684x-21.916$	32.04	31.55	32.43

### 2.2 缢蛏潜沙行为的过程

缢蛏的潜沙过程包括闭壳准备期、斧足运动期、掘泥竖壳期和潜沙结束期。闭壳准备期是指缢蛏被放置于底质表面直至开始运动这段过程(图 2A); 随后, 缢蛏双壳微微张开, 斧足开始伸出并摩擦底质, 这段过程称为斧足运动期(图 2B); 掘泥竖壳期间, 缢蛏斧足开始挖掘底质, 并不断摆动躯体将壳竖起, 依靠斧足吸附力不断下潜(图 2C); 潜沙结束期指缢蛏完全没入底质后时期, 表面留下供气体和食物交换的通道(图 2D)。

### 2.3 高盐对缢蛏潜沙时间的影响

实验观察到缢蛏潜沙时间跨度较大, 为了更准确地对比 2 个缢蛏群体在高盐条件下潜沙时间的差异, 本研究统计了缢蛏半数潜沙时间(BT<sub>50</sub>), 即 50% 受试个体潜沙所用的时间。三因素方差分析表明, 群体、盐度和实验组对缢蛏的 BT<sub>50</sub> 均有极显著影响( $P<0.01$ ), 且 3 个因素对缢蛏的 BT<sub>50</sub> 有交互作用(表 3)。从图 3 可以看出, 无论是 SZSC 还是 ZRSC, 各盐度梯度下胁迫组缢蛏 BT<sub>50</sub> 均大于应激组, 但 SZSC 在盐度为 20 和 28 时, 胁迫组和应激组的 BT<sub>50</sub> 相比无显著差异。

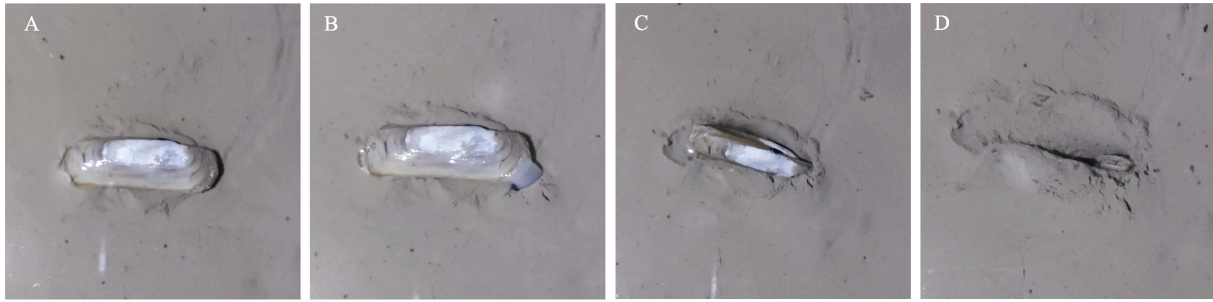


图 2 缢蛭的潜沙过程

Fig.2 Burrowing process of *S.constricta*

A: 闭壳准备期; B: 斧足运动期; C: 掘泥竖壳期; D: 潜沙结束期

A: Preparation; B: Moving axefoot; C: Drilling mud and stacking shell; D: Burrowing into mud

表 3 群体、盐度和实验组别对缢蛭半数潜沙时间影响的三因素方差分析

Tab.3 Three-way ANOVA of population, salinity and group on  $BT_{50}$  of *S. constricta*

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
群体 Population	9.105	1	9.105	150.782	0
盐度 Salinity	69.255	3	23.085	382.284	0
实验组别 Group	66.488	2	33.244	550.519	0
群体×盐度 Population×Salinity	6.521	3	2.174	35.996	0
群体×实验组别 Population×Group	38.245	1	38.245	633.328	0
盐度×实验组别 Salinity×Group	40.766	3	13.585	224.972	0
群体×盐度×实验组别 Population×Salinity×Group	27.910	3	9.303	154.062	0
误差 Deviation	1.872	31	0.060		
总计 Total	1 817.794	48			

在应激组中, 盐度为 20、28 和 32 时, SZSC 的  $BT_{50}$  显著大于 ZRSC; 在胁迫组中, 除对照组外, ZRSC 的  $BT_{50}$  均显著大于 SZSC ( $P<0.05$ )。

在应激组中, 盐度为 24 时, SZSC 的  $BT_{50}$  为 4.20 min, 显著低于盐度为 28 和 32 的  $BT_{50}$  ( $P<0.05$ ); 胁迫组中, SZSC 在盐度为 24 和 28 时,  $BT_{50}$  分别为 5.12 min 和 5.28 min, 显著高于对照组, 同时, 显著低于盐度为 32 时的  $BT_{50}$  ( $P<0.05$ )。而应激组 ZRSC 在盐度为 32 时,  $BT_{50}$  最小, 仅为 3.48 min, 显著低于 SZSC ( $P<0.05$ ); 在盐度为 24 和 28 时, ZRSC 的  $BT_{50}$  相比无显著差异, 但显著高于盐度为 20 和 32 时的  $BT_{50}$  ( $P<0.05$ ); 胁迫组 ZRSC 在各个盐度条件下的  $BT_{50}$  均存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 且与盐度成正比关系, 在盐度为 32 时达到最大(13.11 min)。通过比较发现, SZSC 在盐度为 24 和 28 时,  $BT_{50}$  与对照组更接近, 在盐度胁迫 24 h 后, SZSC 活力显著优于 ZRSC。

## 2.4 高盐对缢蛭潜沙率及潜沙深度的影响

三因素方差分析表明, 群体、盐度和实验组对缢蛭的潜沙率均有极显著影响 ( $P<0.01$ ), 与缢蛭  $BT_{50}$  的分析结果一致, 但 3 个因素对缢蛭的潜沙率无交互作用(表 4)。

从图 4 可以看出, 在应激组中, SZSC 潜沙率在盐度为 24 时达到最高(96.67%); 盐度为 32 时, 潜沙率为 88.33%, 显著高于 ZRSC ( $P<0.05$ ); 随着盐度的升高, ZRSC 潜沙率呈显著下降的趋势。在胁迫组中, 盐度为 24、28 和 32 时, SZSC 潜沙率均显著高于 ZRSC ( $P<0.05$ ); 盐度为 24 时, SZSC 潜沙率达到最高(93.33%), 显著高于盐度为 28 和 32 的潜沙率 ( $P<0.05$ ); 盐度为 32 时, SZSC 潜沙率为 78.33%, 远高于 ZRSC 的潜沙率(56.67%); 与应激组趋势相同, 随着盐度的升高, ZRSC 的潜沙率也呈下降的趋势, 但在盐度为 28~32 时, 下降的幅度更大。

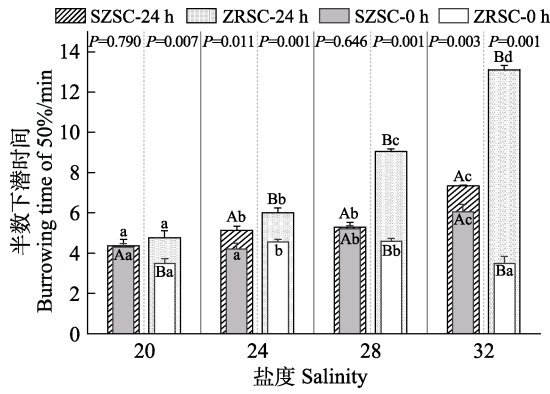


图 3 缢蛏在不同盐度下的半数潜沙时间

Fig.3 BT<sub>50</sub> of *S. constricta* at different salinity levels

不同大写字母表示同一盐度下不同缢蛏群体存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示不同盐度下同一群体存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); 0 h 是应激实验组, 24 h 是胁迫实验组。

SZSC: “申浙一号”群体; ZRSC: 自然群体。下同。

Different uppercase letters indicate significant differences in BT<sub>50</sub> among different populations of *S. constricta* at each salinity, different lowercase letters indicate significant differences in BT<sub>50</sub> of the same population at different salinity levels, 0 h is the non-stress group and 24 h is the stress group.

SZSC: “Shenzhe No.1” *S. constricta* population;

ZRSC: Natural *S. constricta* population. The same below.

实验得到的缢蛏潜沙深度因个体而异, 故通过箱线图来反映 2 个缢蛏群体潜沙深度的垂直分布情况。三因素方差分析表明, 缢蛏潜沙深度无显著的群体间差异, 但盐度和实验组别显著影响缢蛏的潜沙深度 ( $P < 0.01$ ), 且 3 个因素对缢蛏的潜沙深度有交互作用 (表 5)。从图 5 可以看出, 在应激组中, 2 个群体在盐

度为 24 时, 平均潜沙深度均显著小于其他盐度组, 随着盐度的升高, 其潜沙深度也随之加深。盐度为 32 时, ZRSC 平均潜沙深度最深, 达到 8.22 cm, 显著大于 SZSC ( $P < 0.05$ )。SZSC 在盐度为 32 时, 潜沙分布更集中, 50% 的个体分布在 7.29~7.55 cm 之间, 而 ZRSC 在盐度为 24 时, 潜沙分布更集中。

在胁迫组中, 2 个群体的平均潜沙深度均小于应激组, 随着盐度的升高, 单个群体的潜沙深度无明显趋势, 盐度为 32 时, ZRSC 平均潜沙深度为 7.45 cm, 显著大于 SZSC 的 6.56 cm ( $P < 0.05$ ); 盐度为 28 时, 潜沙深度趋势和对照组相同, SZSC 的平均潜沙深度显著大于 ZRSC ( $P < 0.05$ )。本研究发现, 在高盐条件下, SZSC 比 ZRSC 潜沙分布集中, 潜沙深度较浅。

### 2.5 高盐对缢蛏摄食率(FR)的影响

缢蛏属于滤食性贝类, 其摄食行为主要依靠入水管摄取食物。本研究通过 FR 衡量缢蛏在高盐条件下摄食行为的变化。从图 6 可以看出, 高盐条件对缢蛏摄食行为具有显著影响, 对照组中, ZRSC 的 FR 大于 SZSC, 但无显著差异; 在其他盐度条件下, SZSC 的 FR 均显著大于 ZRSC ( $P < 0.05$ )。随着盐度的升高, ZRSC 的 FR 呈显著下降趋势, 而 SZSC 的 FR 在盐度为 24 时达到最高 [89.54 mL/(g·h)], 显著大于其他盐度组 ( $P < 0.05$ )。双因素方差分析表明, 不同缢蛏群体和盐度对 FR 的影响均极显著 ( $P < 0.01$ ), 群体和盐度的交互作用对 FR 的影响同样极显著 ( $P < 0.01$ ) (表 6)。

表 4 群体、盐度和实验组别对缢蛏潜沙率影响的三因素方差分析

Tab.4 Three-way ANOVA of population, salinity and group on burrowing rate of *S. constricta*

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
群体 Population	0.064	1	0.064	41.178	0.000
盐度 Salinity	0.233	3	0.078	50.237	0.000
实验组别 Group	0.106	2	0.053	34.138	0.000
群体×盐度 Population×Salinity	0.026	3	0.009	5.550	0.004
群体×实验组别 Population×Group	0.014	1	0.014	8.896	0.006
盐度×实验组别 Salinity×Group	0.021	3	0.007	4.616	0.009
群体×盐度×实验组别 Population×Salinity×Group	0.005	3	0.002	1.006	0.403
误差 Deviation	0.048	31	0.002		
总计 Total	36.225	48			

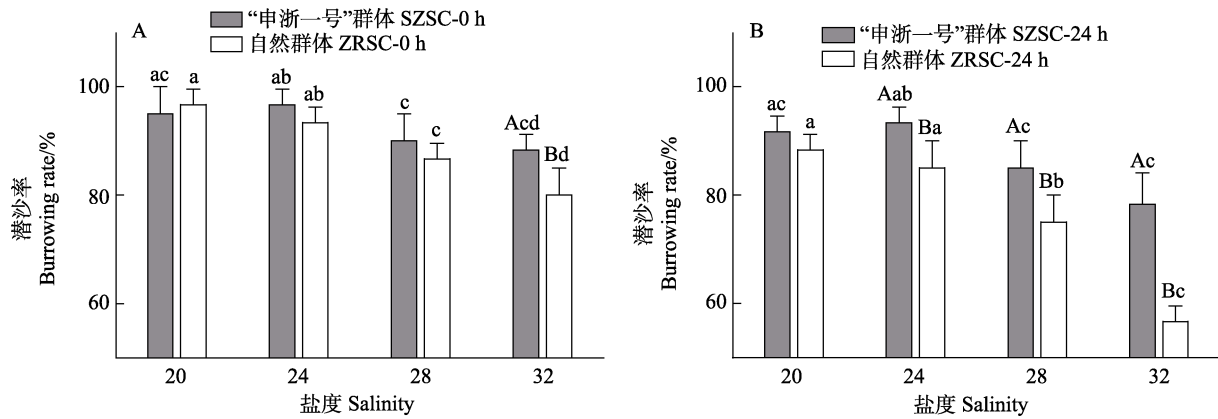


图 4 缢蛭在不同盐度下应激实验组(A)和胁迫实验组(B)的潜沙率

Fig.4 Burrowing rate of *S. constricta* in non-stress test group (A) and salt stress test group (B) at different salinity levels

表 5 群体、盐度和实验组别对缢蛭潜沙深度影响的三因素方差分析

Tab.5 Three-way ANOVA analysis of population, salinity and group on burrowing depth of *S. constricta*

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
群体 Population	1.519	1	1.519	3.729	0.054
盐度 Salinity	40.778	3	13.593	33.380	0.000
实验组别 Group	106.030	2	53.015	130.188	0.000
群体×盐度 Population×Salinity	7.545	3	2.515	6.176	0.000
群体×实验组别 Population×Group	4.919	2	2.459	6.039	0.002
盐度×实验组别 Salinity×Group	25.904	6	4.317	10.602	0.000
群体×盐度×实验组别 Population×Salinity×Group	9.921	6	1.654	4.061	0.001
误差 Deviation	327.403	804	0.407		
总计 Total	35 170.420	828			

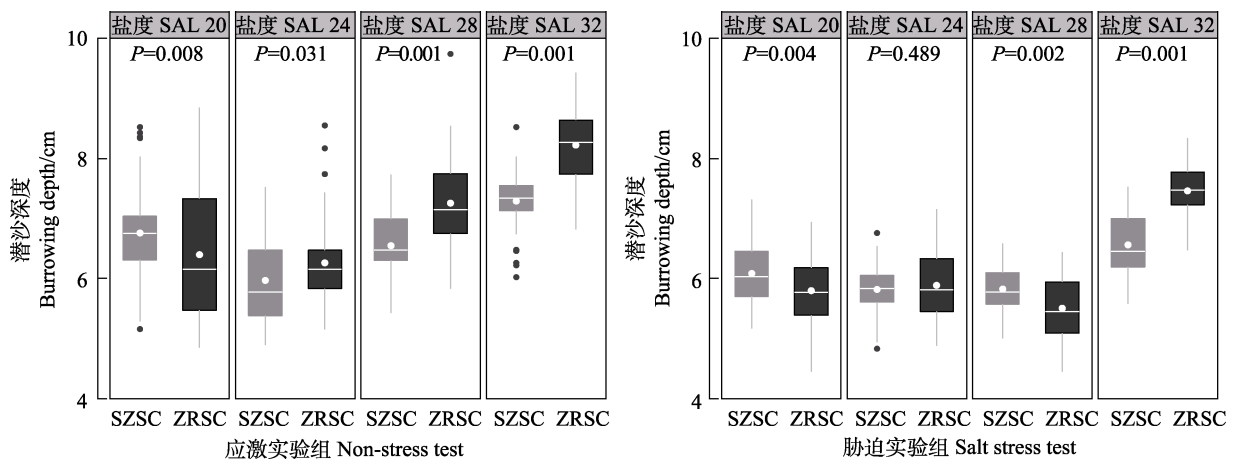


图 5 缢蛭在不同盐度下的潜沙深度

Fig.5 Burrowing depth of *S. constricta* at different salinity levels

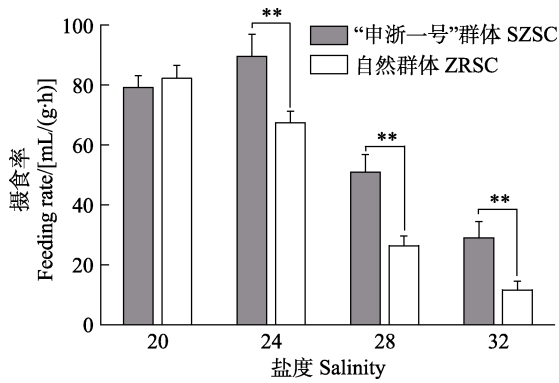


图 6 缢蛏在不同盐度下的摄食率

Fig.6 Feeding rate of *S. constricta* at different salinity levels

\*\*表示差异极显著( $P < 0.01$ )。

\*\* shows highly significant differences( $P < 0.01$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 缢蛏潜沙行为的变化过程

缢蛏跟大部分双壳贝类一样营埋栖生活,其足部

呈斧刃状,适于挖掘泥沙将自身完全埋藏泥底。目前,还未有文献去定义缢蛏的潜沙行为。本研究根据缢蛏的潜沙过程,首次将其分为闭壳准备期、斧足运动期、掘泥竖壳期和潜沙结束期 4 个阶段。前 3 个阶段在底质表面完成,可肉眼观察到缢蛏潜沙的运动方式,最后一个阶段,缢蛏向下垂直运动完全没入底质,表面出现距离相近的由出、入水管形成的 2 个小孔供呼吸和摄食。缢蛏与其他埋栖型贝类比较发现,缢蛏平均潜沙时间比文蛤(*Meretrix meretrix*) (李磊等, 2017)、菲律宾帘蛤(*Ruditapes philippinarum*) (杨凤等, 2016)、侏儒蛤(*Mulinia lateralis*) (黄晓婷等, 2020)等贝类更短,而潜沙深度更深,但与同为竹蛏科(*Solen strictu*)的大竹蛏(*Solen grandis*) (王焱等, 2019)相近。与已报道的魁蚶(*Anadara broughtonii*) (王为民等, 2018)、毛蚶(*Scapharca subcrenata*) (陈雷等, 2016)等有所不同,由于蚶类不具备水管,因此,在埋栖行为完成后,不会像缢蛏一样在表面留下清晰可辨的由水管形成的孔。

表 6 群体和盐度对缢蛏摄食率影响的双因素方差分析

Tab.6 Two-way ANOVA of population and salinity on feeding rate of *S. constricta*

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
群体 Population	1 395.117	1	1 395.117	59.550	0.000
盐度 Salinity	16 103.061	3	5 367.687	229.117	0.000
群体×盐度 Population×Salinity	711.913	3	237.304	10.129	0.001
误差 Deviation	374.844	16	23.428		
总计 Total	89 928.830	24			

#### 3.2 盐度对埋栖型贝类潜沙行为的影响

盐度是生理和行为方面最具影响力的环境变量之一,其波动可能会破坏机体的渗透压平衡,从而影响贝类的生理生态。本研究中,高盐环境对缢蛏的潜沙行为具有显著影响,大部分缢蛏在 30 min 内均能完成潜沙,其潜沙率在盐度为 24 时达到最高,但潜沙深度最小,当盐度达到 32 时,其潜沙率显著下降,潜沙深度达到最大。这与张安国等(2015)对文蛤潜沙行为的研究结果相一致,随着盐度的升高,其潜沙率逐渐升高并在盐度为 26 时达到最高值,当盐度达到 30 时,小规格文蛤潜沙率达到最低值,仅为 43%。黄晓婷等(2020)研究表明,高盐和低盐条件均影响侏儒蛤的潜沙行为,但随着盐度胁迫时间的增加,其受到的影响逐渐减弱。本研究中,缢蛏随着胁迫时间的增加受到的影响更大,具体表现为潜沙时间增加和潜沙率的降低,而经过选育的“申浙一号”新品种缢蛏

耐高盐性能优于未经选育的自然群体,其受到盐度波动的影响更小。

目前,国内外有关盐度对贝类潜沙行为影响的研究较多。除高盐外,在低盐条件下,四角蛤蜊(*Macrta veneriformis*)的潜沙率随着盐度降低呈下降的趋势,在盐度为 6.7 条件下,潜沙率仅为 30% (Nakamura *et al*, 2009)。菲律宾帘蛤盐度由 30 突变至 10 时,没有蛤仔潜沙,突变至 20 时,有 20%~30%潜沙(20 °C, 庄河蛤仔)或 100%潜沙(15 °C, 福建蛤仔)(杨凤等, 2016)。砂海螂(*Mya arenaria*)在低盐度(5)或波动盐度(5~15)条件下,驯化 21~28 d,潜沙速度和复埋次数都呈下降趋势,低盐胁迫会导致其潜沙能力的降低(Haider *et al*, 2018)。Woodin 等(2020)研究表明,在盐度低于 15 时,菲律宾帘蛤、沟纹蛤仔(*Ruditapes decussatus*)和比利时波纹浅蛤(*Venerupis corrugate*)的潜沙活动都会减少,表面出现虹吸的次数也随之减少。上述研究表明,盐度过高或过低都会对埋栖型贝类的潜沙行

为产生一定阻碍作用。本研究中,缢蛭在盐度突然升高时,其潜沙率总体呈下降趋势,但均能保持在 80% 以上,说明相较于其他贝类,缢蛭在不良环境下的应激躲避反应更强烈,自我保护能力更强。

### 3.3 盐度对埋栖型贝类摄食率的影响

摄食是生物的基本生态行为之一,是从外界获得营养物质维持正常生命活动的方式(王新安等,2006)。关于埋栖型贝类的摄食生理研究多集中在双壳滤食性贝类,其主要依靠入水管摄取藻类,FR 是反映滤食性贝类生理状态的一项动态指标(包永波等,2006;侯兴等,2021;潘绘竹,2020;彭剑等,2017)。研究表明,盐度变化会显著影响贝类的摄食行为,目前,在海洋经济贝类的研究中,四角蛤蜊、光滑河蓝蛤(*Potamocorbula laevis*)(滕炜鸣等,2018)、文蛤(杨杰青等,2016)、大珠母贝(*Pinctada maxima*)和合浦珠母贝(*Pinctada fucata*)(范嗣刚等,2014)、尖紫蛤(*Soletellina acuta*)(黄洋等,2014)等贝类的 FR 均会随盐度的增加呈先上升后下降的趋势,FR 达到峰值时的盐度一般被认为是最佳摄食盐度。本研究通过 FR 衡量缢蛭在高盐度条件下摄食行为的变化,与其他贝类一致,缢蛭的 FR 随盐度的增加呈先上升后下降的趋势,SZSC 的 FR 在盐度为 24 时达到最高,而 ZRSC 的最佳摄食盐度为 20,这与吕昊泽等(2016)研究的缢蛭最佳摄食盐度为 20 结果一致。这些研究表明,低盐和高盐环境都会打破机体的渗透压平衡,从而影响摄食行为,大多数海洋埋栖型贝类的最佳摄食盐度为 20~30,这是贝类长期适应自然海区盐度选择的结果。

综上所述,适当提高盐度有利于缢蛭快速潜沙和摄食,在高盐条件下,“申浙一号”群体的潜沙和摄食能力优于自然群体,具有更好的选育潜力。本研究首次从行为学水平评估了缢蛭对高盐的耐受性,为缢蛭耐高盐选育提供了参考资料。

## 参 考 文 献

BAO Y B, YOU Z J. The present researching status of ingestion rate's influence factors of marine suspension-feeding shellfish. *Marine Fisheries Research*, 2006, 27(1): 76-80 [包永波, 尤仲杰. 海洋滤食性贝类摄食率影响因子研究现状. 海洋水产研究, 2006, 27(1): 76-80]

Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2021. Beijing: China Agriculture Press, 2021[农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2021

中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2021]

CARREGOSA V, FIGUEIRA E, GIL A M, *et al.* Tolerance of *Venerupis philippinarum* to salinity: Osmotic and metabolic aspects. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular and Integrative Physiology*, 2014, 171: 36-43

CASAS S M, FILGUEIRA R, LAVAUD R, *et al.* Combined effects of temperature and salinity on the physiology of two geographically-distant eastern oyster populations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2018, 506: 82-90

CHEN L, GUO L Y, ZHANG S, *et al.* The observation and analysis of burrowing behaviors of ark shell *Scapharca subcrenata* in different substrates and sowing conditions. *Fishery Modernization*, 2016, 43(4): 22-26 [陈雷, 郭良勇, 张嵩, 等. 毛蚶在不同底质与撒播方式下潜沙行为的观测与分析. 渔业现代化, 2016, 43(4): 22-26]

CHEN M, LIN Z H, XU X, *et al.* Effects of salinity stress on blood ion concentration and carbonic anhydrase gene expression in *Sinonovacula constricta*. *Journal of Biology*, 2021, 38(1): 83-87 [陈铭, 林志华, 徐娴, 等. 盐度胁迫对缢蛭血液离子浓度及碳酸酐酶基因表达的影响. 生物学杂志, 2021, 38(1): 83-87]

CHEN Y H, DU X X, DONG Z G, *et al.* Heritability estimation of high salt tolerance in razor clam (*Sinonovacula constricta*). *Aquaculture*, 2022, 559: 738423

CHEN Y H. Evaluation and genetic analysis of high salt tolerance in razor clams *Sinonovacula constricta*. Doctoral Dissertation of Shanghai Ocean University, 2022 [陈义华. 缢蛭耐高盐性能评价以及相关性状遗传解析. 上海海洋大学博士研究生学位论文, 2022]

DING H B, LI H Y, CHEN Y H, *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*. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(4): 831-838 [丁红兵, 李浩宇, 陈义华, 等. 高盐对缢蛭生长存活、 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase 活性及能量代谢相关指标的影响. 上海海洋大学学报, 2022, 31(4): 831-838]

FAN S G, HUANG G J, LIU B S, *et al.* Effects of salinity and temperature on the filtration rate and ingestion rate of *Pinctada maxima* and *Pinctada fucata*. *Journal of Hydroecology*, 2014, 35(3): 61-65 [范嗣刚, 黄桂菊, 刘宝锁, 等. 盐度与温度对大珠母贝和合浦珠母贝滤水率及摄食率的影响. 水生生态学杂志, 2014, 35(3): 61-65]

HAIDER F, SOKOLOV E P, SOKOLOVA I M. Effects of mechanical disturbance and salinity stress on bioenergetics and burrowing behavior of the soft-shell clam *Mya arenaria*. *Journal of Experimental Biology*, 2018, 221(P4): jeb172643

HOU X, WANG Y, LIU T H, *et al.* Effects of feeding activities by four common economic bivalves on the production of dimethyl sulfur compounds from *Isochrysis galbana*. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(5): 124-131 [侯兴,



- 王颖, 刘天红, 等. 4 种常见经济滤食性贝类摄食活动对球等鞭金藻产生二甲基硫化物的影响. 渔业科学进展, 2021, 42(5): 124–131]
- HUANG X T, YANG Z J, WANG H, *et al.* A study on burrowing behavior of *Mulinia lateralis*. Periodical of Ocean University of China (Natural Science), 2020, 50(9): 64–71 [黄晓婷, 杨祖晶, 王浩, 等. 侏儒蛤潜沙行为研究. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(9): 64–71]
- HUANG Y, HUANG H L, DENG L P, *et al.* Effects of salinity, pH and sizes on clearance rate, ingestion rate and absorption efficiency of *Soletellina acuta*. Journal of Guangdong Ocean University, 2014, 34(1): 42–47 [黄洋, 黄海立, 邓乐平, 等. 盐度、pH 和规格对尖紫蛤滤水率、摄食率、吸收率的影响. 广东海洋大学学报, 2014, 34(1): 42–47]
- LI L X, DU W J, WANG C D, *et al.* Comparative analysis of growth and heat tolerance, salt tolerance traits among *Sinonovacula constricta* families. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(4): 515–521 [李炼星, 杜文俊, 王成东, 等. 缢蛏家系生长和耐热、耐高盐性能的对比研究. 上海海洋大学学报, 2016, 25(4): 515–521]
- LI L, BAI Y C, HUANG S L. *et al.* Substrate preference and sand burrowing ability assessment of *Meretrix meretrix*. Marine Fisheries, 2017, 39(5): 548–553 [李磊, 柏育材, 黄士林, 等. 文蛤的底质选择性及潜沙能力研究. 海洋渔业, 2017, 39(5): 548–553]
- LIU Q G, ZHANG M X, CHEN L P, *et al.* Effects of algal species, shellfish body size and density on the feeding rates of *Anodonta woodiana* and *Corbicula fluminea*. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(3): 331–338 [刘其根, 张明星, 陈丽平, 等. 藻种、贝类密度和大小对背角无齿蚌和河蚬摄食率的影响. 上海海洋大学学报, 2020, 29(3): 331–338]
- LÜ H Z, LIU J, CHEN J H, *et al.* Effects of salinity on filtration, ingestion, and assimilation rates of three filter-feeding bivalves in the Yangtze River estuary. Marine Sciences, 2016, 40(8): 10–17 [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. 海洋科学, 2016, 40(8): 10–17]
- MOLLY R, MEGAN K L P, STEVEN G H, *et al.* Increased temperatures combined with lowered salinities differentially impact oyster size class growth and mortality. Journal of Shellfish Research, 2016, 35(1): 101–113
- NAKAMURA Y, HASHIZUME K, KOYAMA K, *et al.* Effects of salinity on sand burrowing activity, feeding and growth of the clams *Mactra veneriformis*, *Ruditapes philippinarum* and *Meretrix lusoria*. Journal of Shellfish Research, 2009, 24(4): 1053–1059
- NIU D H, WANG F, XIE S M, *et al.* Developmental transcriptome analysis and identification of genes involved in larval metamorphosis of the razor clam, *Sinonovacula constricta*. Marine Biotechnology, 2016, 18(2): 168–175
- PAN H Z. Study on feeding selectivity of different phytoplankton assemblages by several typical bivalve species in the Yellow Sea and Bohai Sea. Master's Thesis of Jinan University, 2020 [潘绘竹. 黄渤海海域几种典型双壳贝类对浮游植物的摄食规律研究. 暨南大学硕士研究生学位论文, 2020]
- PENG J, ZHANG A, LI Y M, *et al.* Effect of main factors on shellfish feeding analysis. South China Agriculture, 2017, 11(24): 77–78 [彭剑, 张奥, 李由明, 等. 影响贝类摄食的主要因素分析. 南方农业, 2017, 11(24): 77–78]
- RAN Z S, LI S, ZHANG R T, *et al.* Proximate, amino acid and lipid compositions in *Sinonovacula constricta* (Lamarck) reared at different salinities. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(13): 4476–4483
- TENG W M, GAO S L, LIU X, *et al.* Effects of salinity on filtration and ingestion rates of surf clam *Mactra veneriformis* and clam *potamocorbula laevis* in Liaodong Bay. Fisheries Science, 2018, 37(5): 622–627 [滕炜鸣, 高士林, 刘谓, 等. 盐度对辽东湾四角蛤蜊和光滑河蓝蛤摄食率和滤水率的影响. 水产科学, 2018, 37(5): 622–627]
- WANG W M, ZHANG T W, LIU G X, *et al.* Effects of elevated seawater pCO<sub>2</sub> on the burrowing ability and three enzymes of *Scapharca broughtonii* (Bivalvia: Arcidae) juvenile. Periodical of Ocean University of China(Natural Science), 2018, 48(5): 19–24 [王为民, 张天文, 刘光兴, 等. CO<sub>2</sub> 加富对魁蚶稚贝潜沙能力和 3 种酶活性的影响. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(5): 19–24]
- WANG X A, MA A J, ZHANG X M, *et al.* A review on feeding behavior ecology of early development stage of marine fish. Marine Sciences, 2006(11): 69–74 [王新安, 马爱军, 张秀梅, 等. 海洋鱼类早期摄食行为生态学研究进展. 海洋科学, 2006(11): 69–74]
- WANG Y, DONG S S, LI D D, *et al.* Effect of sediment thickness and sand ratio on the burrowing behavioral and enzyme activities of *Solen grandis*. Journal of Economic Animal, 2019, 23(2): 84–88, 93 [王垚, 董莎莎, 李东东, 等. 不同底质厚度和泥沙比例对大竹蛏潜沙行为及酶活性的影响. 经济动物学报, 2019, 23(2): 84–88, 93]
- WOODIN S A, WETHEY D S, OLABARRIA C, *et al.* Behavioral responses of three venerid bivalves to fluctuating salinity stress. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2020, 522: 151256
- YANG F, ZENG C, WANG H, *et al.* Effects of environmental factors and clam size on the burrowing behavior of Manila clam *Ruditapes philippinarum*. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(3): 795–802 [杨凤, 曾超, 王华, 等. 环境因子及规格对菲律宾蛤仔幼贝潜沙行为的影响. 生态学报, 2016, 36(3): 795–802]
- YANG J Q, JIANG M, LI L, *et al.* Effects of salinity and pH on the filtration rate and ingestion rate of *Meretrix meretrix*. Progress in Fishery Sciences, 2016, 37(6): 87–93 [杨杰青,

蒋玫, 李磊, 等. 盐度、pH对文蛤(*Meretrix meretrix*)滤水率和摄食率的影响. 渔业科学进展, 2016, 37(6): 87-93  
ZHANG A G, YUAN X T, YANG F Y, *et al.* Effects of temperature, salinity and sediment on the burrowing

behavior of clam *Meretrix meretrix*. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(6): 1595-1601 [张安国, 袁秀堂, 杨凤影, 等. 温度、盐度及底质对文蛤潜砂行为的影响. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1595-1601]

(编辑 陈 严)

## Burrowing and Feeding Responses of Different Populations of *Sinonovacula constricta* to High-Salt Culture Environment

DU Xinxin<sup>1</sup>, NIU Donghong<sup>1,3</sup>①, ZHANG Shuyuan<sup>1</sup>, DENG Min<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>2</sup>, LI Jiale<sup>1,3</sup>

(1. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Sanmen Eastern Fisheries Limited, Sanmen 317100, China; 3. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract** The razor clam (*Sinonovacula constricta*, Class Bivalvia) is a kind of burial filter-feeding shellfish. Salinity fluctuation is an important source of pressure for water habitats. High salinity in some coastal areas of Shandong and Jiangsu impact the survival and germplasm conservation of razor clam. To study the ecological behavior response of *S. constricta* to high salt culture environment, two populations of razor clams were used, including "Shenzhen No.1" population (SZSC) and a natural population (ZRSC). The semi-lethal salinity level of each population was determined. The effects of control group (20) and high salinity (24, 28, 32) on burrowing and feeding behavior of razor clams were studied. The differences in burrowing indices and feeding physiology between the two populations were compared. In the burrowing behavior experiment, two groups were set; razor clams from the temporary pond were put into each salinity group to start the experiment, while the other group of razor clams were stressed under each salinity condition for 24 h and then put into each salinity group to start the experiment. The results showed that the 120 h LC<sub>50</sub> of SZSC was 34.04, while the 120 h LC<sub>50</sub> of ZRSC was 32.04. The burrowing behavior of razor clams could be divided into four periods: The preparation period of shell closure, the period of axe foot movement, mud digging period, and the end period of mud diving. In the non-stressed group, the burrowing time of 50% (BT<sub>50</sub>) of SZSC was significantly higher than that of ZRSC ( $P < 0.05$ ). The BT<sub>50</sub> of SZSC at 24 salinity was the minimum, which was significantly lower than that of BT<sub>50</sub> at 28 and 32 salinity. The distribution of burrowing depth of SZSC was highly concentrated: 50% of the individuals were between 7.29 and 7.55 cm. The burrowing rate was 88.33% at 32 salinity, which was significantly higher than that of ZRSC ( $P < 0.05$ ). In the stressed group, the BT<sub>50</sub> of SZSC was significantly lower than that of ZRSC, while the burrowing rate was significantly higher than that of ZRSC ( $P < 0.05$ ). With the increase in salinity, the burrowing rate of ZRSC decreased significantly ( $P < 0.05$ ). The average burrowing depth of ZRSC was 7.45 cm at 32 salinity, which was significantly higher than that of SZSC ( $P < 0.05$ ). By comparing the experimental results of the two populations, whether in SZSC or ZRSC, the BT<sub>50</sub> of razor clams in the stressed group was higher than that in non-stressed group at each salinity. However, there was no significant difference in BT<sub>50</sub> between the stressed and non-stressed groups at 20 and 28 salinity among SZSC ( $P > 0.05$ ). The BT<sub>50</sub> of SZSC was closer to that of the control group at 24 and 28 salinity, and the vitality of SZSC was significantly better

① Corresponding author: NIU Donghong, E-mail: dhniu@shou.edu.cn

than that of ZRSC after 24 h of salinity stress. Under high salinity, the distribution of SZSC in mud was more concentrated than that in ZRSC, and the burrowing depth was shallower. In terms of feeding physiology, the feeding rate of SZSC was significantly higher than that of ZRSC under high salinity ( $P<0.05$ ). The feeding rate of SZSC reached the maximum 89.54 mL/(g·h) at 24 salinity, which was significantly higher than that of other salinity groups ( $P<0.05$ ). In summary, the ecological behaviors of both populations were affected by high salinity. The higher the salinity, the stronger the stress response, with the SZSC having a higher salinity tolerance than ZRSC. In this study, the tolerance of two populations of razor clams to high salinity was evaluated at the level of ecological behavior, and the vertical distribution and feeding ability of *S. constricta* in sediment in a high-salt environment was revealed. The results provide a theoretical reference for the further breeding of novel high-salt-tolerant strains of *S. constricta*.

**Key words** *Sinonovacula constricta*; Burrowing behavior; Feeding rate; High salinity