

文章编号: 1674-5566(2023)06-1184-11

DOI: 10.12024/jsou.20221204051

环境胁迫对福寿螺肝胰脏抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响

陆浩磊¹, 鲁仙¹, 赵志淼¹, 韩浩宇¹, 吴昊², 张饮江¹

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 上海市青浦区水产技术推广站, 上海 201700)

摘要: 为研究广州、上海、成都3地的福寿螺在不同温度、不同盐度、不同溶解氧环境胁迫下, 肝胰脏超氧化物歧化酶(SOD)活性及丙二醛(MDA)含量的变化情况, 阐明环境胁迫对福寿螺生理的影响机理。结果表明: 在温度、溶解氧、盐度单因子胁迫下, 福寿螺肝胰脏的SOD活性、MDA含量均呈先上升后下降的变化趋势, 且在24~48 h时达到最大值, 在72 h时恢复到初始水平。在温度-盐度复合胁迫下, 福寿螺肝胰脏SOD活性及MDA含量高于单因素胁迫, 温度和盐度表现出协同作用。单因素或复合胁迫下, 福寿螺肝胰脏SOD活性及MDA含量存在地区差异。

关键词: 福寿螺; 环境胁迫; 超氧化物歧化酶; 丙二醛; 入侵风险

中图分类号: X 524 **文献标志码:** A

福寿螺(*Pomacea canaliculata*)又称大瓶螺、苹果螺等, 属软体动物门(Mollusca)腹足纲(Gastropoda)新近腹足目(Neogastropoda)瓶螺科(Ampullariidae)福寿螺属(*Pomacea canaliculata*), 多栖息于沟渠、水田和溪流缓和的地方^[1]。同时福寿螺属于全球性的入侵物种, 对入侵地的生物多样性、农业生产、人居环境及人体健康造成了重大危害, 温度、盐度、溶解氧等环境因子影响福寿螺的生存、生长与繁殖。福寿螺通过与本地水生生物抢夺食物与空间资源, 严重挤压本地物种的生态位, 致使入侵地生态系统的多样性和完整性遭到破坏, 加速物种的灭绝, 严重破坏了原有生态系统的结构和功能^[2]。有研究表明, 福寿螺现已入侵我国广东、广西、福建、江西、浙江、江苏、四川等超过15个省份^[3], 因此对福寿螺进行研究有重要生态学意义。

水生动物的生长发育受温度、盐度、溶解氧等非生物因素及食物、天敌等生物因素的影响。温度是决定水生动物分布状况最关键的生物因素^[4], 盐度和溶解氧是水生动物生存的重要影响因子^[5]。温度、盐度和溶解氧的改变往往导致

生物对环境做出应激响应, 同时生物体内产生过量的活性氧自由基(Reactive oxygen species, ROS)。ROS过度积累会引发脂质过氧化, 损害细胞正常生理功能^[6]。为了清除过量的ROS, 最大限度降低其带来的损伤, 生物进行了一系列进化, 形成了一套完善的体系对抗氧化。在抗氧化体系中, 超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)具有消除活性氧自由基的功能, 能够增强机体免疫力, 是重要的抗氧化酶类^[7]。生物体内过量的活性氧自由基会引起脂质过氧化, 脂质氧化的最终产物之一是丙二醛(Malondialdehyde, MDA), 因此MDA含量可以从侧面反映生物体细胞受氧化损伤的程度^[8]。通过测定SOD活性和MDA含量的变化, 可以反映环境胁迫对生物生理功能的影响^[9]。

本研究以不同地区福寿螺为研究对象, 研究在温度、盐度、溶解氧及温度-盐度复合胁迫下福寿螺肝胰脏SOD活性及MDA含量的变化趋势, 阐明福寿螺在不同环境胁迫下体内抗氧化机制, 为深入研究福寿螺在环境中的演替转化规律及防控提供理论基础。

收稿日期: 2022-12-25 修回日期: 2023-05-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2601303, 2022YFC2601304); 上海市加强公共卫生体系建设三年行动计划(2023—2025年)重点学科项目(GWVI-11.1-13)

作者简介: 陆浩磊(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水域生态学。E-mail: luhaolei14@126.com

通信作者: 张饮江, E-mail: yjzhang@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>

1 材料与方法

1.1 材料

所用福寿螺在2022年6月至2022年9月间,采自广州市(23.2°N, 113.3°E)、上海市(31.2°N, 121.5°E)、成都市(30.67°N, 104.1°E)的湿地。在实验室内(25℃)驯养10d,选取外壳完好、活动性强、壳长平均为30mm的福寿螺用于实验。驯养期间每天用曝气自来水换水1/3,并投喂生菜。根据《中华人民共和国地表水环境质量标准》,所用曝气自来水水质为三类水。

1.2 方法

1.2.1 单因素胁迫

温度胁迫通过人工气候箱设置15、25、

35℃3个实验组,分别记为T1、T2、T3;盐度胁迫设置0、5.0、7.5g/L3个实验组,分别记为S1、S2、S3;溶解氧胁迫采用向养殖水体连续充氮气-氧气的方式实现,如图1所示。每个桶的空气曝气量和氮气曝气量通过气体流量计单独控制,实现不同溶氧水平的效果。设置2.1、4.3、6.2mg/L3个实验组,其中2.1、4.3mg/L为低氧实验组,6.2mg/L为对照组,分别记为O1、O2、O3。每个实验组设置广州、上海、成都3个地区平行,每个平行随机放入15只驯养后的福寿螺。实验期间停止投喂生菜。实验开始后,每个平行分别于0、24、48、72h随机选取3只福寿螺,立即进行解剖。通过解剖得到的福寿螺肝胰脏保存在-40℃的冰箱中待测。

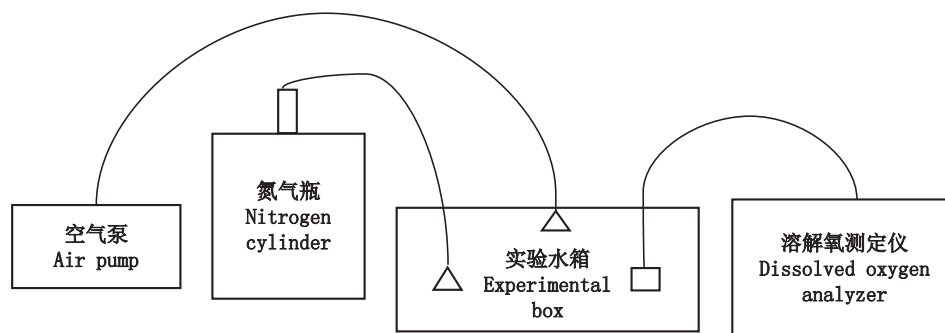


图1 低氧胁迫装置图

Fig. 1 Diagram of hypoxia stress device

1.2.2 温度-盐度复合胁迫

选用采自上海的福寿螺进行复合胁迫实验,设置T2+S1为对照组CK,4个平行: T1+S2, T1+S3, T3+S2, T3+S3,每个平行随机放入15只驯养后的福寿螺。实验期间各个平行停止投喂生菜。实验开始后,每个平行分别于0、24、48、72h随机选取3只福寿螺,立即进行解剖。通过解剖得到的福寿螺肝胰脏保存在-40℃的冰箱中等待测定。

1.3 生理指标测定

超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)和蛋白质定量(TP)试剂盒购自南京建设生物工程研究所,具体操作过程见试剂盒使用说明书,所有指标于24h内测定完毕。

组织蛋白测定采用考马斯亮蓝法,超氧化物歧化酶活性测定采用黄嘌呤氧化法,丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸法,上述指标的计算依据

均来自于试剂盒。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel进行实验数据预处理,实验数据用平均值表示,用SPSS 27软件进行单因素方差分析,运用Duncan氏法比较组间差异,以 $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著,Origin 2021软件作图,进行不同生理生化指标分析。

2 结果

2.1 单因素胁迫下不同地区福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性变化

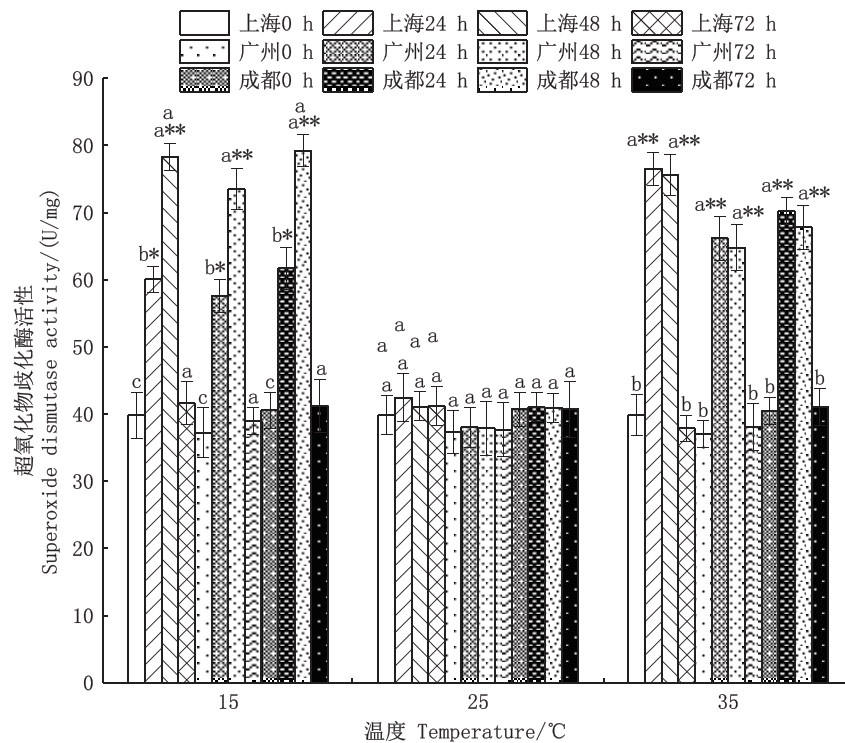
2.1.1 温度对不同地区福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性的影响

在温度胁迫下,不同地区福寿螺肝胰脏SOD活性随时间均呈现先上升后下降的趋势(图2)。在15℃低温胁迫下,SOD活性在24h

时开始上升,在48 h时达到最大值,随后SOD活性开始下降,在72 h时恢复到初始水平。在35 °C高温胁迫下,SOD活性在24 h达到最大值,随后开始下降,在72 h恢复至初始水平。在24 h和48 h时,低温和高温组SOD活性显著高于

25 °C对照组。

在低温胁迫下,福寿螺肝胰脏SOD活性从低到高依次为:广州、上海、成都,且变化趋势一致。在高温胁迫下,福寿螺肝胰脏SOD活性从低到高依次为广州、成都、上海,且变化趋势一致。



小写字母表示在同一温度处理下同一地区不同时间处理组之间差异显著 ($P < 0.05$); 同一地区不同时间点的SOD活性和25 °C对照组之间比较, *差异显著 ($P < 0.05$), **差异极显著 ($P < 0.01$)。

The lowercase letters indicated that there was significant difference between the treatment groups in the same area and at different time under the same temperature treatment ($P < 0.05$); Compared with the control group at 25 °C at different time points in the same region, * the difference was significant ($P < 0.05$), ** the difference was extremely significant ($P < 0.01$).

图2 温度胁迫对福寿螺SOD活性的影响

Fig. 2 Effect of temperature stress on SOD activity of *Pomacea canaliculate*

2.1.2 溶解氧对不同地区福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性的影响

在低氧胁迫下,不同地区福寿螺肝胰脏SOD活性随时间呈现先上升后下降的趋势,(图3)。在48 h之前持续上升,48 h之后逐渐下降,72 h恢复到初始水平。

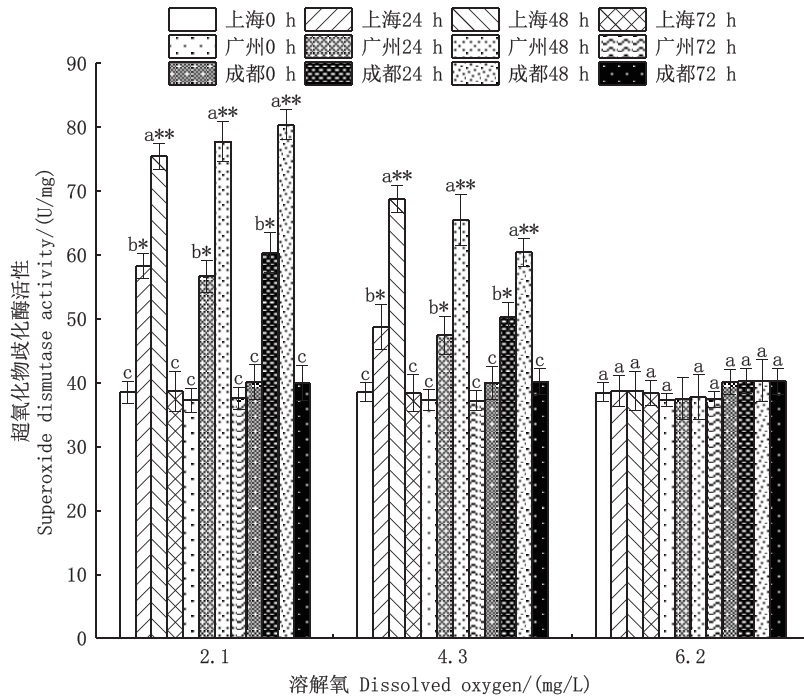
在2.1 mg/L低氧胁迫下,福寿螺肝胰脏SOD活性从低到高依次为:上海、广州、成都,且变化趋势一致。在4.3 mg/L低氧胁迫下,福寿螺肝胰脏SOD活性从低到高依次为成都、广州、上海,且变化趋势一致。

2.1 mg/L溶解氧处理下福寿螺肝胰脏SOD活性要高于4.3 mg/L溶解氧处理。

2.1.3 盐度对不同地区福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性的影响

在盐度胁迫下,不同地区福寿螺肝胰脏SOD活性随时间的变化均呈现先上升后下降的趋势(图4)。盐度为5 mg/L时,SOD活性最高值出现在48 h,随后开始下降,在72 h恢复到初始值。盐度为7.5 mg/L时,SOD最高值出现在24 h,并在接下去的24 h内维持较高值,在48 h开始下降,72 h恢复到初始值。在24 h和48 h,高盐度组SOD活性显著高于低盐度和无盐度组。

在盐度胁迫下,上海地区福寿螺肝胰脏SOD活性最高,广州次之,成都最低,且变化趋势一致。

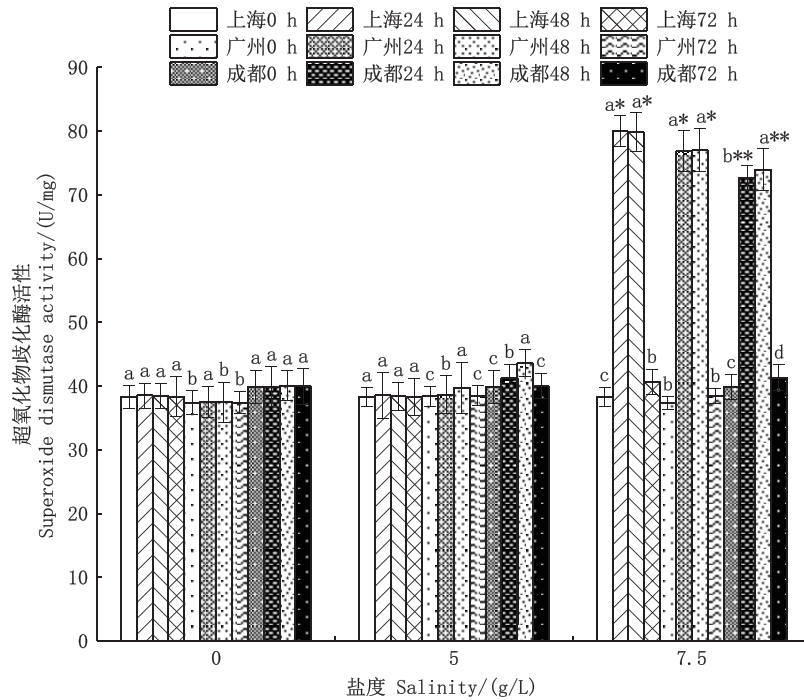


小写字母表示在同一溶解氧处理下同一地区不同时间处理组之间差异显著 ($P < 0.05$); 同一地区不同时间点的SOD活性和6.8 mg/L对照组之间比较, *差异显著 ($P < 0.05$), **差异极显著 ($P < 0.01$)。

The lowercase letters indicate that there is significant difference between the treatment groups in the same area and at different time under the same dissolved oxygen treatment ($P < 0.05$); Compared with the control group at 6.8 mg/L at different time points in the same region, * the difference was significant ($P < 0.05$), ** the difference was extremely significant ($P < 0.01$).

图3 溶解氧胁迫对福寿螺SOD活性的影响

Fig. 3 Effect of dissolved oxygen stress on SOD activity of *Pomacea canaliculate*



小写字母表示在同一盐度处理下同一地区不同时间处理组之间差异显著 ($P < 0.05$); 同一地区不同时间点的SOD活性和0 g/L对照组之间比较, *差异显著 ($P < 0.05$), **差异极显著 ($P < 0.01$)。

The lowercase letters indicated that there was significant difference between different treatment groups in the same area at different time under the same salinity treatment ($P < 0.05$); Compared with the 0 g/L control group at different time points in the same region, * the difference was significant ($P < 0.05$), ** the difference was extremely significant ($P < 0.01$).

图4 盐度胁迫对福寿螺SOD活性的影响

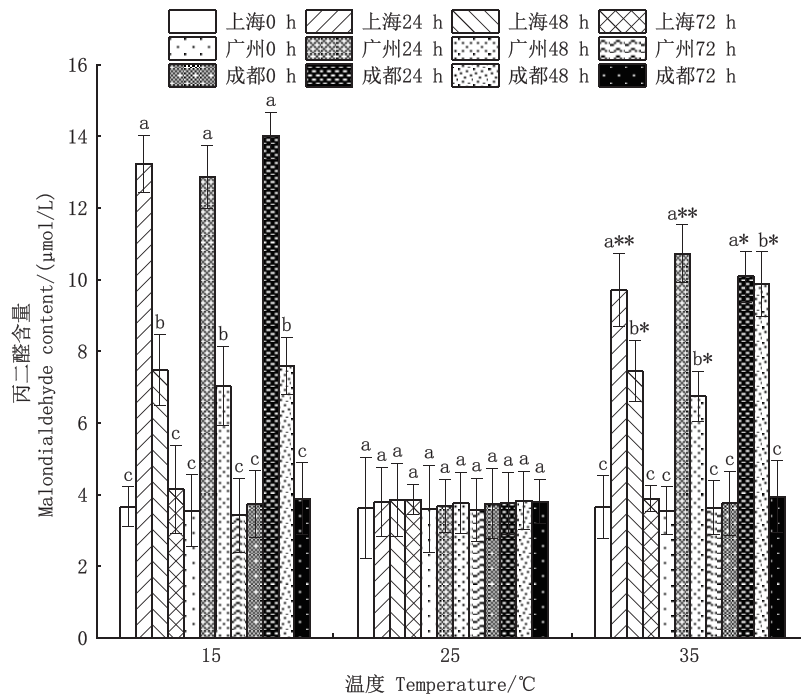
Fig. 4 Effect of salinity stress on SOD activity of *Pomacea canaliculate*

2.2 单因素胁迫下不同地区福寿螺肝胰脏丙二醛含量变化

2.2.1 温度对不同地区福寿螺肝胰脏丙二醛含量的影响

在温度胁迫下,不同地区福寿螺肝胰脏MDA含量随时间的变化均呈现先上升后下降的趋势(图5)。在15℃低温胁迫下,福寿螺肝胰脏

MDA含量在24 h达到最大值,随后快速下降,在72 h时恢复到初始水平。在35℃高温胁迫下,福寿螺肝胰脏MDA含量在24 h达到最大值,随后开始下降,下降速度慢于15℃低温胁迫,在72 h时恢复到初始水平。在24 h和48 h,低温和高温组福寿螺肝胰脏MDA含量均显著高于25℃对照组。



小写字母表示在同一温度处理下同一地区不同时间处理组之间差异显著($P < 0.05$);同一地区不同时间点的SOD活性和25℃对照组之间比较,*差异显著($P < 0.05$),**差异极显著($P < 0.01$)。

The lowercase letters indicated that there was significant difference between the treatment groups in the same area and at different time under the same temperature treatment ($P < 0.05$); Compared with the control group at 25℃ at different time points in the same region, * the difference was significant ($P < 0.05$), ** the difference was extremely significant ($P < 0.01$).

图5 温度胁迫对福寿螺MDA含量的影响

Fig. 5 Effect of temperature stress on MDA content of *Pomacea canaliculate*

在低温胁迫下,福寿螺肝胰脏MDA含量从低到高依次为广州、上海、成都,且变化趋势一致。在高温胁迫下,福寿螺肝胰脏MDA含量从低到高依次为上海、成都、广州,且变化趋势一致。

2.2.2 溶解氧对不同地区福寿螺肝胰脏丙二醛含量的影响

在低氧胁迫下,不同地区福寿螺肝胰脏MDA含量随时间先上升后下降(图6)。各个地区的福寿螺肝胰脏MDA含量在24 h之前持续上升,之后逐渐下降,72 h恢复到初始水平。

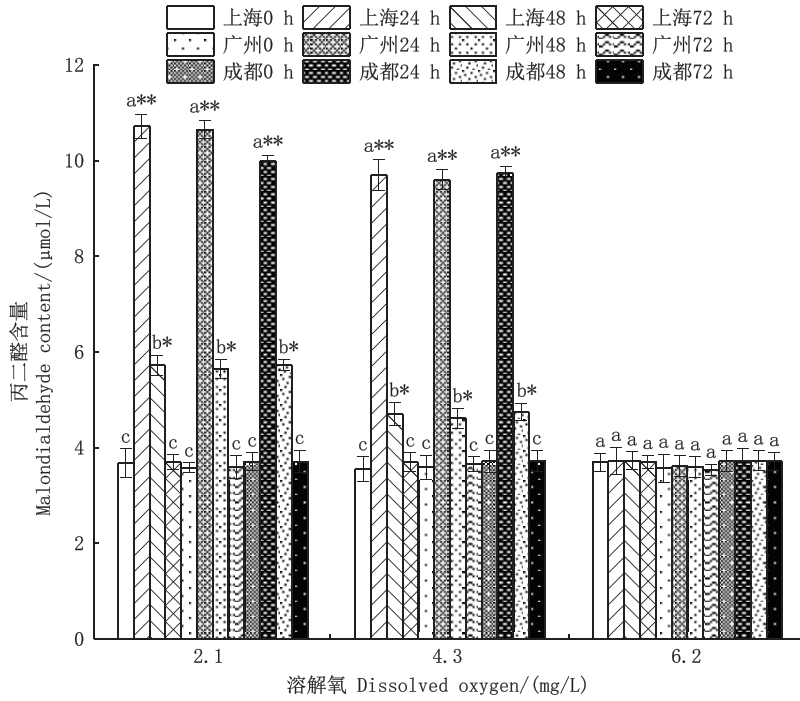
2.1 mg/L溶解氧处理下,福寿螺肝胰脏MDA含量从低到高依次为成都、广州、上海,且变化趋势一致。4.3 mg/L溶解氧处理下,福寿螺肝胰脏

MDA含量从低到高依次为广州、上海、成都,且变化趋势一致。

2.1 mg/L溶解氧处理下福寿螺肝胰脏MDA含量要高于4.3 mg/L溶解氧处理。

2.2.3 盐度对不同地区福寿螺肝胰脏丙二醛含量的影响

在高盐度胁迫下,不同地区福寿螺肝胰脏MDA含量随时间的变化均呈现先上升后下降的趋势(图7)。在24 h时开始上升,在48 h时达到最大值,随后MDA含量开始下降,在72 h时恢复到初始水平。在低盐度和无盐度胁迫下,福寿螺肝胰脏MDA含量变化幅度较小。在24 h和48 h,高盐度组MDA含量显著高于低盐度和无盐度组。

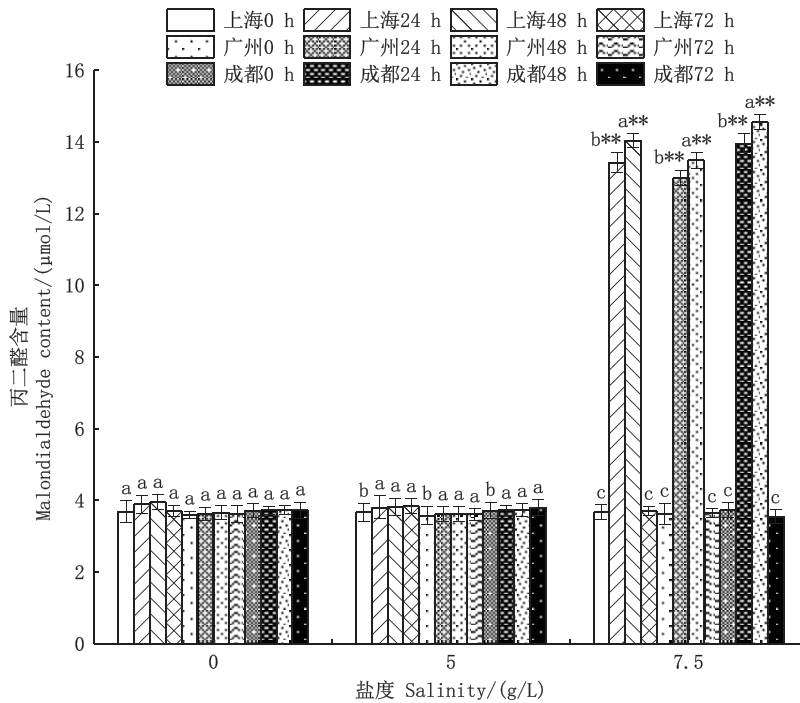


小写字母表示在同一溶解氧处理下同一地区不同时间处理组之间差异显著 ($P < 0.05$); 同一地区不同时间点的SOD活性和6.8 mg/L对照组之间比较, *差异显著 ($P < 0.05$), **差异极显著 ($P < 0.01$)。

The lowercase letters indicate that there is significant difference between the treatment groups in the same area and at different time under the same dissolved oxygen treatment ($P < 0.05$); Compared with the control group at 6.8 mg/L at different time points in the same region, * the difference was significant ($P < 0.05$), ** the difference was extremely significant ($P < 0.01$).

图6 溶解氧胁迫对福寿螺MDA含量的影响

Fig. 6 Effect of dissolved oxygen stress on MDA content of *Pomacea canaliculate*



小写字母表示在同一盐度处理下同一地区不同时间处理组之间差异显著 ($P < 0.05$); 同一地区不同时间点的SOD活性和0 g/L对照组之间比较, *差异显著 ($P < 0.05$), **差异极显著 ($P < 0.01$)。

The lowercase letters indicated that there was significant difference between different treatment groups in the same area at different time under the same salinity treatment ($P < 0.05$); Compared with the 0 g/L control group at different time points in the same region, * the difference was significant ($P < 0.05$), ** the difference was extremely significant ($P < 0.01$).

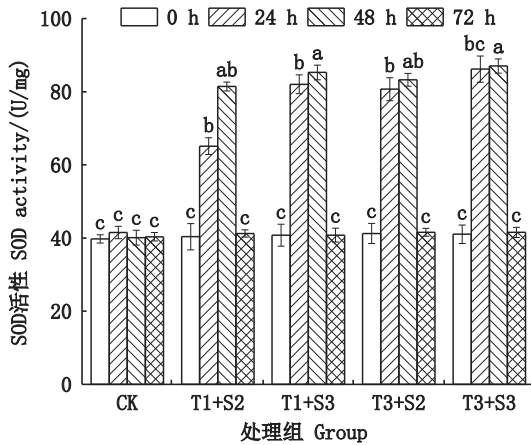
图7 盐度单一胁迫对福寿螺MDA含量的影响

Fig. 7 Effect of salinity stress on MDA content of *Pomacea canaliculate*

在高盐度胁迫下,成都地区福寿螺肝胰脏MDA含量最高,上海次之,广州最低,且变化趋势一致。

2.3 温度-盐度复合胁迫下福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性变化

从图8可知,当温度-盐度复合胁迫较弱时(T1+S2),随着胁迫时间的增加,福寿螺SOD活性缓步升高;当温度-盐度复合胁迫 \geq (T1+S3)时,福寿螺SOD活性增加速度明显加快。CK组福寿螺SOD活性在24 h达到最大值,最后开始下降,在72 h恢复至初始水平。T1+S2, T1+S3, T3+S2, T3+S3组福寿螺SOD活性在24 h达到较高值,同时继续增长,在48 h达到最大值,随后快速下降,在72 h恢复至初始水平。



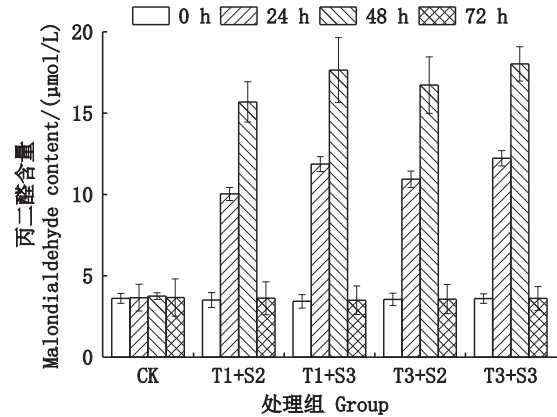
不同字母代表差异显著($P < 0.05$)。

Different letters represent significant differences ($P < 0.05$).

图8 温度-盐度复合胁迫对福寿螺SOD活性的影响
Fig. 8 Effect of temperature-salinity combined stress on SOD activity of *Pomacea canaliculate*

2.4 温度-盐度复合胁迫影响下不同地区福寿螺肝胰脏丙二醛含量变化

从图9可知,当温度-盐度复合胁迫处在T3+S3水平时,福寿螺肝胰脏MDA含量峰值最大,且增加速度最快;当温度-盐度复合胁迫处在T1+S2水平时,福寿螺肝胰脏MDA含量峰值最小,增加速度最慢。各组从胁迫开始,MDA含量迅速增加,但胁迫24 h后,MDA含量增加速度降低,在48 h达到最大值,随后开始下降,在72 h恢复至初始水平。



不同字母代表差异显著($P < 0.05$)。

Different letters represent significant differences ($P < 0.05$).

图9 温度-盐度复合胁迫对福寿螺MDA含量的影响
Fig. 9 Effect of temperature-salinity combined stress on MDA content of *Pomacea canaliculate*

3 讨论

3.1 单因素胁迫对福寿螺抗氧化应激反应的影响

温度作为核心自然因素,对水生生物的代谢及应激反应速度发挥调控作用,是直接影响水生动物生理生化反应的重要环境变量^[10]。盐度是影响水生动物渗透压平衡的重要环境因子,盐度的变化对生长、发育、免疫等生命活动也有相当程度影响^[11]。水体溶解氧含量是水生动物生存的重要因子之一,影响其生长发育、新陈代谢、繁殖等生命过程^[12]。

环境因子的急剧变化会诱导活性氧自由基的产生和细胞组分氧化状态的变化,SOD对氧化应激消除过程中释放出的活性氧自由基的消除起至关重要的作用^[13]。SOD与自由基反应产生 H_2O_2 ,可避免活性氧自由基对生物体中生物高分子的氧化损伤,从而保持细胞和生命体的正常生理活动^[14]。因此,SOD活性的变化能够体现不同胁迫条件下生物体的生理状况^[15]。

福寿螺在温度、溶解氧和盐度胁迫下产生大量的活性氧自由基,为维持体内活性氧自由基的动态平衡,SOD活性随之提高。福寿螺肝胰脏SOD活性在低温胁迫下48 h达到最大值,高温胁迫下24 h达到最大值;低氧胁迫下24 h达到最大值;低盐胁迫下48 h达到最大值,高盐胁迫下

24 h达到最大值。随着环境胁迫时间的增加,SOD酶活性开始下降,72 h恢复到对照组水平,说明福寿螺可以在72 h内完成对环境胁迫的响应,维持自身稳态。生物通过清除体内过量的活性氧自由基,最终达到新的平衡^[16]。福寿螺通过调节抗氧化酶的活性来应对温度和盐度的变化,清除体内积累的自由基,从而恢复体内自由基的动态平衡,保护其免遭氧化损伤。低温胁迫下SOD活性峰值出现较高温胁迫更晚,推测低温可能抑制了福寿螺的生理活动,对环境胁迫无法迅速做出调整。低氧胁迫下,溶解氧含量越低,福寿螺肝脏SOD活性和MDA含量越高;高盐胁迫下SOD活性的峰值出现比低盐胁迫早,可能是因为在一定范围内,外部环境压力越大,福寿螺的响应速度越快,从而缩短恢复到稳态的时间。

MDA是体内氧自由基引起的生物膜不饱和脂肪酸过氧化反应的代谢产物,是目前反映有机体氧化损伤最具代表性的指标之一^[17-18]。MDA产生数量的多少表示脂质过氧化的水平,能够间接说明组织细胞受到自由基攻击的程度^[19]。通常,MDA含量越高,生物体所面临的压力越大^[20]。因此,MDA可以作为细胞膜氧化损伤的指示物。本研究表明,在温度胁迫和低氧胁迫下,福寿螺肝脏MDA含量在24 h达到峰值,在盐度胁迫下,福寿螺肝脏MDA含量在48 h达到峰值,说明福寿螺在环境胁迫下产生应激反应,增强脂质过氧化作用。过度积累的自由基被迅速增加的SOD清除,MDA含量在48 h开始快速下降,72 h恢复到对照组水平,说明福寿螺在面对环境胁迫时,可以通过调节体内抗氧化酶活性,维持体内氧自由基平衡,减少体内脂质过氧化程度,最终使得MDA含量恢复到正常水平。

由于福寿螺同时具有鳃和肺两种器官,改变水体中溶解氧的含量对福寿螺生理生化活动产生的影响较小,因此福寿螺对低氧胁迫的响应要稍弱于温度和盐度胁迫,具体表现为在其他条件相同时,低氧胁迫组的福寿螺肝脏SOD活性和MDA含量要略低于温度胁迫和盐度胁迫组。

3.2 温度-盐度复合胁迫对福寿螺抗氧化应激反应的影响

温度-盐度复合胁迫下,福寿螺肝脏SOD活性和MDA含量高于单因素胁迫,可能是因为在面对更大环境压力时,福寿螺体内会产生数量更

多的活性氧自由基,为了减少自由基对细胞的损伤,SOD活性需要进一步提高。MDA作为脂质过氧化的产物,可以反映生物体面临的环境压力,因此也会随着温度-盐度复合胁迫而增加,温度和盐度存在协同关系。

对比T1+S2和T3+S2的SOD活性峰值可以看出,高温比低温影响更显著,可能是由于低温抑制了酶活性。在高温环境下,酶会变性失活,本研究中却并未出现,可能是因为35℃还没有达到SOD失活的临界温度,需要进一步研究。研究表明,在秦岭-淮河一线,年平均气温为15℃^[21]。我国南方地区年平均温度在15℃和35℃之间,北方地区年平均温度低于15℃,因此福寿螺易在南方地区扩散。周宇等^[22]研究表明,福寿螺在我国南方的入侵范围要远远大于北方。这与本文结论一致。

对比T3+S2和T1+S3的SOD活性峰值可以看出,盐度比温度影响更显著,可能因为福寿螺是淡水物种,对盐度变化比较敏感,因此在淡水区域表现出更强的入侵力。KWONG等^[23]的研究结果表明,福寿螺在淡水区域分布更广。这与本文结论相符。

3.3 环境胁迫下福寿螺抗氧化应激反应的地区特异性

不同地区福寿螺肝脏超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量展现出相似的变化,具体表现为先上升后下降的趋势,但在SOD活性的高低和丙二醛含量的多少上存在差异。

本研究表明,低温胁迫下,广州地区福寿螺肝脏SOD活性最高,成都地区福寿螺肝脏MDA含量最高,可能是因为广州地区的福寿螺具有较强的抗寒能力,更高活性的SOD可以更加迅速应对低温胁迫。MDA含量与生物体面对的环境压力成正相关,相同低温胁迫下,成都地区福寿螺体内MDA含量最高,表明成都地区福寿螺对低温的适应性较弱。高温胁迫下,上海地区福寿螺肝脏SOD活性最高,广州地区福寿螺肝脏MDA含量最高,可能是因为上海地区的福寿螺对高温的适应性较强,能产生更多的SOD来消除ROS,高含量的MDA表明广州地区福寿螺对高温的适应力相对较弱。

本研究同时表明,低氧胁迫下成都地区福寿螺肝脏SOD活性最高,上海地区福寿螺肝脏

MDA含量最高,推测成都地区福寿螺更能适应低氧环境,上海地区福寿螺对低氧环境的适应力相对较弱。这可能是由于成都的海拔高于广州和上海,因此当地的福寿螺对于低氧环境具有一定的适应能力。

本研究还表明,高盐胁迫下上海地区福寿螺肝胰脏SOD活性最高,成都地区福寿螺肝胰脏MDA含量最高,推测上海地区福寿螺对高盐环境具有较强的适应力,成都地区福寿螺对盐度胁迫的适应力相对较弱。这可能是由于上海地处长江口淡水盐水交界处,水体中带有盐分,导致上海地区的福寿螺对盐度胁迫具有一定的适应能力。

3.4 福寿螺入侵风险分析

3.4.1 福寿螺向滩涂海域入侵风险

河口区受潮汐、上游径流等的影响,盐度变化幅度大^[24]。以长江口为例,丰水期春季平均盐度为14,夏季平均盐度为7,秋季平均盐度为9,冬季平均盐度为20^[25]。本研究初步表明,福寿螺能在盐度为7.5 g/L的环境下存活一段时间,因此随着潮汐或丰枯水期的变化,福寿螺能在短期或间歇性地存活于长江口盐水环境,特别是在丰水期。此外,福寿螺同时具有鳃和肺,可以自由进出盐水环境,可能会吸附在河口植物及滨海湿地植物上,对其造成损害。现长江口正在规模化试种植的红树林可能会成为福寿螺潜在的入侵目标。同时本研究表明,上海地区的福寿螺具有一定的抗盐能力,上海地处长江口,因此存在福寿螺向滩涂海域入侵的风险。

3.4.2 福寿螺向低温地区入侵风险

刘艳斌等^[26]的研究结果表明,福寿螺只有在20~35℃的温度条件下才能正常生长、发育和繁殖,如果温度长期低于15℃对福寿螺的生长、发育、繁殖很不利,会导致其卵不能正常孵化,幼螺生长极其缓慢,成螺不能产卵等,当温度持续10 d高于40℃也会导致卵不能孵化和幼螺、成螺出现高死亡率。范靖宇等^[27]研究发现,福寿螺在北京地区不能周年生存,但在春夏季节引入可以造成季节性繁殖和一定的危害,因此在北京地区不能引入和放生福寿螺。本研究表明,福寿螺可以在15℃条件下存活一段时间,这与刘艳斌、范靖宇等的研究吻合。同时,本研究还表明,广州地区的福寿螺具有一定的抗寒能力,在全球变暖

的大背景下,部分高纬度地区年平均气温升高,更加适合福寿螺生存,因此在防控方面需要注意。

4 结论

(1)在温度、盐度、溶解氧胁迫下,上海、广州、成都三地的福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量均呈现先上升后下降的趋势。

(2)在温度-盐度复合胁迫下,福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量要高于单因素胁迫,温度和盐度存在协同关系。

(3)面对环境胁迫时,三地的福寿螺肝胰脏超氧化物歧化酶活性和丙二醛含量存在差异。福寿螺抗氧化应激反应表现出地区特异性。

(4)福寿螺存在向长江口含盐水域入侵的风险,可能会对滨海湿地植物造成危害,有待进一步研究。同时福寿螺也存在向低温地区入侵的风险,在防控方面应给予更多关注。

参考文献:

- [1] HAYES K A, JOSHI R C, THIENGO S C, et al. Out of South America: multiple origins of non-native apple snails in Asia [J]. *Diversity and Distributions*, 2008, 14(4): 701-712.
- [2] 刘洛源,张叶军,陈乃菲,等. 入侵种小管福寿螺对本土物种梨形环棱螺的生态挤压作用[J]. *动物学杂志*, 2021, 56(5): 663-673.
- [3] LIU M Y, ZHANG Y J, CHEN N F, et al. Ecological squeezing effect of the invasive species *Pomacea canaliculata* on the indigenous species *Bellamya purificata* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2021, 56(5): 663-673.
- [4] 殷颖璇,吴银娟,何晴,等. 我国主要螺类生物入侵的现状、危害及防治对策[J]. *中国媒介生物学及控制杂志*, 2022, 33(2): 305-312.
- [5] YIN Y X, WU Y J, HE Q, et al. Status, hazards, and control strategy of primary invasive snails in China [J]. *Chinese Journal of Vector Biology and Control*, 2022, 33(2): 305-312.
- [4] 徐宗学,武玮,殷旭旺. 渭河流域水生生态系统群落结构特征及其健康评价[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(1): 23-30.
- [5] XU Z X, WU W, YIN X W. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe Basin, China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(1): 23-30.
- [5] 何为,房景辉,梁博,等. 双齿围沙蚕对潮汐更替的行为响应[J]. *海洋学报*, 2022, 44(10): 119-126.

- HE W, FANG J H, LIANG B, et al. Behavioral response to tidal replacement of *Perinereis aibuhitensis* Grube [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2022, 44(10): 119-126.
- [6] MARTÍNEZ-ÁLVAREZ R M, MORALES A E, SANZ A. Antioxidant defenses in fish: biotic and abiotic factors [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2005, 15 (1/2): 75-88.
- [7] SAMI A, SHAH F A, ABDULLAH M, et al. Melatonin mitigates cadmium and aluminium toxicity through modulation of antioxidant potential in *Brassica napus* L [J]. *Plant Biology*, 2020, 22(4): 679-690.
- [8] LIU X L, XI Q Y, YANG L, et al. The effect of dietary *Panax ginseng* polysaccharide extract on the immune responses in white shrimp, *Litopenaeus vannamei* [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2011, 30(2): 495-500.
- [9] 亢玉静, 郎明远, 赵文. 水生生物体内抗氧化酶及其影响因素研究进展 [J]. *微生物学杂志*, 2013, 33(3): 75-80.
- KANG Y J, LANG M Y, ZHAO W. Advance in antioxidant enzymes and its effect factors in aquatic organisms [J]. *Journal of Microbiology*, 2013, 33(3): 75-80.
- [10] 江天棋. 厚壳贻贝对高温和低氧胁迫的生理生化响应研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2020.
- JIANG T Q. Study on physiological and biochemical responses of *Mytilus coruscus* to heat and hypoxia stress [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020.
- [11] 周小壮. 环境胁迫对凡纳滨对虾行为和生理活动的影响 [D]. 广州: 暨南大学, 2005.
- ZHOU X Z. The effects of environmental stress on behavior and physiological activity of *Litopenaeus vannamei* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2005.
- [12] 苗珍. 河蟹池塘溶解氧监测及低氧胁迫应答机制研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- MIAO Z. Dissolved oxygen monitoring in pond and hypoxic stress response mechanism of *Eriocheir sinensis* [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [13] 丁小, 赵云龙, 李艳娇, 等. 急性温度胁迫对花鳃抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响 [J]. *江西水产科技*, 2021(6): 14-17.
- DING X, ZHAO Y L, LI Y J, et al. The effect of acute temperature stress on the activity of antioxidant enzymes and the content of Malondialdehyde in Flowering Loach [J]. *Jiangxi Fishery Science and Technology*, 2021 (6): 14-17.
- [14] 薛毓才, 高逸鸣, 黄旭雄. 不同温度下锯齿新米虾对低溶解氧胁迫的耐受能力及生理响应 [J]. *中国水产科学*, 2022, 29(5): 673-683.
- XUE Y C, GAO Y M, HUANG X X. Tolerance and physiological response to hypoxia in *Neocaridina denticulata* under different temperatures [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(5): 673-683.
- [15] 李新宇. 蜜蜂对高温、高湿胁迫的生理响应及分子机制研究 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2020.
- LI X Y. Study on physiological response and molecular mechanism of bees to high temperature and high humidity stress [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [16] 陈炼, 邬婷, 陈燊, 等. 温度对福寿螺抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响 [J]. *动物学杂志*, 2019, 54(5): 727-735.
- CHEN L, WU T, CHEN J, et al. Effects of temperature stress on Antioxidase activity and Malondialdehyde in *Pomacea canaliculata* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2019, 54(5): 727-735.
- [17] 曹尚美. 虎杖及白藜芦醇对药物肾损伤 Sirt1/SOD/MDA 的影响 [D]. 广州: 广州中医药大学, 2021.
- CAO S M. Effect of *Reynoutria japonic* and resveratrol on Sirt1/SOD/MDA of drug-induced renal injury [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2021.
- [18] 王蝉娟, 徐成龙, 马俊, 等. 蓖麻籽提取液对福寿螺毒杀效果及作用机制 [J]. *水生生物学报*, 2021, 45(2): 284-291.
- WANG C J, XU C L, MA J, et al. Toxicity of *Ricinus communis* seed extract and its mechanism on *Pomacea canaliculata* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45 (2): 284-291.
- [19] 宋苏蒙. 低温对玉米种子萌发及生理生化指标的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- SONG S M. Effects of low temperature on seed germination and physiological and biochemical indexes of maize [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [20] 林恒宗, 高加龙, 梁志源, 等. 冷胁迫方式对太平洋牡蛎无水保活期氧化应激及能量消耗的影响 [J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(2): 95-103.
- LIN H Z, GAO J L, LIANG Z Y, et al. Effect of cold stress methods on antioxidant and energy metabolism of *Crassostrea gigas* in water-free live storage period [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(2): 95-103.
- [21] 韩懿颖. 中国南北过渡带分区及其地域分异研究 [D]. 信阳: 信阳师范学院, 2022.
- HAN Y Y. Research on the division of China's North-South transitional zone and its regional differentiation [D]. Xinyang: Xinyang Normal University, 2022.
- [22] 周宇, 袁雪颖, 杨子轩, 等. 福寿螺入侵中国的扩散动态及潜在分布 [J]. *湖泊科学*, 2018, 30(5): 1379-1387.
- ZHOU Y, YUAN X Y, YANG Z X, et al. Spread pattern and potential distribution of the invasive species *Pomacea* spp. in China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30 (5): 1379-1387.
- [23] SEUFFERT M E, MARTÍN P R. Distribution of the apple

- snail *Pomacea canaliculata* in Pampean streams (Argentina) at different spatial scales [J]. *Limnologia*, 2013, 43(2): 91-99.
- [24] 章文, 刘丙军, 辛彦博, 等. 珠江河口区盐度变化周期特征分析——以磨刀门水道为例[J]. *热带地理*, 2013, 33(1): 28-33.
- ZHANG W, LIU B J, XIN Y B, et al. Analysis of the characters of saltwater intrusion in the pearl river estuary based on salinity data of Modaomen waterway [J]. *Tropical Geography*, 2013, 33(1): 28-33.
- [25] 陈晴. 近期长江河口河势变化对盐水入侵的影响和保障淡水资源利用措施[D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- CHEN Q. The influence of recent river regime changes on saltwater intrusion and measures to ensure the utilization of freshwater resources in the Yangtze River Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2021.
- [26] 刘艳斌, 韩微, 贤振华. 温度对福寿螺生长发育及摄食的影响[J]. *南方农业学报*, 2011, 42(8): 901-905.
- LIU Y B, HAN W, XIAN Z H. Effect of different temperatures on growth, development and feeding of *Pomacea canaliculata* [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2011, 42(8): 901-905.
- [27] 范靖宇, 巫鹏翔, 张润志. 福寿螺在北京地区的适生性分析[J]. *陆地生态系统与保护学报*, 2021, 1(2): 87-91.
- FAN J Y, WU P X, ZHANG R Z. Suitability analysis of *Pomacea canaliculata* Lamarck in Beijing [J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2021, 1(2): 87-91.

Effects of environmental stress on the activities of antioxidant enzymes and malondialdehyde content in hepatopancreas of apple snails

LU Haolei¹, LU Xian¹, ZHAO Zhimiao¹, HAN Haoyu¹, WU Hao², ZHANG Yinjiang¹

(1. Shanghai Ocean University, College of Marine Ecology and Environment, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Qingpu District Aquatic Technology Promotion Station, Shanghai 201700, China)

Abstract: In this paper, the changes of superoxide dismutase (SOD) activity and malondialdehyde (MDA) content in hepatopancreas of *Pomacea canaliculata* in Guangzhou, Shanghai and Chengdu under different temperature, salinity and dissolved oxygen environmental stresses were studied to clarify the mechanism of environmental stress on the physiology of *Pomacea canaliculata*. The experimental results showed that under the stress of temperature, dissolved oxygen and salinity, the SOD activity and MDA content of the hepatopancreas of the snails increased first and then decreased, and reached the maximum value at 24 h~48 h, and returned to the initial level at 72 h. Under the combined temperature-salinity stress, the SOD activity and MDA content in the hepatopancreas of the snails were higher than those under the single factor stress, and the temperature and salinity showed a synergistic effect. Under single or complex stress, SOD activity and MDA content in liver and pancreas of the snails varied from region to region.

Key words: apple snail; environmental stress; superoxide dismutase; malondialdehyde; intrusion risk