

洗涤剂主成分LAS和AEO对软珊瑚氧化 应激水平的影响

陆 昊^{1,2}, 刘红岩³, 黄秀铭³, 王沛政⁴,
李卫东¹, 顾志峰²

(1.海南大学 生态与环境学院, 海南 海口 570228; 2.海南大学 海洋学院, 海南 海口 570228; 3.海南热带
海洋学院 水产与生命学院, 海南 三亚 572022; 4.海南热带海洋学院 生态与环境学院, 海南 三亚
572022)

摘 要:浅水珊瑚受到海岸排放污水中日益增加的洗涤剂的威胁。本文旨在探究洗涤剂主成分线性十二烷基苯磺酸钠 (LAS) 和脂肪醇聚氧乙烯醚 (AEO) 对近海软珊瑚的影响, 实验将肉芝软珊瑚 (*Sarcophyton trocheliophorum*) 与小棒短指软珊瑚 (*Sinularia microclavata*) 急性暴露于不同浓度的 LAS 和 AEO 环境中, 测定在此过程中的叶绿素含量以及部分关键酶的活性变化。结果显示: LAS 环境胁迫下, 珊瑚 Chl *a* 含量在高浓度 LAS 环境下显著升高, 不同 LAS 浓度下两种软珊瑚的 SOD 与 CAT 活性均显著升高, GST 与 AKP 活性受 LAS 环境影响不明显。AEO 环境胁迫下, 两种软珊瑚的 CAT 活性均显著升高, 高浓度的 AEO 环境对两种软珊瑚的叶绿素含量与 GST 活性影响显著。说明 LAS 与 AEO 对两种软珊瑚抗氧化功能产生影响, 本实验为研究洗涤剂对珊瑚礁的影响提供数据支持。

关键词:洗涤剂; 肉芝软珊瑚; 小棒短指软珊瑚; 叶绿素; 酶活性

中图分类号: Q178.53

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)01-0133-06

Effect of main components of detergent on oxidative stress in soft corals

LU Hao^{1,2}, LIU Hong-yan³, HUANG Xiu-ming³, WANG Pei-zheng⁴,
LI Wei-dong¹, GU Zhi-feng²

(1.College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China; 2.College of Ocean, Hainan University, Haikou 570228, China; 3.College of Fisheries and Life Science, Hainan Tropical marine university, Sanya 572022, China; 4.College of Ecology and Environment, Hainan Tropical marine university, Sanya 572022, China)

Abstract: Shallow corals are threatened by the increasing detergents in coastal discharges. To investigate the effects of detergent main component linear alkylbenzene sulfonates (LAS) and fatty alcohol polyoxyethylene ether (AEO) on shallow soft corals. *Sarcophyton trocheliophorum* and *Sinularia microclavata* were exposed to different concentrations of LAS and AEO environment for 8 hours, and chlorophyll content, and the activity of some key enzymes were determined. The results showed that the chlorophyll *a* content of corals increased

收稿日期: 2019-11-20, 修订日期: 2020-01-04

基金项目: 2016 年海南省重大科技计划项目 (ZDKJ2016009-03); 2019 年海南省科学技术厅重点研究开发计划项目 (ZDYF2019154)

作者简介: 陆 昊 (1994—), 男, 江苏宜兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋生物分子生物学, E-mail: 836879118@qq.com

通讯作者: 李卫东, 男, 研究员, 研究方向为海洋生态学、海洋生物学, E-mail: 542148880@qq.com

顾志峰, 男, 教授, 研究方向为水产养殖, E-mail: hnugu@qq.com

significantly under high concentration of LAS, and the activities of SOD and CAT of the two soft corals increased significantly under different LAS concentrations. The activities of GST and AKP were not significantly affected by LAS environment. Under AEO environment stress, the CAT activity of the two soft corals increased significantly, and the high concentration of AEO environment had a significant effect on the chlorophyll content and GST activity of the two soft corals. This experiment provides data support for the study of the effects of detergents on coral reefs.

Key words: detergent; *Sarcophyton trocheliophorum*; *Sinularia microclavata*; chlorophyll; enzymatic activity

珊瑚礁是世界上最具生物生产力和多样性的生态系统之一,是热带和亚热带地区海洋渔业和旅游业的基础^[1]。这个脆弱的生态系统不仅受到全球气候变化的影响^[2],同时也遭受着生活污水、工业废水排放等人类活动^[3-4]的侵害。近年来随着沿海地区人口增长与工业的发展,越来越多的清洁产品,如家用清洁剂与表面活性剂随着地表径流或污水排放被释放到海洋环境中^[5]。Clara 等指出在污水大规模排放几小时后,近岸海水中洗涤剂的浓度可达到 5 mg/L^[6]。珊瑚群落因为生活在浅水或潮间带,受洗涤剂的影响日益增加。

根据表面活性剂的不同,可将洗涤剂分为 3 大类:非离子型、阴离子型和阳离子型,其生物降解程度和生态毒性也存在差异^[7]。阴离子型表面活性剂被广泛用于家用清洁产品中,其中包括线性十二烷基苯磺酸钠(linear alkylbenzene sulfonates, LAS)。Perales 等的研究结果显示, LAS 在海水中的降解时间(T_{50} 值)为(6.67±0.60) d,这个时间约为在陆地降解时间的两倍^[8]。另外,近年来脂肪醇聚氧乙烯醚(fatty alcohol polyoxyethylene ether, AEO)作为一种非离子型表面活性剂也得到广泛的应用^[9]。相关数据显示,生活污水中的 AEO 经过污水处理厂生物降解后仍有 1~23 µg/L 的残留进入环境^[10]。这些表面活性剂在短时间内高浓度的排放可以对水中生物产生毒理作用,如丁诗华等在研究中证实 LAS 会对草鱼的抗氧化功能产生影响^[11]。Bakirel 也指出,暴露在 LAS 环境后,虹鳟鱼的呼吸效率及溶酶体活性会受到抑制,其生长速率也会受到影响^[12]。洗涤剂不光对动物生理产生影响,也有证据证明高浓度洗涤剂对藻类的光合作用也存在抑制作用^[13]。

氧化还原系统是珊瑚识别和清除病原生物

或物质的重要防御系统,环境的改变可使珊瑚氧化还原系统发生改变^[14]。活性氧(reactive oxygen species, ROS)是珊瑚虫呼吸作用和虫黄藻光合作用共同的副产物^[15]。为了防止氧化损伤,珊瑚宿主和虫黄藻都有独立的抗氧化机制,可将细胞内的活性氧浓度维持在一定的范围内。这些抗氧化机制对珊瑚宿主与虫黄藻维持细胞稳态起到至关重要的作用^[16]。当活性氧浓度超过细胞耐受范围时,细胞能够拥有抗氧化策略解毒活性氧,而超氧化物歧化酶(SOD)-抗坏血酸过氧化物酶(APX)和 SOD-过氧化氢酶(CAT)是真核生物的两种主要酶促抗氧化途径^[17]。谷胱甘肽 S-转移酶(GST)作为关键Ⅱ期代谢酶在所有真核生物解毒过程中发挥了重要作用^[18]。在环境变化后,除抗氧化机制参与珊瑚免疫反应外,碱性磷酸酶(AKP)也参与调节珊瑚细胞稳态^[19]。这些酶活性指标被广泛应用于珊瑚在环境胁迫下的生物标志物^[14,18,20]。

已有的研究发现, LAS 对珊瑚的半致死浓度为 1.99 mg/L^[21],但该研究未从氧化应激水平解释 LAS 对珊瑚的毒理作用。此外,尚未见到有关 AEO 与 LAS 对软珊瑚毒理作用的报道。本研究将三亚常见软珊瑚种肉芝软珊瑚(*Sarcophyton trocheliophorum*)和小棒短指软珊瑚(*Sinularia microclavata*)暴露于不同浓度的 AEO 与 LAS 环境中,研究肉芝软珊瑚和小棒短指软珊瑚在不同浓度的 AEO 与 LAS 环境暴露下的胁迫响应,旨在阐明海洋环境遭受表面活性剂污染后对软珊瑚的影响,为珊瑚礁的生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 珊瑚采集

一株肉芝软珊瑚和一株小棒短指软珊瑚活体

样品均采自西岛珊瑚礁自然保护区(18°14'57" N, 109°22'51" E)。运回实验室后暂养于水族箱(规格为70 cm × 50 cm × 60 cm),暂养条件与晁华等方法一致(水温28℃,盐度34,光暗比12:12,水流循环2 000 L/h)^[22]。暂养一周后,用解剖刀将珊瑚分解成规格为5 cm × 5 cm的小个体,黏附于陶瓷底座后继续暂养2周。

1.2 实验设计

设置对照组、低LAS浓度组(3 mg/L)、高LAS浓度组(5 mg/L)、低AEO浓度组(2 mg/L)和高AEO浓度组(4 mg/L)共5个组。随机挑选触手活力正常的两种珊瑚各3个,分别置于各水族箱中,除处理条件不同外,其他养殖条件与暂养方法一致。参考表面活性剂的降解时间^[8],设置急性应激时间为8 h。实验周期结束后对珊瑚个体采样标号,保存于液氮中备用。

1.3 Chl *a* 含量测定

参照雷新民等^[23]的方法,2 mL组织匀浆液在2 400 r/min、4℃下离心10 min以获取珊瑚共生虫黄藻;用PBS溶液将沉淀重新悬浮,随后在4 500 r/min、4℃下离心30 s;最后用2 mL丙酮在4℃、黑暗条件下萃取24 h。在630 nm、647 nm和663 nm处测定提取液的吸光度值。使用铝箔法^[24]测量珊瑚表面积*S*,使用以下公式计算:

$$\text{Chl } a = (11.85 A_{663} - 1.54 A_{647} - 0.08 A_{630}) / S \quad (1)$$

式中:Chl *a*为珊瑚表面单位面积上的叶绿素*a*含量(μg/cm²);*A*为不同波长下的吸光值;*S*为珊瑚表面积。

1.4 总蛋白含量测定

准确称取组织重量,按重量(g):体积(mL)=1:9比例加入生理盐水后置于冰浴的研钵中迅速研磨成10%的匀浆。随后用冷冻离心机离心(2 500 r/min, 10 min, 4℃),取定量上清液用生理盐水稀释成1%组织匀浆。最后用BCA蛋白浓度测定试剂盒(建成,南京,中国)测定各样本中总蛋白含量(mg/mL)。

1.5 酶活性测定

使用试剂盒(A001、A007、A059和A004,南京建成,中国)测定1%组织匀浆上清液中SOD、CAT、AKP和GST的活性,分别使用公式

计算SOD、CAT和GST的活性,单位统一为U/mg prot, AKP单位为金氏单位/mg prot。

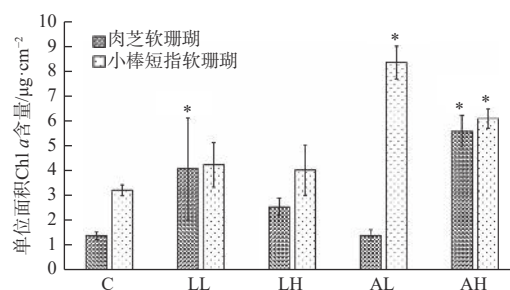
1.6 统计分析

使用SPSS 13.0统计软件对每种珊瑚的不同处理结果进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan多重比较^[14],以 $\alpha=0.05$ 作为差异显著水平,描述性统计值采用平均值±标准误差表示。

2 结果与讨论

2.1 Chl *a* 含量

低浓度LAS胁迫下,肉芝软珊瑚的Chl *a*含量显著升高至(4.12 ± 2.04) μg/cm²,同时LAS未对小棒短指软珊瑚产生显著性影响(见图1)。暴露于不同浓度的AEO环境后,小棒短指软珊瑚的Chl *a*含量显著升高($p < 0.05$),在低、高AEO浓度下分别为(8.36 ± 0.65) μg/cm²和(6.11 ± 0.40) μg/cm²。肉芝软珊瑚Chl *a*含量在高浓度AEO胁迫下显著升高[(5.60 ± 0.63) μg/cm²],在低浓度AEO环境中无显著性变化。



*代表同种珊瑚不同处理组与对照组之间的显著差异($p < 0.05$); C: 对照组; LL: 低浓度LAS组; LH: 高浓度LAS组; AL: 低浓度AEO组; AH: 高浓度AEO组

图1 不同组间珊瑚Chl *a*含量比较

Fig. 1 Comparison of chlorophyll *a* content in corals among different groups

2.2 SOD 活性

LAS环境暴露下,两种软珊瑚的SOD酶活性都受到显著影响(见图2a)。在对照组中,小棒短指软珊瑚SOD酶活性[(62.07 ± 8.50) U/mg prot]显著高于肉芝软珊瑚[(32.83 ± 8.21) U/mg prot] ($p < 0.05$)。暴露于LAS环境后,两种软珊瑚的SOD酶活性显著增加($p < 0.05$)。其中暴露于低浓度LAS环境中的小棒短指软珊瑚SOD活性

最高 $[(232.81 \pm 51.61) \text{ U/mg prot}]$, 暴露于低浓度 LAS 环境中的肉芝软珊瑚 SOD 活性最低 $[(82.14 \pm 21.46) \text{ U/mg prot}]$ 。在 AEO 处理组中, SOD 酶活性表现出种间差异。高、低 AEO 浓度环境均未对肉芝软珊瑚产生显著性影响, 但对小棒短指软珊瑚产生了显著性影响 ($p < 0.05$)。高、低 AEO 浓度下的小棒短指软珊瑚 SOD 活性分别高达 $(179.78 \pm 38.15) \text{ U/mg prot}$ 和 $(208.50 \pm 45.14) \text{ U/mg prot}$ 。

2.3 CAT 活性

高、低浓度的 LAS 和 AEO 环境胁迫对两种软珊瑚的 CAT 活性均有显著性影响 (见图 2b, $p < 0.05$)。无论在对照组或处理组中, 肉芝软珊瑚的 CAT 活性均远高于小棒短指软珊瑚, 并且差异显著 ($p < 0.05$)。暴露于 LAS 环境后, 两种珊瑚的 CAT 活性均显著升高。暴露于高浓度 LAS 环境中的小棒短指软珊瑚 CAT 活性最高 $[(9.38 \pm 2.14) \text{ U/mg prot}]$, 暴露于高浓度 LAS 环境中的肉芝软珊瑚 CAT 活性最低 $[(3.11 \pm 1.17) \text{ U/mg prot}]$ 。AEO 环境中的两种珊瑚 CAT 活性均显著高于对照组 ($p < 0.05$)。其中高浓度环境

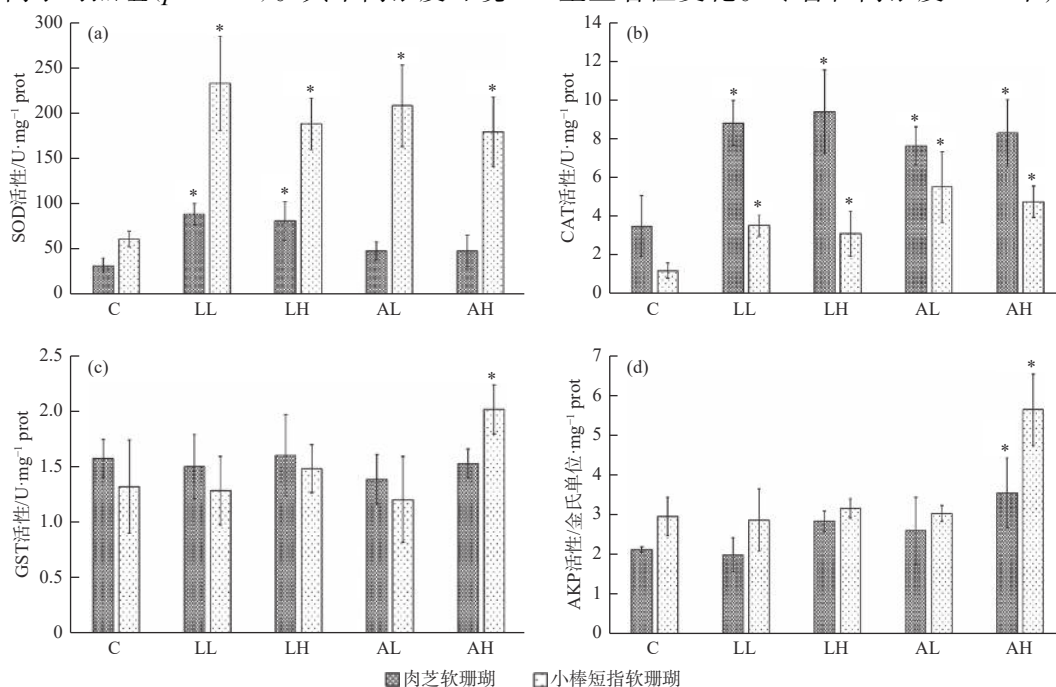
中的肉芝软珊瑚 CAT 活性最高 $[(8.28 \pm 1.72) \text{ U/mg prot}]$, 高浓度 AEO 环境中的小棒短指软珊瑚 CAT 活性最低 $[(4.76 \pm 0.81) \text{ U/mg prot}]$ 。

2.4 GST 活性

在对照组中, 肉芝软珊瑚与小棒短指软珊瑚 GST 活性无显著差异 (图 2c)。暴露于 LAS 环境后, 尽管肉芝软珊瑚个别个体中 GST 活性升高至 1.68 U/mg prot , 但与对照组无显著性差异, 低浓度 LAS 环境或高浓度 LAS 环境都未对两种珊瑚 GST 活性产生显著性影响。在 AEO 处理组中, 高浓度 AEO 对小棒短指软珊瑚 GST 活性产生显著性影响, 暴露于高浓度 AEO 环境中的小棒短指软珊瑚 GST 活性升高至 $(2.02 \pm 0.22) \text{ U/mg prot}$, 并且差异显著 ($p < 0.05$)。AEO 环境未对肉芝软珊瑚的 GST 活性产生显著性影响。

2.5 AKP 活性

无论对照组或是处理组中, 小棒短指软珊瑚的 AKP 活性均高于肉芝软珊瑚 (图 2d)。暴露于低浓度 LAS 环境后两种珊瑚的 AKP 活性未产生显著性变化。尽管在高浓度 LAS 中, 两种珊



*代表同种珊瑚不同处理组与对照组之间的显著差异 ($p < 0.05$); C: 对照组; LL: 低浓度 LAS 组; LH: 高浓度 LAS 组; AL: 低浓度 AEO 组; AH: 高浓度 AEO 组

图2 不同组间珊瑚酶活性比较

Fig. 2 Comparison of enzyme activities in corals among different groups

瑚的 AKP 活性均有升高,但差异并不显著。在添加 AEO 的处理组中,低浓度 AEO 未对珊瑚 AKP 活性产生显著性影响。但高浓度 AEO 环境暴露后,两种珊瑚的 AKP 活性均显著升高 ($p < 0.05$),肉芝软珊瑚与小棒短指软珊瑚 AKP 活性分别升高至 (3.05 ± 0.20) 金氏单位/mg prot 和 (5.65 ± 0.90) 金氏单位/mg prot。

2.6 讨论

随着工业的发展与人们生活水平的提高,大量表面活性剂被排入水体,对水体生物产生严重的影响^[25]。陈昊喆证实纳米 ZnO/十二烷基苯磺酸钠复合物对小球藻的生长具有抑制作用,小球藻生物量随时间增加出现先增后减的趋势^[26]。刘雷等也报道了 0.5 mg/L ~ 5 mg/L 的十二烷基苯磺酸钠对铜绿微囊藻的光合作用具有促进作用,叶绿素含量会在短期内升高^[13]。本实验结果显示, LAS 与 AEO 均能提升珊瑚中 Chl *a* 的含量。雷新明^[23]认为共生藻和叶绿素含量变化是胁迫响应的指示因子,同时他还提出了叶绿素含量的变化滞后于共生藻密度变化的观点。叶绿素含量的升高可能是珊瑚应对环境胁迫的自我调节方式,此现象在众多应激实验中得以证实^[14,18]。

此外,生物的免疫系统是负责识别并清除病原生物或物质的宿主防御系统^[18]。SOD 和 CAT 作为珊瑚氧化还原系统中的主要抗氧化酶^[27],在环境胁迫下对自由基进行清除,这是机体对一些不良环境的适应机制。SOD 是抗氧化防御的第一道防线,能够将细胞中的 O_2^- 转化为水和 H_2O_2 ^[28]。氧化应激是导致 LAS 和 AEO 处理后, SOD 活性显著升高的主要原因。研究表明, CAT 活性在所有的处理组中也有显著性升高。CAT 活性升高可以分解细胞中过量的 H_2O_2 , 从而避免珊瑚宿主和共生藻类受到氧化损伤,将细胞内的活性氧浓度维持在可容忍的范围内^[29]。Limón-Pacheco 在报道中指出 GST 酶在 DNA 和细胞修复过程中扮演了重要角色,高浓度的 AEO 环境导致小棒短指软珊瑚的 GST 活性显著升高,以清除过量的自由基,使机体免受氧化伤害^[30]。有些未得到及时清除的自由基对细胞产生伤害,细胞结构受到一定程度的损伤,这些损伤会加速细胞的衰亡^[31],可能是导致 LAS 环境下珊瑚 GST 活性无

显著性变化的主要原因。因 AKP 与钙化的紧密联系^[32],陆昊等也指出污染物通过珊瑚触手过滤捕食会影响珊瑚的 AKP 活性^[14]。在高浓度 AEO 胁迫下,两种软珊瑚的 AKP 活性均出现显著性升高。AEO 环境胁迫对软珊瑚骨针的影响也将在今后的实验中进行探索。

3 结论

(1)急性 AEO 环境暴露下,小棒短指软珊瑚的 SOD 活性和 GST 活性显著升高,而肉芝软珊瑚无显著变化, AEO 对软珊瑚的影响表现出种间差异性。

(2)急性 LAS 和 AEO 环境暴露下,两种软珊瑚的叶绿素浓度均显著升高,这可能是珊瑚与共生虫黄藻应对环境变化的自主调节机制。

(3)LAS 与 AEO 作为两种广泛使用的洗涤剂主成分,对软珊瑚的抗氧化水平产生显著性影响,过量的氧化应激导致珊瑚细胞损伤甚至白化死亡。因此,规范近海居民生活污水的集中处理、排放应当成为珊瑚礁生态系统保护的重要环节。

参考文献:

- [1] TASHIRO Y, KAMEDA Y. Concentration of organic sun-blocking agents in seawater of beaches and coral reefs of Okinawa Island, Japan[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1/2): 333-340.
- [2] MÉHEUX K, PARKER E. Tourist sector perceptions of natural hazards in Vanuatu and the implications for a small island developing state[J]. *Tourism Management*, 2006, 27(1): 69-85.
- [3] DEGEORGES A, GOREAU T J, REILLY B. Land-sourced pollution with an emphasis on domestic sewage: lessons from the Caribbean and implications for coastal development on Indian Ocean and Pacific coral reefs[J]. *Sustainability*, 2010, 2(9): 2919-2949.
- [4] REOPANICHKUL P, CARTE R W, WORACHANANANT S, et al. Wastewater discharge degrades coastal waters and reef communities in southern Thailand[J]. *Marine Environmental Research*, 2010, 69(5): 287-296.
- [5] RISK M J, SHERWOOD O A, NAIRN R, et al. Tracking the record of sewage discharge off Jeddah, Saudi Arabia, since 1950, using stable isotope records from antipatharians[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 397: 219-226.

- [6] CLARA M, SCHARF S, SCHEFFKNECHT C, et al. Occurrence of selected surfactants in untreated and treated sewage[J]. *Water Research*, 2007, 41(19): 4339-4348.
- [7] LARA-MARTÍN P A, GÓMEZ-PARRA A, GONZÁLEZ-MAZO E, et al. Reactivity and fate of synthetic surfactants in aquatic environments[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2008, 27(8): 684-695.
- [8] PERALES J A, MANZANO M A, GARRIDO M C, et al. Biodegradation kinetics of linear alkylbenzene sulphonates in sea water[J]. *Biodegradation*, 2007, 18(1): 63-70.
- [9] SANDERSON H, VAN COMPERNOLLE R, DYER S D, et al. Occurrence and risk screening of alcohol ethoxylate surfactants in three U.S. river sediments associated with wastewater treatment plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463/464: 600-610.
- [10] EADSFORTH C V, SHERREN A J, SELBY M A, et al. Monitoring of environmental fingerprints of alcohol ethoxylates in Europe and Canada[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64(1): 14-29.
- [11] 丁诗华, 孙翰昌, 陈大庆, 等. 阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)抗氧化功能的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2006, 37(2): 111-117.
- [12] BAKİREL T, KELEŞO, KARATAS S, et al. Effect of Linear Alkylbenzene Sulphonate (LAS) on non-specific defence mechanisms in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquatic Toxicology*, 2005, 71(2): 175-181.
- [13] 刘 雷, 陈莲花, 刘 浩, 等. 十二烷基苯磺酸钠对铜绿微囊藻光合作用的影响[J]. *日用化学工业*, 2008, 38(5): 289-293.
- [14] 陆 昊, 李卫东, 王沛政. 长时间微塑料环境暴露对肉芝软珊瑚的影响[J]. *海洋科学*, 2019, 43(11): 49-55.
- [15] ASADA K. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1999, 50(1): 601-639.
- [16] RICHIER S, FURLA P, PLANTIVAUX A, et al. Symbiosis-induced adaptation to oxidative stress[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2005, 208(2): 277-285.
- [17] HALLIWELL B. Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life[J]. *Plant Physiology*, 2006, 141(2): 312-322.
- [18] TANG J, NI X Z, ZHOU Z, et al. Acute microplastic exposure raises stress response and suppresses detoxification and immune capacities in the scleractinian coral *Pocillopora damicornis*[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 66-74.
- [19] PALMER C V, BYTHELL J C, WILLIS B L. Levels of immunity parameters underpin bleaching and disease susceptibility of reef corals[J]. *The FASEB Journal*, 2010, 24(6): 1935-1946.
- [20] DIAS M, MADEIRA C, JOGEE N, et al. Oxidative stress on scleractinian coral fragments following exposure to high temperature and low salinity[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105586.
- [21] SHAFIR S, HALPERIN I, RINKEVICH B. Toxicology of household detergents to reef corals[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225: 1890.
- [22] 晁 华, 申玉春, 刘 丽. 氮磷对珊瑚过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(17): 12-19.
- [23] 雷新明, 黄 晖, 王华接, 等. 升温胁迫对珊瑚及其共生藻影响的初步研究[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(5): 55-59.
- [24] HIGUCHI T, YUYAMA I, NAKAMURA T. The combined effects of nitrate with high temperature and high light intensity on coral bleaching and antioxidant enzyme activities[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2015, 2: 27-31.
- [25] 吴耀国, 胡思海, 曾 睿, 等. 反硝化条件下十二烷基苯磺酸钠对苯生物降解的影响[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(9): 1075-1080.
- [26] 陈昊喆. 纳米ZnO/十二烷基苯磺酸钠复合污染体系对小球藻生长的影响[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018: 28-32.
- [27] LEVY O, ACHITUV Y, YACOBI Y Z, et al. The impact of spectral composition and light periodicity on the activity of two antioxidant enzymes (SOD and CAT) in the coral *Favia fava*[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, 328(1): 35-46.
- [28] FRIDOVICH I. Superoxide radical and superoxide dismutases[J]. *Annual Review of Biochemistry*, 1995, 64(1): 97-112.
- [29] NII C M, MUSCATINE L. Oxidative stress in the symbiotic sea anemone *Aiptasia pulchella* (Carlgren, 1943): contribution of the animal to superoxide ion production at elevated temperature[J]. *The Biological Bulletin*, 1997, 192(3): 444-456.
- [30] LIMÓN-PACHECO J, GONSEBATT M E. The role of antioxidants and antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2009, 674(1/2): 137-147.
- [31] 杨 帆, 孙翰昌. 直链十二烷基苯磺酸钠对中华倒刺鲃SOD和GSH-Px的活性影响[J]. *淡水渔业*, 2009, 39(5): 71-75.
- [32] 刘 侠, 乐以伦. 碱性磷酸酶与钙化[J]. *中国生物医学工程学报*, 1997, 16(1): 70-88.