DOI:10.14188/j.ajsh.20250609001

常见无机盐对沼蛤存活与行为特性的影响

田娜娜[1],李天翠[1],刘　坚[1],蔡　伟[2],李瑞雯[1],王英才[1],陈正虎[2*]

(1. 中华人民共和国生态环境部 长江流域生态环境监督管理局 生态环境监测与科学研究中心,湖北 武汉 430010;
2. 中国长江电力股份有限公司,湖北 宜昌 443002)

摘要:沼蛤(*Limnoperna fortunei*)是一种大型底栖动物,会通过分泌足丝黏附于基质表面,逐年层状加厚,产生生物污损。因此,深入了解其环境耐受能力是有效开展污损治理工作的前提。本研究旨在探究不同环境因子对沼蛤生存和生理行为的影响,通过室内控制实验,系统考察了常见无机盐对沼蛤存活率、免疫酶活性和足丝黏附特性的影响。结果表明:(1)0.17 mol/L氯化钠对沼蛤存活率抑制明显,作用24 h后沼蛤存活率均低于20%,显著低于对照组和其他处理组($P<0.05$);(2)0.017 mol/L和0.17 mol/L氯化钠两个处理组中,沼蛤的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)活性和过氧化氢酶(catalase,CAT)活性在24 h内呈现先升后降的趋势,且0.17 mol/L氯化钠处理组更为显著($P<0.05$),其他低浓度处理组呈升高趋势;(3)0.12 mol/L和0.17 mol/L氯化钠作用于附着在天然石块基质上的沼蛤时,沼蛤的足丝黏附力显著下降($P<0.05$),24 h后约降低40%。研究结果可为水利工程特定场景中沼蛤应急清除方案的制定提供数据支撑。

关键词:沼蛤;生物污损;无机盐;存活率;免疫酶活性;黏附力

中图分类号:S917.4　　　文献标志码:A　　　文章编号:2096-3491(2025)04-0363-08

Effects of common inorganic salts on the survival and behavioral characteristics of *Limonperna fortunei*

Tian Nana[1], Li Tiancui[1], Liu Jian[1], Cai Wei[2], Li Ruiwen[1], Wang Yingcai[1], Chen Zhenghu[2*]

(1. Ecology and Environment Monitoring and Scientific Research Center, Yangtze Basin Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Wuhan 430010, Hubei, China;
2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: *Limnoperna fortunei* is a large benthic animal. It adheres to the substrate surface by secreting byssus, gradually thickening in layers over the years, leading to biofouling. Therefore, a deep understanding of its environmental tolerance is essential for developing effective biofouling control strategies. Aiming to investigate the effects of different environmental factors on the survival and physiological behaviors of *L. fortunei*, this study investigated the effects of common inorganic salts on the survival rate, immune enzyme activity, and byssal adhesion characteristics of *L. fortunei* through controlled laboratory experiments. The results showed that: (1) 0.17 mol/L NaCl significantly inhibited the survival rate of *L. fortunei*, and after 24 h of action, the survival rate was all below 20%, remarkably lower than the control and other treatment groups ($P<0.05$). (2) In the 0.017 mol/L and 0.17 mol/L NaCl groups, superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities exhibited an initial increase followed by a decrease within 24 hours, with the 0.17 mol/L NaCl group showing a more pronounced effect ($P<0.05$). The other lower concentration treatment groups

收稿日期:2025-06-09　　修回日期:2025-07-03　　接受日期:2025-07-12
作者简介:田娜娜(1995-),女,硕士,研究方向为渔业资源,E-mail:tianna6999@163.com
* 通讯联系人:陈正虎(1980-),男,高级工程师,主要从事水工结构、水利规划与经济研究,E-mail:chen-zhenghu@cypc.com.cn
基金项目:国家自然科学基金重点项目(U204020117)

引用格式:田娜娜,李天翠,刘坚,等. 常见无机盐对沼蛤存活与行为特性的影响[J]. 生物资源, 2025, 47(4): 363-370.
Tian Nana, Li Tiancui, Liu Jian, et al. Effects of common inorganic salts on the survival and behavioral characteristics of *Limonperna fortunei* [J]. Biotic Resources, 2025, 47(4): 363-370.

showed an increasing trend. (3) When exposed to 0.12 mol/L and 0.17 mol/L NaCl, the byssal adhesion force of *L. fortunei* attached to natural stone substrates decreased significantly ($P<0.05$), dropping by approximately 40% after 24 hours. The results of this study can provide data support for the formulation of emergency removal plans for *L. fortunei* in specific scenarios of water conservancy projects.

Key words: *Limnoperna fortunei*; biofouling; inorganic salt; survival rate; immunoenzyme activity; adhesion

0 引 言

沼蛤(*Limnoperna fortunei*),又称淡水壳菜,国外又称金贻贝(golden mussel),是双壳纲、异柱目、贻贝科的一种大型底栖动物,多分布于中国及东南亚地区流速缓慢的淡水湖泊、河流中,在微咸水的环境中也能生长。前期有研究表明,沼蛤对水体盐度的耐受范围为0~12‰[1-3],但也有研究发现,沼蛤可以长期生活在盐度为14‰的水体中,具有高盐度耐受能力[4-5]。沼蛤幼虫阶段营浮游生活,成贝阶段通过足丝黏附营附着或固着生活,喜附着在引调水工程和水电站中输水管道、金属闸门等构筑物上,难以清除,严重时会造成管道老化堵塞、基质腐蚀等不良后果,影响工程的正常安全运行[6-7]。在广州抽水蓄能电厂、浙江天荒坪抽水蓄能电厂、北京十三陵抽水蓄能电厂、广西岩滩水电站、安徽琅琊山抽水蓄能电站等地均发生过沼蛤大量附着带来的污损问题[8]。

研究表明,沼蛤具有极强的适应性,已黏附的沼蛤可以承受如温度、pH、盐度等水环境条件的剧烈变化和捕食、水流冲刷等外部力量的威胁,在多变的水体环境中正常生长繁殖[9-10],给生物污损治理带来极大困难。其中,盐度作为影响生物渗透调节及免疫防御的重要环境因子,当盐度变化超过了生物可调节能力时,就会扰乱、破坏生物体正常的代谢和免疫水平,使其产生应激反应[11-12]。目前已有研究表明:贝类在遭遇环境骤变时,体内的抗氧化酶会发生显著变化[13-15],这些酶的活性水平可反映出机体的免疫防御能力[16]。但研究多集中在盐度对海洋贝类生长、免疫、代谢等的影响方面[17-18],关于无机盐对沼蛤的作用效果鲜有报道。

沼蛤依靠足丝进行附着,其黏附力是造成污损清理难题的关键因素[2]。足丝黏附并非孤立行为,依赖于特定生理状态。作为一种蛋白类物质,足丝的分泌能力与机体健康密切相关,受水体营养状况、金属离子、化学试剂等因素影响[19-20],因此揭示盐胁迫下足丝黏附力的变化规律同样至关重要。

基于上述背景,本研究通过在养殖水体中添加不同浓度的无机盐,从存活率、免疫酶(过氧化氢酶、超氧化物歧化酶)活性、足丝黏附力等多个角度,综合评估无机盐胁迫对沼蛤生命活动的影响,比较其在不同盐浓度下的耐受程度与适应阈值,旨在为沼蛤的应急防控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

沼蛤于2024年7月采自汉江流域中游江段丹江河桥(33°25′31″N,111°01′16″E)处,河床宽浅,水流缓慢,底质为石块和泥沙,采用2种采样方法进行采样:(1)用采样铲将石块上的沼蛤成团铲下;(2)将沼蛤连同其附着石块一同捞出;均放入留有开口并加入适量原水的采样盒中,当天带回实验室进行培养。沼蛤现场附着状态见图1。

图1 沼蛤现场附着状态

Figure 1 Adhesion status of *L. fortunei* at the site

挑选运动活跃且开壳后刺激能迅速闭壳的沼蛤放入无氯清水(放置一周去除氯的自来水)中至少培养7天驯化后开始实验,期间维持培养箱中水温在18~22 ℃,溶氧含量80%~85%,并每天加入适量的纯化小球藻。实验前选择活力较强、个体均匀的沼蛤,分别使用游标卡尺与电子天平测量其体长和体重。沼蛤平均体长为(20.01±5.81) mm、平均体重为(0.80±0.06) g。

1.2 实验方法

1)存活率实验:鉴于沼蛤具有广泛的环境耐受性,且对盐度的耐受阈值很高,能长期生活在盐度高达0.23 mol/L的水体环境中[4]。氯化钠是构成水体盐度最主要的成分,本研究设置了5组不同无机盐浓度的实验梯度(见表1),以探究汉江流域沼蛤受盐度环境变化的影响。每组实验装置均为30 cm×

18 cm×20 cm(长×宽×高)的玻璃缸,实验用水为2 L无氯清水(即放置一周去除氯的自来水),实验时每组中放入驯化过的沼蛤各25个(其中20个作为记录存活情况的实验样本,5个作为酶活力测定样本),实验持续1周,期间采用室内自然光照,并随时监测水质的变化,维持实验中水质条件的稳定,与驯化阶段水质条件保持一致。每组实验均设置3个平行,实验结果均以3个平行实验的平均值来表示。在实验进行12 h、24 h、36 h、48 h、72 h、96 h、120 h时记录死亡个数。当沼蛤出现以下4类特征之一时即为死亡:(1)贝壳张开,有软组织流出体外且明显腐烂;(2)贝壳张开,无明显死亡特征,可用细针等刺激组织或者贝壳,不能自行合上贝壳;(3)贝壳紧闭但明显有白色絮状物流出;(4)贝壳紧闭无明显判断标志时,将其取出,放入原水中24 h不开壳[21]。采用累加计数方式计算死亡个数,其余即为存活个体。

表1 存活率实验中的无机盐浓度梯度

Table 1 Concentrations of inorganic salt in survival rate experiment

组别	盐类	摩尔浓度/(mol·L^{-1})
对照组		
处理组A	氯化钠	0.000 17
处理组B	氯化钠	0.001 7
处理组C	氯化钠	0.017
处理组D	氯化钠	0.17

2)酶活测定实验:在上述实验进行到0 h、12 h、24 h时取样,用解剖刀小心地将3个沼蛤的闭壳肌割断,取其内脏团,将每只沼蛤的内脏团置于预冷的离心管中,做好标记后保存于液氮中,用于测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)和过氧化氢酶(catalase,CAT)的活力。SOD试剂盒、CAT试剂盒均采自南京建成生物工程研究所,按照试剂盒说明书进行测定。

3)足丝黏附力测试实验:在存活率实验过程中发现沼蛤足丝分泌减少,黏附行为出现异常,为更直观地了解其对沼蛤黏附力的影响效果,开展氯化钠对沼蛤的黏附力测试实验。为避免采样时采样铲对足丝的破坏作用,实验选择自然附着在石块上的沼蛤群体,将沼蛤连同基质一起放入养殖水体中。实验装置仍为30 cm×18 cm×20 cm(长×宽×高)的玻璃缸,实验用水为10 L无氯清水(即放置一周去除氯的自来水),实验时每组中放入一块附着沼蛤的石块,保证每组沼蛤的数量相近,实验持续1周,期间随时监测水质的变化,维持实验中水质条件的稳定。由于存活率实验中处理组C和处理组D之间沼蛤的生理状况差别较大,为更详细地展现沼蛤的黏附行为变化,设置氯化钠浓度为0.017 mol/L、0.051 mol/L、0.085 mol/L、0.12 mol/L、0.17 mol/L,同时以不添加氯化钠为对照组(见表2),每组实验均设置3个平行,实验结果均以3个平行实验的平均值来表示。利用SH-50数显推拉力计在每组中随机选取10只沼蛤在实验开始前(0 h)和实验进行时(24 h、48 h、72 h)测定其足丝的黏附力。

表2 足丝黏附力实验中的氯化钠浓度梯度

Table 2 Concentrations of NaCl in byssal adhesion experiment

组别	盐类	摩尔浓度/(mol·L^{-1})
对照组		
处理组E	氯化钠	0.017
处理组F	氯化钠	0.051
处理组G	氯化钠	0.085
处理组H	氯化钠	0.12
处理组I	氯化钠	0.17

1.3 数据分析

存活率是反映沼蛤活性的重要指标,计算公式如下:

$$S = N_t / N_0 \times 100\% \tag{1}$$

式中,S为存活率;N_t为取样时的活体数量;N_0为初始活体数量。

分别使用GraphPad Prism 8.0和SPSS 21.0进行绘图和数据统计分析。通过ANOVA分析各实验因素的显著性,显著水平设定为$P<0.05$,极显著水平为$P<0.01$。

2 结果与分析

2.1 无机盐对沼蛤存活率的影响

不同浓度氯化钠作用下沼蛤的存活率见图2。在实验中观察到,实验进行到24 h时,处理组D中大部分沼蛤已出现开壳死亡并无黏附、移动和聚拢现象,足丝明显脱落,此时存活率仅为20%,36 h时沼蛤全部死亡,与对照组和其他处理组差异显著($P<0.05$)。而其他处理组中沼蛤的存活率虽均逐渐下降,但运动、聚拢情况明显,均出现沼蛤爬上玻璃缸壁到达水气界面的现象,120 h时存活率仍高于65%,与对照组无显著差别($P>0.05$)。

2.2 无机盐对沼蛤免疫酶活的影响

图3显示了沼蛤在不同氯化钠处理组中免疫酶活性的差异以及相同处理组中免疫酶活性随着时间

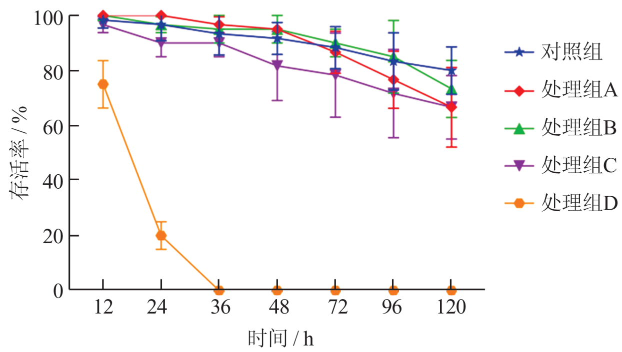

图 2 不同浓度氯化钠作用下沼蛤的存活率

Figure 2 Survival rate of *Limnoperna fortunei* in the presence of different concentrations of NaCl

延长发生的变化。4个处理组中沼蛤的SOD活性在12 h时与对照组变化趋势类似,彼此间差别并不显著($P>0.05$),而此时4个处理组中沼蛤的CAT活性较对照组均有所升高,且处理组D最为明显($P<0.05$);24 h时,处理组A和处理组B中沼蛤的SOD活性明显升高($P<0.05$),而处理组C和处理组D中沼蛤的SOD活性均较对照组有所降低,且处理组D更为明显($P<0.05$),此时处理组A和处理组B中沼蛤的CAT活性与SOD活性变化情况类似,较12 h时有所升高,并高于对照组,而处理组C和处理组D有所降低,且处理组D已低于对照组。

2.3 无机盐对沼蛤足丝黏附力的影响

足丝黏附力测定实验结果和相应的沼蛤存活率结果分别如图4和图5所示。在对照组和处理组E(0.017 mol/L)、处理组F(0.051 mol/L)中,实验后沼蛤的黏附力稍有降低,但并不显著($P>0.05$);处理组G(0.085 mol/L)中的沼蛤在实验进行到24 h时,黏附力显著降低($P<0.05$),但后期变化不明显($P>0.05$),说明在实验后期,氯化钠对沼蛤足丝的作用效果有限;而处理组H(0.12 mol/L)和处理组I(0.17 mol/L)中的沼蛤黏附力均显著降低($P<0.05$),24 h时已下降约40%。

处理组G(0.085 mol/L)、处理组H(0.12 mol/L)和处理组I(0.17 mol/L)中,沼蛤均出现不同程度的死亡,尤其是后两者,死亡现象极其明显,24 h时存活率均已低于30%,进一步验证了即使是在沼蛤足丝未经人为破坏的状态下,高浓度无机盐仍然对其有明显的灭杀和清除效果。

3 讨 论

3.1 不同无机盐对沼蛤存活率的影响机制

盐度作为影响贝类生长、存活的关键环境因子[22],不同贝类适宜的盐度范围不同,同种贝类在不同生长阶段、不同水体环境中,对盐度的耐受能力也不同。本实验发现,沼蛤在水体盐离子浓度为0.085~0.17 mol/L时死亡情况明显,表明此时水体环境已然超出了沼蛤所能适应的范围,失去了抵御能力。水生动物能通过自身的渗透调节来应对外界盐度改变带来的压力[23],但其代谢及能量收支平衡会受到影响[24-27],机体免疫防御能力也会降低[25,28],且盐度的过量增加会导致动物体内血细胞的更新和运动受到抑制[15]。高盐环境下,细胞内Na^+过量积累会破坏离子稳态,抑制细胞代谢活性,并通过渗透胁迫引发氧化损伤,促进一种名为氧自由基的毒副产物即活性氧(reactive oxygen species,ROS)生成,进一步损伤线粒体膜结构,诱导细胞凋亡[29-33]。

在面临胁迫时,贝类会通过激活免疫相关酶来

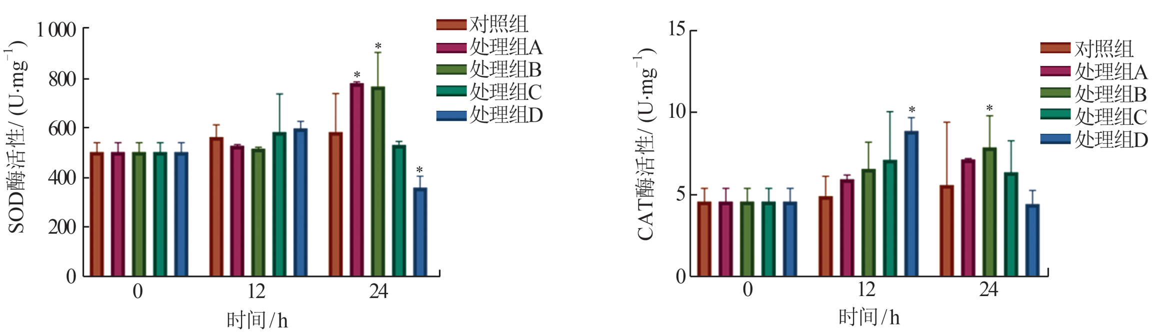

图 3 不同浓度氯化钠作用下沼蛤免疫酶活性的变化

Figure 3 Immunoenzyme activity of *Limnoperna fortunei* in the presence of different concentrations of NaCl

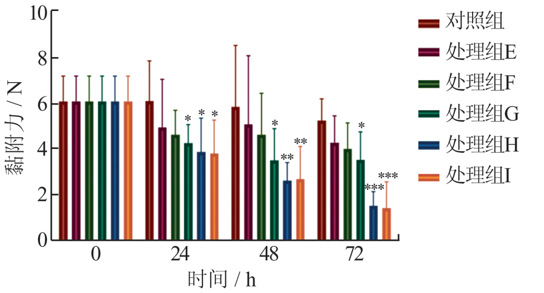

图4　不同浓度氯化钠作用下沼蛤黏附力的变化

Figure 4　Changes in the adhesion of *Limnoperna fortunei* in the presence of different concentrations of NaCl

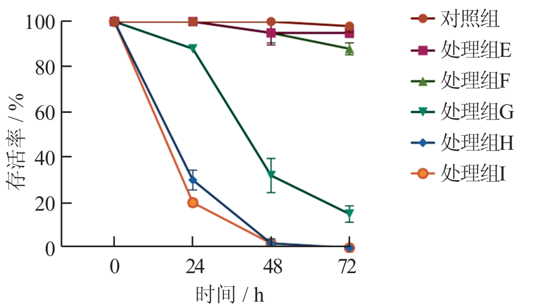

图5　氯化钠作用下沼蛤的存活率

Figure 5　Survival rate of *Limnoperna fortunei* in the presence of NaCl

增强机体的免疫力，避免损伤[15,34-37]。其中SOD和CAT便是机体抗氧化防御系统中的重要组成部分，二者协同可以有效清除机体内自由基O^{2-}和H_2O_2，使机体内活性氧自由基含量处于动态平衡，降低对机体的损伤程度，是非特异性免疫的重要评价指标[38-39]。处理组中沼蛤在12 h时表现出的SOD/CAT活性升高，揭示了其应对短期渗透胁迫的典型抗氧化防御模式，机体内SOD、CAT被诱导激活去除过量的ROS，此时ROS的生成速率与清除能力达到动态平衡。但当用浓度超过0.017 mol/L的无机盐处理沼蛤24 h时，到达了抗氧化防御的崩溃时点，沼蛤抗氧化酶合成出现不足，SOD/CAT酶活性下降，尤其是0.17 mol/L处理组，表明此时超出了沼蛤酶系统清除阈值，系统已无法消除或中和过量的ROS，氧化损伤风险增加[40]，易造成死亡。长蛸(*Octopusvariabilis*)在遭受盐度胁迫时也出现了类似情况[41]。

3.2　不同浓度氯化钠对沼蛤黏附力的影响

沼蛤的生活史主要分为幼虫期、稚贝期和成贝期，其中幼虫时期包括D型幼虫、壳顶幼虫、蹼行幼虫几个重要形态[42]。在进入蹼行期后，沼蛤会逐渐发育出肌肉发达的足，选定合适的附着位置后通过足丝腺分泌蛋白足丝，足丝末端的斑块如同吸盘，不仅可以黏附在石块、网箱等粗糙基质表面，也可以黏附在光滑的玻璃表面，这是一种如化学粘胶剂的化学黏附，并非简单的物理吸附[19,43-44]。沼蛤的足丝蛋白种类较多，其中具有一系列粘性蛋白，这些蛋白之所以具有极强的黏合作用，关键依赖于其结构中所富含的多巴(3,4-二羟基苯丙氨酸，DOPA)。DOPA的羟基可与底材形成氢键或配位键，从而附着于基质表面[19,45]。

有研究发现，沼蛤的足丝具有一定的强度，且直径和数目越多，附着力越大，后期越难清除[46]，而次氯酸钠可以较好地溶解沼蛤的足丝，降低其附着能力[47]。也有研究表明，环境压力会影响沼蛤的生理状态，进而可能影响其足丝分泌能力[20]。本文通过开展氯化钠胁迫已长期黏附在天然基质表面的沼蛤实验，结果发现高浓度(大于等于0.12 mol/L)氯化钠导致沼蛤足丝黏附力在24 h内下降40%，且在实验过程中观察到沼蛤出现明显的足内收行为，可能与盐度波动造成机体渗透压、抗氧化酶系统失衡，干扰其神经传递过程和能量代谢、蛋白质合成响应过程有关[48]。沼蛤足丝黏附并非孤立行为，其合成、分泌与固化过程受多重生理系统调控。在盐度胁迫下，沼蛤免疫防御需消耗大量能量，足丝分泌所需能量减少，足丝合成受限。同时，金属Na^+会影响足丝的机械性能，与足丝蛋白竞争性结合[49]，破坏DOPA配位键，使界面结合能降低，削弱了沼蛤的足丝黏附力。

4　结　论

本研究通过室内控制实验，系统探究了不同浓度无机盐胁迫下沼蛤的存活率、免疫酶活性及足丝黏附特性变化。结果显示，0.17 mol/L氯化钠处理组沼蛤存活率显著低于其他处理组($P<0.05$)，且SOD与CAT活性同步下降；当氯化钠浓度大于等于0.12 mol/L时，沼蛤足丝黏附力显著受抑，24 h时降幅达40%($P<0.05$)。上述发现可为水利工程关键构筑物(如滤水器)的沼蛤应急处置提供理论依据，通过调控盐浓度有望实现附着生物的高效快速清除。

参考文献

[1] 刘冬梅. 输水管道中淡水壳菜控制理论研究[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2014.
Liu D M. Control theory of *Limonperna fortunei* in water conveyance pipelines[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2014.

[2] 田勇，张爱静，王树磊，等. 输水工程中淡水壳莱生物

污损影响及防治对策研究[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 110-116.

Tian Y, Zhang A J, Wang S L, et al. Impact and control measures for *Limnoperna fortunei* (golden mussel) biofouling in water diversion projects[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(1): 110-116.

[3] Ricciardi A. Global range expansion of the Asian mussel *Limnoperna fortunei* (Mytilidae): another fouling threat to freshwater systems[J]. Biofouling, 1998, 13(2): 97-106.

[4] Karatayev A Y, Boltovskoy D, Padilla D K, et al. The invasive bivalves *Dreissena polymorpha* and *Limnoperna fortunei*: parallels, contrasts, potential spread and invasion impacts [J]. Journal of Shellfish Research, 2007, 26(1): 205-213.

[5] Sylvester F, Cataldo D H, Notaro C, et al. Fluctuating salinity improves survival of the invasive freshwater golden mussel at high salinity: implications for the introduction of aquatic species through estuarine ports[J]. Biological Invasions, 2013, 15(6): 1355-1366.

[6] Li S G, Xia Z Q, Chen Y Y, et al. Byssus structure and protein composition in the highly invasive fouling mussel *Limnoperna fortunei*[J]. Frontiers in Physiology, 2018, 9: 418.

[7] Claudi R, de Oliveira M D. Chemical strategies for the control of the golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in industrial facilities [M]// Boltovskoy D. *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel. Cham: Springer International Publishing, 2015: : 417-441.

[8] 徐梦珍, 李威, 于丹丹, 等. 抽水蓄能电站中淡水壳菜生物污损及防治[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 75-83.

Xu M Z, Li W, Yu D D, et al. Golden mussel biofouling and its prevention in pumpedstorage power plants [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(7): 75-83.

[9] Karatayev A Y, Boltovskoy D, Burlakova L E, et al. Parallels and contrasts between *Limnoperna fortunei* and species of *Dreissena* [M] Berlin: Springer International Publishing, 2015.

[10] Liu W, Xu M Z, Zhang J H, et al. Survival and attachment of biofouling freshwater mussel (*Limnoperna fortunei*) to environmental conditions: potential implications in its invasion, infection and biofouling control[J]. Limnology, 2020, 21(2): 245-255.

[11] Horodesky A, Westphal G G C, Cozer N, et al. Effects of salinity on the survival and histology of oysters *Crassostrea gasar* (Adanson, 1757) [J]. Bioscience Journal, 2019, 35(2): 586-597.

[12] Taware S S, Lagade V M, Muley D V, et al. Effect of salinity on digestive gland of estuarine clam *Paphia laterisulca*[J]. Journal of the Marine Biological Association of India, 2017, 59(1): 44-48.

[13] 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.

[14] Yu J H, Song J H, Choi M C, et al. Effects of water temperature change on immune function in surf clams, *Mactra veneriformis* (Bivalvia: Mactridae)[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2009, 102(1): 30-35.

[15] Bussell J A, Gidman E A, Causton D R, et al. Changes in the immune response and metabolic fingerprint of the mussel, *Mytilus edulis* (Linnaeus) in response to lowered salinity and physical stress[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2008, 358(1): 78-85.

[16] 刘敏. 不同温度和盐度对施氏獭蛤消化酶和免疫酶活力的影响[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015

Liu M. Effects of temperature and salinity on enzymatic activity of digestive and immunity in *Lutraria sieboldii* Reeve[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2015

[17] 罗诗怡, 郭明星, 严美姣. 盐度对贝类免疫机能的影响及响应机制研究进展[J]. 海洋渔业, 2024, 46(6): 797-805.

Luo S Y, Guo M X, Yan M J. Research progress on effects of salinity stress on immune function and mechanism in shellfish[J]. Marine Fisheries, 2024, 46(6): 797-805.

[18] 牛东红, 王宏蕾, 李家乐. 海洋贝类对盐度胁迫适应机制的研究进展[J]. 水产学报, 2024, 48(4): 32-44.

Niu D H, Wang H L, Li J L. Research progress on adaptation mechanism of marine shellfish to salinity stress [J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(4): 32-44.

[19] 朱佳兰, 李世国, 张颖, 等. 淡水入侵生物沼蛤的污损机制与防污措施研究进展[J]. 生物安全学报, 2023, 32(4): 303-313.

Zhu J L, Li S G, Zhang Y, et al. Research progress on the fouling mechanisms and anti-fouling strategies of the freshwater invasive golden mussel *Limnoperna fortunei* [J]. Journal of Biosafety, 2023, 32(4): 303-313.

[20] 谭纤茹, 刘德富, 张佳磊, 等. 不同富营养状态下沼蛤

的存活与行为特性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12): 2120-2128.
Tan Q R, Liu D F, Zhang J L, et al. Behavioral and survival characteristics of fouling organisms *Limnoperna fortunei* in different eutrophic status[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(12): 2120-2128.

[21] Oliveira M D, Hamilton S K, Calheiros D F, et al. Oxygen depletion events control the invasive golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in a tropical floodplain[J]. Wetlands, 2010, 30(4): 705-716.

[22] 曹伟, 迟长凤, 董迎辉, 等. 高盐胁迫对缢蛏幼贝存活和三种酶活性的影响[J]. 海洋科学, 2022, 46(7): 44-51.
Cao W, Chi C F, Dong Y H, et al. Effects of high salt stress on survival and enzyme activities of *Sinonovacula constricta* juvenile[J]. Marine Sciences, 2022, 46(7): 44-51.

[23] 杜佳玉, 吴晗阅, 孟照勇, 等. 盐度胁迫对细鳞鲑幼鱼呼吸代谢和抗氧化酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(22): 114-116, 121.
Du J Y, Wu H Y, Meng Z Y, et al. Effects of salinity stress on the respiratory metabolism and antioxidant enzyme activities of *Brachymystax lenok* juvenile[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(22): 114-116, 121.

[24] Chapman E J, Byron C J, Lasley-Rasher R, et al. Effects of climate change on coastal ecosystem food webs: implications for aquaculture[J]. Marine Environmental Research, 2020, 162: 105103.

[25] Cheng W, Juang F M, Chen J C. The immune response of Taiwan abalone *Haliotis diversicolor* supertexta and its susceptibility to *Vibrio parahaemolyticus* at different salinity levels[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2004, 16(3): 295-306.

[26] 丁红兵, 李浩宇, 陈义华, 等. 高盐对缢蛏生长存活、Na^+/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, 2022, 31(4): 831-838.
Ding H B, Li H Y, Chen Y H, et al. Effects of high salinity on growth and survival, Na^+/K^+-ATPase activity and energy metabolism related indexes of razor clam *Sinonovacula constricta*[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(4): 831-838.

[27] 曹伟. 高盐胁迫对缢蛏存活、生理生化及转录水平的影响[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022
Cao W. Effects of high salinity stress on the survival, physiological and biochemical, and transcriptome in razor clam *Sinonovacula constricta* [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022

[28] Gauthier J D, Soniat T M, Rogers J S. A parasitological survey of oysters along salinity gradients in coastal Louisiana[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1990, 21(2): 105-115.

[29] Romano N, Zeng C S. Osmoregulation in decapod crustaceans: implications to aquaculture productivity, methods for potential improvement and interactions with elevated ammonia exposure[J]. Aquaculture, 2012, 334: 12-23.

[30] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, et al. Plant cellular and molecular responses to high salinity [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2000, 51: 463-499.

[31] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55: 373-399.

[32] Gerschman R, Gilbert D L, Nye S W, et al. Oxygen poisoning and x-irradiation: a mechanism in common [J]. Science, 1954, 119(3097): 623-626.

[33] Finkel T, Holbrook N J. Oxidants, oxidative stress and the biology of ageing [J]. Nature, 2000, 408 (6809): 239-247.

[34] Malagoli D, Casarini L, Sacchi S, et al. Stress and immune response in the mussel *Mytilus galloprovincialis* [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2007, 23(1): 171-177.

[35] 时少坤, 王瑞旋, 王江勇, 等. 盐度胁迫对近江牡蛎几种免疫因子的影响[J]. 南方水产科学, 2013, 9(3): 26-30.
Shi S K, Wang R X, Wang J Y, et al. Effects of salinity stress on immune factors of *Crassostrea hongkongensis* [J]. South China Fisheries Science, 2013, 9(3): 26-30.

[36] 唐保军, 邹雄, 尹飞. 高盐胁迫对黄边糙鸟蛤(*Trachycardium flavum*)呼吸排泄和免疫酶活性的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(2): 143-150.
Tang B J, Zou X, Yin F. Effects of acute hyperosmotic stress on metabolic rates and immune-related enzymatic activities in clam(*Trachycardium flavum*)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(2): 143-150.

[37] Song J A, Choi C Y. Temporal changes in physiological responses of bay scallop: performance of antioxidant mechanism in *Argopecten irradians* in response to sudden changes in habitat salinity[J]. Antioxidants, 2021, 10(11): 1673.

[38] Pipe R K, Porte C, Livingstone D R. Antioxidant enzymes associated with the blood cells and haemolymph of the mussel *Mytilus edulis*[J]. Fish and Shellfish Immunology, 1993, 3(3): 221-233.

[39] Ding Z L, Kong Y Q, Zhang Y X, et al. Effect of feeding frequency on growth, body composition, antioxidant status and mRNA expression of immunodependent genes before or after ammonia-N stress in juvenile oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2017, 68: 428-434.

[40] Lushchak V I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals[J]. Aquatic Toxicology, 2011, 101(1): 13-30.

[41] 张玉玉, 王春琳, 李来国. 长蛸的盐度耐受性及盐度胁迫对其血细胞和体内酶活力的影响[J]. 台湾海峡, 2010, 29(4): 452-459.
Zhang Y Y, Wang C L, Li L G. Tolerance of *Octopus variabilis* to salinity changes and the effects of salinity changes on parameters of haemacytes and the vitality of enzyme activity[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2010, 29(4): 452-459.

[42] 徐梦珍, 王兆印, 王旭昭, 等. 输水通道中沼蛤入侵及水力学防治[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 856-862, 872.
Xu M Z, Wang Z Y, Wang X Z, et al. Golden mussel invasion in water transfer tunnels and hydraulic prevention[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 856-862, 872.

[43] 蔡杰龙, 杨永民, 潘志权, 等. 淡水壳菜污损体系及其对输水建筑物侵蚀现状分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(6): 111-116, 129.
Cai J L, Yang Y M, Pan Z Q, et al. Analysis on the fouling system of freshwater shell vegetable and its erosion to water conveyance building[J]. Pearl River, 2019, 40(6): 111-116, 129.

[44] 朱曜曜, 丁海兵, 孙承君. 贻贝粘性蛋白组成、作用机理与应用[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4): 560-570.
Zhu Y Y, Ding H B, Sun C J. The research progress on mussel adhesive proteins[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(4): 560-570.

[45] Zhao H, Robertson N B, Jewhurst S A, et al. Probing the adhesive footprints of *Mytilus californianus* byssus[J]. Journal of Biological Chemistry, 2006, 281(16): 11090-11096.

[46] 徐梦珍, 曹小武, 王兆印, 等. 输水工程中沼蛤的附着特性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 170-176.
Xu M Z, Cao X W, Wang Z Y, et al. Attachment characteristics of golden mussels (*Limnoperna fortunei*) in water transport projects[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(2): 170-176.

[47] 罗凤明, 刘丽君, 尤作亮, 等. 原水管道中淡水壳菜足丝的溶解性能研究[J]. 给水排水, 2006, 42(3): 29-32.
Luo F M, Liu L J, You Z L, et al. Study on solvability of *Limnoperna fortunei* byssus cohering in raw water pipe[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 42(3): 29-32.

[48] 蒲淑娟, 袁海光, 张锐坚, 等. NaClO 和 $KMnO_4$ 对沼蛤毒理效应的代谢组学研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(6): 1-11.
Pu S J, Yuan H G, Zhang R J, et al. Metabolomics study on toxicological effect of NaClO and $KMnO_4$ on intrusive *Limnoperna fortunei*[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(6): 1-11.

[49] Li S G, Liu C, Zhan A B, et al. Influencing mechanism of ocean acidification on byssus performance in the pearl oyster *Pinctada fucata*[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(13): 7696-7706.