

文章编号: 1674-5566(2023)04-0708-08

DOI:10.12024/jsou.20221204049

不同低盐驯化方式对缢蛏生存、生理代谢及抗氧化水平的影响

王新星¹, 杜鑫鑫¹, 杨 栋¹, 刘 琦², 牛东红^{1,3}, 沈和定^{1,3}, 李家乐^{1,3}

(1. 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; 2. 三门县农业农村局, 浙江 台州 317100; 3. 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)

摘要: 为了探究缢蛏(*Sinonovacula constricta*)在低盐水域养殖的可行性,从生存、摄食和生理代谢方面,比较分析不同驯化方式下缢蛏的淡化效果。设置3种不同低盐驯化方式的驯化组(Da组:盐度每48 h下降3的等速驯化组;Db组:盐度每24 h下降1.5的等速驯化组;Dc组:盐度大于10时每48 h下降3,盐度小于10时每24 h下降1的分段驯化组)和未驯化组(Ud组:盐度5),水体盐度从20淡化至5,驯化周期为10 d;检测了各实验组缢蛏的存活率、耗氧率、氨氮排泄率、摄食率及抗氧化酶活性。结果表明:各驯化组缢蛏的存活率均显著高于Ud组(43%),且Dc组成活率(86%)最高;Dc组缢蛏耗氧率、氨氮排泄率均显著低于Da组和Db组;Dc组摄食率显著高于Da组和Db组;Dc组缢蛏超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性波动最小。由此可见,采用较低淡化速率的分段式淡化模式优势显著,该结果为低盐水域开展缢蛏淡化养殖提供了参考依据。

关键词: 缢蛏; 低盐驯化; 存活率; 耗氧率; 氨氮排泄率; 抗氧化酶活性

中图分类号: S 968.31 **文献标志码:** A

缢蛏(*Sinonovacula constricta*)俗称蛏子,具有产量高、养殖周期短、经济效益好等优点,是我国传统的四大海水养殖贝类之一^[1]。缢蛏主要栖息在河口附近和内湾软泥滩涂中,此类水域有淡水的汇入,盐度变化大,因此缢蛏对低盐水体具有一定的适应性^[2]。

我国盐碱地区面积广阔,位于盐碱地区的非海洋性咸水资源在东北、华北、西北等19个省、自治区和直辖市都广泛分布^[3]。开发利用内陆广阔、尚未被有效利用的盐碱水资源,将成为我国渔业可持续发展的有效途径之一^[4]。目前,位于黄淮海平原地区、黄河及海河流域的盐碱水,矿化度多为2~5 g/L,开发潜力较大^[3]。缢蛏的经济价值高且对低盐水体具有较强的耐受性,在低盐水域开展养殖具有良好的开发前景。

在生产实践中,养殖户往往采用驯化措施增强水生动物在不良环境下的抗逆性。大黄鱼(*Larimichthys crocea*)^[5]经过低盐驯化甚至可以在

淡水中存活;南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[6]虾苗经淡化后,可以在内陆盐碱地区的地下卤水与地表咸水中养殖;脊尾白虾(*Exopalaemon carinicauda*)^[7]经过分段式淡化后,可以在盐度高于1.5,碳酸盐碱度低于5.5 mmol/L的盐碱水中养殖。本研究探讨了不同驯化模式对缢蛏存活、生理代谢及抗氧化酶活性的影响,以期选择最优缢蛏低盐驯化模式,为其在内陆微咸水或半咸水等低盐环境的养殖可行性提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用贝均取自浙江省三门县,体质量为(2.05±0.16)g。实验前挑选健康缢蛏暂养7 d,暂养期间每天换水2次,换水后投喂100 L饵料丰度为2.5×10⁵个/mL的牟氏角毛藻(*Chaetoceros muelleri*),暂养水体积约0.9 m³,暂养水体盐度为

收稿日期: 2022-12-17 修回日期: 2023-04-15

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2019YFD0900400);福建省科技计划项目(2021N3001)

作者简介: 王新星(1997—),男,硕士研究生,研究方向为贝类种质资源与遗传育种。E-mail:1945640832@qq.com

通信作者: 牛东红, E-mail: dhniu@shou.edu.cn

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.shhydx.com>

20±2。实验前 24 h 和实验期间停止投喂。处理不同盐度海水采用过滤后自来水稀释自然海水配置,使用精密数字盐度仪(MASTER-α, ATAGO)测定。

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计

实验在长方形塑料盆(长 37.5 cm,宽 25 cm,高 20 cm)中进行。如表 1 所示:设置 3 种不同低盐驯化方式的驯化组(Da:盐度每 48 h 下降 3 的等速驯化组;Db 组:盐度每 24 h 下降 1.5 的等速

驯化组;Dc:盐度大于 10 时每 48 h 下降 3,盐度小于 10 时每 24 h 下降 1 的分段驯化组)及未驯化组(Ud:盐度 5)。水体盐度从 20 淡化至 5,驯化周期为 10 d,驯化结束 7 d 后统计各实验组缢蛏存活数。实验开始后分别于 0、2、4、6、8 和 10 d 测量各实验组缢蛏的耗氧率、氨氮排泄率及摄食率,并在驯化完成后第 0、6、12、24 和 48 小时在各实验组中随机取出 9 只缢蛏进行采样,用于抗氧化酶活性的测定。

表 1 不同驯化方式的盐度梯度设计

Tab.1 Salinity gradient design for different acclimation methods

时间 Time/d	Ud	Da	Db	Dc
1	5	17	18.5	17
2	5	17	17.0	17
3	5	14	15.5	14
4	5	14	14.0	14
5	5	11	12.5	11
6	5	11	11.0	11
7	5	8	9.5	8
8	5	8	8.0	7
9	5	5	6.5	6
10	5	5	5.0	5

1.2.2 存活率测定

在实验开始后分别统计 0、2、4、6、8 和 10 d 时各实验组缢蛏的死亡情况,并在驯化结束 7 d 后观测各实验组缢蛏的存活率。

1.2.3 生理代谢测定

耗氧率和氨氮排泄率测定:在密闭的锥形瓶中利用静水法对缢蛏进行氧消耗和氨氮排泄的测定。实验在 1 L 锥形瓶中进行,每个实验组设置 3 个平行组,1 个空白组以消除水体中微生物呼吸所造成的影响,实验组中每个锥形瓶放 5 只缢蛏,空白组不放缢蛏。实验共持续 2 h。实验前后水中溶解氧和氨氮质量浓度分别采用碘量法和次溴酸钠氧化法测定。

耗氧率计算公式:

$$O_R = V \times (O_0 - O_t) / (m \times t) \quad (1)$$

式中: O_R 为缢蛏单位体质量耗氧率,mg/(g·h); V 为水体体积,L; O_0 和 O_t 分别为实验开始和 t 时刻驯化组和实验组水体中的溶解氧质量浓度,mg/L; m 为缢蛏体质量,g; t 为实验持续时间,h。

排氨率计算公式:

$$E = V \times (E_t - E_0) / (m \times t) \quad (2)$$

式中: E 为缢蛏单位体质量排氨率,μg/(g·h); V 为水体体积,L; E_0 和 E_t 分别为实验开始和 t 时刻驯化组和实验组水体中的氨氮含量,μg/g; m 为缢蛏体质量,g; t 为实验持续时间,h。

摄食实验在容器为 2 L 的锥形瓶中进行。每个实验组设 3 个平行组,1 个空白组用以检测实验期间藻类的生长情况,实验组放入 5 只缢蛏,空白组不放缢蛏。实验持续 2 h,摄食率计算公式:

$$R_F = V \times [C_{e0} - (C_{e0} \times S_{ed}) - C_{et}] / (n \times t) \quad (3)$$

式中: R_F 为缢蛏单位时间内所滤食的饵料质量,mg/h; V 为水体体积,L; n 为缢蛏个数; t 为实验时间,h; C_{e0} 、 C_{et} 分别为实验开始和 t 时刻的饵料质量浓度,mg/L; S_{ed} 为对照组饵料质量浓度变化系数。

1.2.4 抗氧化酶活性测定

对缢蛏肝胰腺完成取样后匀浆,8 000 g,4 ℃ 离心 10 min,取上清,按索莱宝 SOD 活性和 CAT 含量检测试剂盒说明书操作(北京索莱宝科技有限公司)。

1.2.5 数据统计与分析

运用统计软件 SPSS 20 进行统计分析,用 One-way ANOVA 进行单因素方差分析,若差异显著,用 Turkey 检测进行多重比较,分析显著性水平为 $P < 0.05$, 极显著性为 $P < 0.01$ 。使用软件 SigmaPlot 12.3 作图。

2 结果与分析

2.1 不同低盐驯化方式对缢蛏存活率的影响

由表 2 可知,各实验组于各时间段内 3 个平行组缢蛏的死亡个数,且 Ud 组缢蛏死亡主要集中于前 4 d 内,各驯化组缢蛏死亡主要集中于 6~10 d 内,驯化措施能够延缓缢蛏在低盐水体中的死亡。Ud 组缢蛏存活率为 42.79%,Da 组缢蛏的存活率为 77.71%,Db 组缢蛏的存活率为

81.14%,Dc 组缢蛏的存活率为 86.03%(图 1)。驯化组的缢蛏存活率显著高于未驯化组的缢蛏存活率($P < 0.05$),且 Dc 组缢蛏存活率显著高于 Da 组和 Db 组($P < 0.05$)。

2.2 不同低盐驯化方式对缢蛏生理代谢的影响

2.2.1 不同低盐驯化方式对缢蛏耗氧率及氨氮排泄率的影响

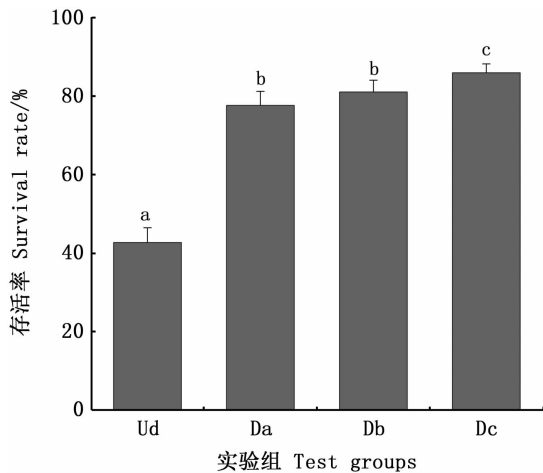
由图 2 和图 3 可知,Ud 组缢蛏在 0~2 d 内,耗氧率和氨氮排泄率急剧升高且在第 2 天升到最高值,后呈现缓慢降低的趋势并逐渐稳定。Da,Db 及 Dc 组在实验期内呈现上升趋势,在 0~6 d 内耗氧率和氨氮排泄率差异不显著($P > 0.05$),在 6~10 d 内 Dc 组耗氧率和氨氮排泄率显著低于 Da 组和 Db 组($P < 0.05$)。

表 2 不同驯化方式下缢蛏的死亡分布
Tab. 2 Death distribution of *S. constricta* under different domestication methods

时间 Time/h	Ud	Da	Db	Dc
2	10 11 10	0 0 0	0 0 0	0 0 0
4	13 13 14	0 0 0	0 0 0	0 0 0
6	2 3 2	1 2 2	1 1 1	1 1 0
8	1 1 1	4 5 5	4 5 3	3 3 2
10	0 0 1	9 9 8	6 6 7	4 5 5
死亡总数 Total number of deaths	26 28 28	14 16 15	11 12 11	8 9 7

注:各实验组 3 个数字表示 3 个平行组缢蛏的死亡个数。

Notes: Three numbers in each experimental group represented the death number of 3 parallel *S. constricta*.

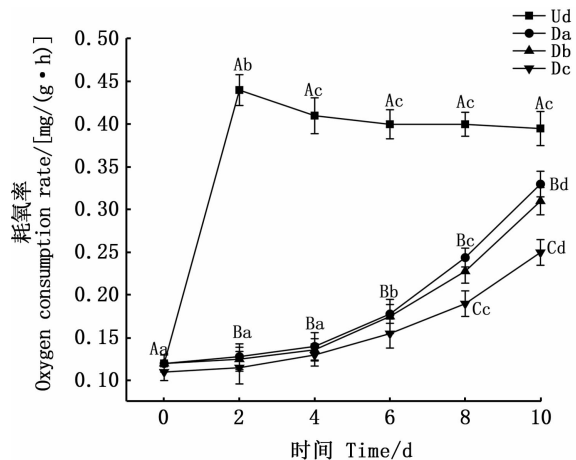


不同字母表示实验组处理间差异显著($P < 0.05$)。

Letters between different test groups indicate significant differences between treatments($P < 0.05$).

图 1 不同驯化方式下缢蛏的存活率

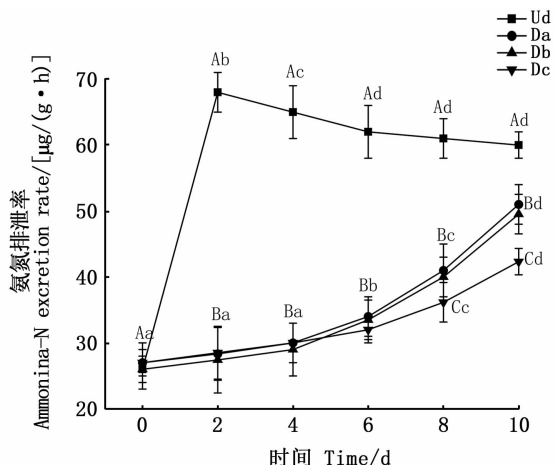
Fig. 1 Survival rate of *S. constricta* under different domestication methods



大写字母表示相同时间不同实验组处理间差异显著,小写字母表示不同时间相同实验组处理间差异显著($P < 0.05$)。Capital letters indicate significant differences between treatment groups at the same time, lowercase letters indicate significant differences between treatments of the same group at different times($P < 0.05$).

图 2 不同驯化方式下缢蛏的耗氧率

Fig. 2 Oxygen consumption rate of *S. constricta* under different acclimation methods

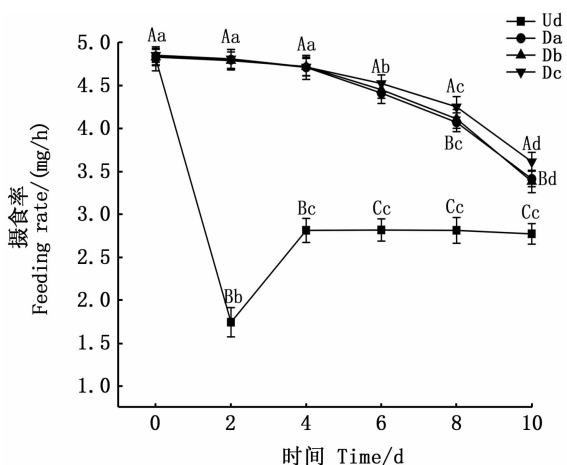


大写字母表示相同时间不同实验组处理间差异显著,小写字母表示不同时间相同实验组处理间差异显著($P < 0.05$)。Capital letters indicate significant differences between treatment groups at the same time, lowercase letters indicate significant differences between treatments of the same group at different time ($P < 0.05$)。

图 3 不同驯化方式下缙蛭的氨氮排泄率
Fig. 3 Ammonia nitrogen excretion rate of *S. constricta* under different acclimation methods

2.2.2 不同低盐驯化方式对缙蛭摄食率的影响

由图 4 可知,Ud 组缙蛭在 0~2 d 内摄食率急剧降低,2~4 d 内摄食率有所上升,并逐渐趋于稳定。Da,Db 及 Dc 组在 0~4 d 内各驯化组摄食差异不显著($P > 0.05$),在 4~10 d 内出现显著性差异且 Dc 组的缙蛭摄食率显著高于 Da 组和 Db 组 ($P < 0.05$)。

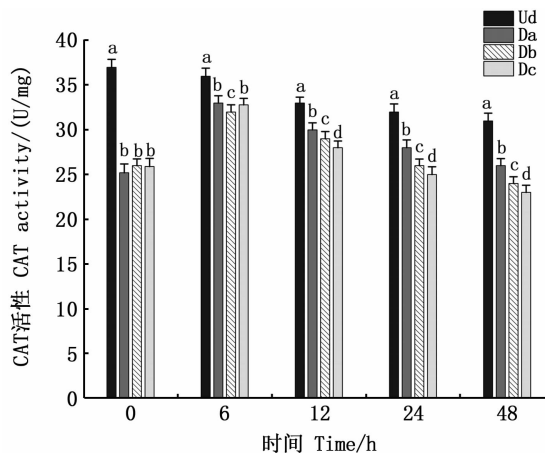


大写字母表示相同时间不同实验组处理间差异显著,小写字母表示不同时间相同实验组处理间差异显著($P < 0.05$)。Capital letters indicate significant differences between treatment groups at the same time, lowercase letters indicate significant differences between treatments of the same group at different time ($P < 0.05$)。

图 4 不同驯化方式下缙蛭的摄食率
Fig. 4 Feeding rate of *S. constricta* under different domestication methods

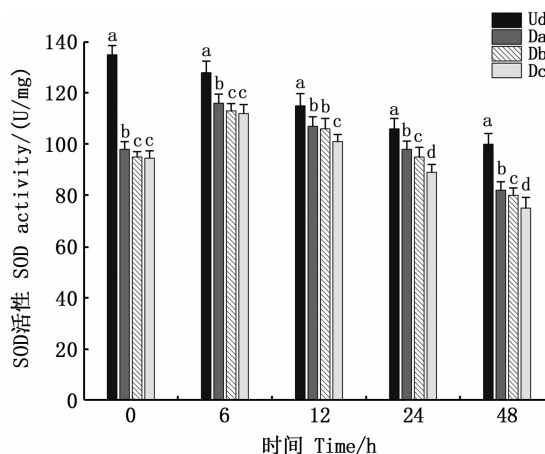
2.3 不同低盐驯化方式对缙蛭抗氧化酶活性的影响

由图 5 和图 6 可知,与 Ud 组相比,各驯化组 SOD、CAT 活力处于较低水平。在 Da、Db 及 Dc 组中,SOD 和 CAT 活性呈先上升后下降的趋势,且 Dc 组的抗氧化酶活性波动水平显著低于 Da 组和 Db 组 ($P < 0.05$),Da 组和 Db 组的波动水平差异不显著 ($P > 0.05$)。



不同字母表示实验组处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Letters between different test groups indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$)。

图 5 不同驯化方式下缙蛭的 CAT 活性变化
Fig. 5 CAT activity of *S. constricta* under different domestication methods



不同字母表示实验组处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Letters between different test groups indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$)。

图 6 不同驯化方式下缙蛭的 SOD 活性变化
Fig. 6 SOD activity of *S. constricta* under different domestication methods

3 讨论

3.1 不同驯化方式对缢蛭生存的影响

盐度对水生动物的生存有着重要的影响,当水体盐度超过一定安全范围时,水生动物的生理活动就会紊乱,甚至出现死亡^[8]。通过低盐驯化措施,可以降低水生动物的应激反应,有利于水生动物应对低盐环境的胁迫^[9]。条纹锯鲷(*Centropristis striata*)^[10]、魁蚶(*Anadara broughtonii*)^[11]稚贝通过梯度降低盐度的驯化,都不同程度地减少了应激反应,提高其在低盐环境中的存活率。南美白对虾^[12]采用较小的低盐驯化速度,在黄河盐碱地区可减少虾苗的大量死亡。当盐度骤降时,近岸和河口区的部分双壳贝类成活率大幅降低,通过驯化措施可以提高成活率^[13],这与本研究结论一致。同时,实验结果表明采用低盐驯化措施可提高缢蛭在低盐水体中的适应性,且采取随盐度下降逐步降低驯化速度的分阶段驯化模式可显著提高缢蛭的存活率。

3.2 不同驯化方式对缢蛭生理代谢的影响

盐度作为重要的水环境因子,与水生动物的呼吸代谢、摄食活动、免疫防御等生理代谢过程密切相关^[14]。代谢过程可以反映水生动物在相对稳定状态下所消耗的能量,包括用于维持离子和渗透压调节、蛋白质结构转换和维持基本的生命活动的消耗量^[15]。目前许多研究通过不同盐度下耗氧率来估算离子和渗透压调节成本^[16]。青圆蟹(*Carcinides maenas*)^[17]的耗氧率和氨氮排泄率会随盐度的降低而急剧变化;凡纳滨对虾在低盐水体中存活率降低,主要也是因为耗氧率和氨氮排泄率消耗急剧增加而导致免疫代谢和生长的能量分配比例减少^[18]。滤食性贝类的生理活动受外界环境的影响很大。外界环境改变时,贝类为了适应新环境,通常会做出系列的反应,即所谓的生理性补偿,这是由于贝类为了适应外界环境而改变生理代谢的结果^[19]。因此,在驯化过程中,维持贝类稳定的代谢活动有助于提高其存活率及维持正常的代谢和生长能量分配。本研究表明,相较于未驯化组,驯化措施有助于缓解缢蛭耗氧率及氨氮排泄率处的剧烈波动,且采用随盐度下降逐步降低驯化速度的分阶段驯化模式,缢蛭耗氧率和氨氮排泄率波动相对最为稳定,这有利于缢蛭维持其正常的生命活动和能

量代谢。这也验证了前文缢蛭经过驯化后存活率显著上升的结论。

摄食率作为滤食性贝类重要的生物能量参数,可以直观地反映贝类受到环境胁迫时的生理活动情况^[20]。背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)^[21]在盐度 10 胁迫下摄食率下降约 50%;河蚬(*Corbicula fluminea*)^[22]在面临盐度 15 胁迫时,摄食率下降约 58%。为了应对低盐胁迫,贝类往往会闭壳,从而导致摄食率有所降低。当摄食率不足日常的 50%时,表示该盐度已超出贝类的承受范围。所以,摄食率往往作为贝类耐盐性能的重要生理指标之一,其变化量与耐盐性范围也有一定的相关性。本研究中,相比于未经驯化的缢蛭在低盐水体中摄食率骤降,各驯化组缢蛭的摄食率下降速度有所缓解,然后维持相对较高的水平,有利于缢蛭获得较多以维持稳定的免疫代谢活动及其他生命活动所需的能量。

3.3 不同低盐驯化方式对缢蛭抗氧化酶活性的影响

SOD 和 CAT 可以反映免疫系统活性,常作为胁迫状态下的检测指标^[23]。当生物受到盐度胁迫时,机体会产生一系列的生理应激反应,进而引发具有氧化性的活性氧 ROS 瞬间过量产生^[24]。对机体自身产生破坏细胞膜结构,降解 DNA 等的损害^[25]。SOD 具有特殊的生理活性,是生物体内清除自由基的首要物质^[26]。过氧化氢是氧化酶催化氧化还原反应过程中产生的细胞毒性物质,会对机体造成损害,CAT 能够催化过氧化氢分解为水和氧气,对细胞起到保护作用^[27]。SOD 和 CAT 是机体防御氧化损害系统中的两个关键酶,能有效地消除活性氧,防止细胞膜系统过氧化作用的发生。

许多研究表明,水生动物在不良环境下时,抗氧化酶活性可能发生增加或抑制两种应激改变。篮子鱼(*Siganus guttatus*)^[28]受到低盐胁迫时,SOD 和 CAT 活性都会不同程度地先上升后下降;三疣梭子蟹(*Porymus trituberculatus*)^[29]受到急性盐度胁迫时,SOD 和 CAT 活性均随时间产生波动;青蛤(*Cyclina sinensis*)^[30]受盐度胁迫时,SOD 和 CAT 活性均发生波动并在 24 h 内趋于稳定,当盐度高于 35 时,SOD 和 CAT 活性波动剧烈。抗氧化酶活性水平可以反映免疫系统的活动情况。当水体盐度发生急速变化时,水生动物

需消耗大量能量维持渗透压平衡,维持免疫系统的能量则相应减少,导致免疫力下降。研究表明,相较于未驯化组,各驯化组缢蛏 SOD、CAT 活性处于较低水平,说明进行驯化措施后缢蛏用于维持渗透压平衡的能量相对稳定。同时 Dc 组缢蛏 SOD、CAT 活性变化起伏小,趋向平缓,表明采用随盐度下降逐步降低驯化速度的分阶段驯化模式有利于缢蛏维持渗透压平衡,维持免疫系统所需的能量,进而降低低盐环境对缢蛏生存及生长造成的不利影响。

综上,缢蛏作为广盐性的经济贝类,具备在内陆低盐水域推广养殖的潜力。本研究通过分析不同驯化方式下缢蛏淡化效果,揭示在低盐水域养殖缢蛏适宜采取分段式低盐驯化措施,且采用盐度大于 10 时每 48 h 下降 3,盐度小于 10 时每 24 h 下降 1 的驯化方式效果最佳,有利于保持相对稳定的生理代谢水平,增强了缢蛏在低盐养殖的可行性。

参考文献:

- [1] 李智,彭茂潇,叶博,等. 急性低盐度对缢蛏存活率、 Na^+/K^+ -ATPase 活性以及血淋巴细胞吞噬能力的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(4): 489-495.
LI Z, PENG M X, YE B, et al. Effects of acute low salinity on *Sinonovacula constricta* survival rate, Na^+/K^+ -ATPase activity and phagocytosis of hemocytes [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(4): 489-495.
- [2] 吕昊泽. 缢蛏、光滑河蓝蛤和河蚬对盐度的适应性及碳、氮收支研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
LYU H Z. Study on the adaptability to salinity, the budgets of carbon and nitrogen of *Sinonovacula constricta*, *Potamocorbula laevis*, *Corbicula fluminea* [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014.
- [3] 刘永新,方辉,来琦芳,等. 我国盐碱水渔业现状与发展对策[J]. 中国工程科学, 2016, 18(3): 74-78.
LIU Y X, FANG H, LAI Q F, et al. The current state and development strategy for China's saline-alkaline fisheries [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(3): 74-78.
- [4] 梁利群,任波,常玉梅,等. 中国内陆咸(盐碱)水资源及渔业综合开发利用[J]. 中国渔业经济, 2013, 31(4): 138-145.
LIANG L Q, REN B, CHANG Y M, et al. Inland brackish (alkaline-saline) water resources and fisheries utilization in China [J]. Chinese Fisheries Economics, 2013, 31(4): 138-145.
- [5] HE L Y, SHI X L, ZENG X Y, et al. Characterization of the glucocorticoid receptor of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) and its expression in response to salinity and immune stressors [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2022, 265: 111124.
- [6] 杨富亿,赵春生,陈渊,等. 碳酸盐类盐碱水驯化南美白对虾的试验[J]. 水产科学, 2006, 25(7): 338-342.
YANG F Y, ZHAO C S, CHEN Y, et al. Artificial domesticating of white legged shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in carbonate saline-alkali water [J]. Fisheries Science, 2006, 25(7): 338-342.
- [7] 孙博,任帅帅,常玉梅,等. 低盐度及碱度对脊尾白虾生存的影响[J]. 水产学杂志, 2022, 35(5): 71-75.
SUN B, REN S S, CHANG Y M, et al. Effects of low salinity and alkalinity on survival of ridgetail white prawn *Exopalaemon carinicauda* [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2022, 35(5): 71-75.
- [8] 尤仲杰,陆彤霞,马斌,等. 盐度对墨西哥湾扇贝幼虫和稚贝生长与存活的影响[J]. 动物学杂志, 2003, 38(3): 58-60.
YOU Z J, LU T X, MA B, et al. Effect of seawater salinity on the growth and survival of *Argopecten irradians concentricus* larvae and juveniles [J]. Chinese Journal of Zoology, 2003, 38(3): 58-60.
- [9] 陈牧霞,来琦芳,周凯,等. 盐度驯化、投喂和饥饿条件下盐度对缢蛏存活的影响[J]. 水产学杂志, 2021, 34(6): 31-35.
CHEN M X, LAI Q F, ZHOU K, et al. Effects of salinity on survival of razor clam *Sinonovacula constricta* under salinity acclimation, feeding and starvation [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2021, 34(6): 31-35.
- [10] 阳钢,刘超,马牲,等. 条纹锯鲷对盐度胁迫的耐受力及淡水胁迫恢复的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2011, 33(2): 73-78.
YANG G, LIU C, MA S, et al. Preliminary study on the tolerance of the black sea bass under salinity stress and the recovery from freshwater stress [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2011, 33(2): 73-78.
- [11] 蔡星媛,张秀梅,田璐,等. 盐度胁迫对魁蚶稚贝血淋巴渗透压及鳃 Na^+/K^+ -ATP 酶活力的影响[J]. 南方水产科学, 2015, 11(2): 12-19.
CAI X Y, ZHANG X M, TIAN L, et al. Effect of salinity stress on hemolymph osmolality and gill Na^+/K^+ -ATPase activity of juvenile ark shell (*Anadara broughtonii*) [J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(2): 12-19.
- [12] 王迎伟,任昕,陈君,等. 黄河盐碱地区南美白对虾淡化技术研究[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(4): 57-62.
WANG Y W, REN X, CHEN J, et al. Study on desalination technology of *Penaeus vannamei* in the saline-alkali area of the Yellow River [J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2021, 42(4): 57-62.
- [13] CASTAGNA M, CHANLEY P. Salinity tolerance of some marine bivalves from inshore and estuarine environments in Virginia waters on the western mid-Atlantic coast [J]. Malacologia, 1973, 12(1): 47-96.

- [14] 郝爽, 张敏, 方佳琪. 缢蛭在急性温度胁迫下的氧化应激响应及生理代谢变化[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(2): 214-221.
HAO S, ZHANG M, FANG J Q. Study on oxidative stress response and physiological metabolism of *Sinonovacula constricta* under acute temperature stress [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(2): 214-221.
- [15] ERN R, HUONG D T T, CONG N V, et al. Effect of salinity on oxygen consumption in fishes: a review[J]. Journal of Fish Biology, 2014, 84(4): 1210-1220.
- [16] ERN R, ESBAUGH A J. Effects of salinity and hypoxia-induced hyperventilation on oxygen consumption and cost of osmoregulation in the estuarine red drum (*Sciaenops ocellatus*) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2018, 222: 52-59.
- [17] REGNAULT M. Nitrogen excretion in marine and fresh-water crustacea[J]. Biological Reviews, 1987, 62(1): 1-24.
- [18] 王兴强, 马牲, 董双林, 等. 饲料中添加氯化钠对凡纳滨对虾存活、生长和能量收支的影响[J]. 海洋科学, 2006, 30(11): 64-68.
WANG X Q, MA S, DONG S L, et al. The effects of sodium chloride as a diet supplement on survival, growth and energy budget of *Litopenaeus vannamei* juvenile [J]. Marine Sciences, 2006, 30(11): 64-68.
- [19] RHISGÅRD H U. Comment: physiological regulation versus autonomous filtration in filter-feeding bivalves: starting points for progress[J]. Ophelia, 2001, 54(3): 193-209.
- [20] 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[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(3): 331-338.
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* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(3): 331-338.
- [21] 蒋葛, 姜琦, 沈辉, 等. 背角无齿蚌在低盐度环境下的适应性及摄食率初步研究[J]. 水产研究, 2020, 7(2): 93-99.
JIANG G, JIANG Q, SHEN H, et al. Preliminary study on the adaptability and feeding rate of *Anodonta woodiana* in low salinity environment [J]. Open Journal of Fisheries Research, 2020, 7(2): 93-99.
- [22] 包镛, 刘一萌, 来琦芳, 等. 盐度胁迫对河蚬摄食率及鳃ATP酶活力变化研究[J]. 海洋渔业, 2021, 43(6): 671-679.
BAO T, LIU Y M, LAI Q F, et al. Response of *Corbicula fluminea*'s ingestion rate and branchial ATPase activity to salinity stress [J]. Marine Fisheries, 2021, 43(6): 671-679.
- [23] 孙鹏, 柴学军, 尹飞, 等. 运输胁迫下日本黄姑鱼肝脏抗氧化系统的响应[J]. 海洋渔业, 2014, 36(5): 469-474.
SUN P, CHAI X J, YIN F, et al. Responses of antioxidant system to transport stress in the liver of *Nibea japonica* [J]. Marine Fisheries, 2014, 36(5): 469-474.
- [24] HOLMBLAD T, SÖDERHÄLL K. Cell adhesion molecules and antioxidative enzymes in a crustacean, possible role in immunity[J]. Aquaculture, 1999, 172(1/2): 111-123.
- [25] XING J, LIN T T, ZHAN W B. Variations of enzyme activities in the haemocytes of scallop *Chlamys farreri* after infection with the acute virus necrobiotic virus (AVNV) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2008, 25(6): 847-852.
- [26] MCCORD J M, FRIDOVICHI. Superoxide dismutase: an enzymic function for erythrocyte (hemocytin) [J]. Journal of Biological Chemistry, 1969, 244(22): 6049-6055.
- [27] 张坤生, 田荟琳. 过氧化氢酶的功能及研究[J]. 食品科技, 2007, 32(1): 8-11.
ZHANG K S, TIAN H L. Research and function of catalase in organism [J]. Food Science and Technology, 2007, 32(1): 8-11.
- [28] 庄平, 王好, 章龙珍, 等. 盐度骤降对点篮子鱼存活率及肝脏抗氧化酶活性的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2011, 50(3): 366-372.
ZHUANG P, WANG H, ZHANG L Z, et al. The effects of ambient salinity decrement on survival and the activity of antioxidant enzymes in livers of *Siganus guttatus* [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2011, 50(3): 366-372.
- [29] 郑萍萍, 王春琳, 宋微微, 等. 盐度胁迫对三疣梭子蟹血清非特异性免疫因子的影响[J]. 水产科学, 2010, 29(11): 634-638.
ZHENG P P, WANG C L, SONG W W, et al. Effect of salinity stress on serum non-specific immune factors in swimming crab *Portunus trituberculatus* [J]. Fisheries Science, 2010, 29(11): 634-638.
- [30] 李子牛, 林听听, 么宗利, 等. 盐度对青蛤抗氧化酶活性及生长的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2625-2630.
LI Z N, LIN T T, YAO Z L, et al. Effects of water salinity on the antioxidant enzyme activities and growth of clam *Cyclina sinensis* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2625-2630.

Effects of different hyposaline acclimation methods on survival, physiological metabolism and antioxidant levels of *Sinonovacula constricta*

WANG Xinxing¹, DU Xinxin¹, YANG Dong¹, LIU Qi², NIU Donghong^{1,3}, SHEN Heding^{1,3}, LI Jiale^{1,3}

(1. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Sanmen County, Taizhou 317100, Zhejiang, China; 3. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To explore the feasibility of developing fishery aquaculture in low salt water, this study compared and analyzed the desalination effect of *Sinonovacula constricta* under different domestication methods. In this experiment, three groups with different low-salt domestication methods were set up (group Da: isokinetic domestication group with salinity decreased by 3 per 48 h; Group Db: isokinetic domestication group with salinity decreased by 1.5 per 24 h; group Dc: segmented domestication group with salinity decreased by 3 per 48 h before 10 and salinity decreased by 1 per 24 h after 10) and undomesticated group (Ud: salinity 5), water salinity decreased from 20 to 5, and the desalination period was 10 d. The survival, oxygen consumption rate, ammonia nitrogen excretion rate, feeding rate and antioxidant enzyme activity of clams in each experimental group were measured. The results showed that the survival rate of *S. constricta* in all domesticated groups was significantly higher than that of undomesticated group (43%), and the survival rate of group Dc (86%) was the highest. The oxygen consumption rate and ammonia nitrogen excretion rate in group Dc were significantly lower than those in group Da and group Db. The feeding experiments showed the feeding rate of group Dc was significantly higher than group A and group B. *S. constricta* in group Dc showed the least fluctuation of activities of superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT). In brief, the segmented desalination mode with a lower desalination rate and gradually decreasing the desalination rate with the decrease of salinity had significant advantages, which provided a reference for the desalination culture of *S. constricta* in low-saline water.

Key words: *Sinonovacula constricta*; low salt acclimation; survival rate; oxygen consumption rate; ammonia nitrogen excretion rate; antioxidant enzyme activity