

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 11 期 Vol.31 No.11 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 11 期 2011 年 6 月 (半月刊)

目 次

微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应·····	沈菊培, 贺纪正 (2957)
巢湖蓝藻水华形成原因探索及“优势种光合假说”·····	贾晓会, 施定基, 史绵红, 等 (2968)
我国甜菜夜蛾间歇性暴发的非均衡性循环波动·····	文礼章, 张友军, 朱 亮, 等 (2978)
庞泉沟自然保护区华北落叶松林的自组织特征映射网络分类与排序·····	张钦弟, 张金屯, 苏日古嘎, 等 (2990)
上海大莲湖湖滨带湿地的生态修复·····	吴 迪, 岳 峰, 罗祖奎, 等 (2999)
芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量·····	武小钢, 郭晋平, 杨秀云, 等 (3009)
土壤微生物群落结构对中亚热带三种典型阔叶树种凋落物分解过程的响应·····	张圣喜, 陈法霖, 郑 华 (3020)
中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响·····	陈法霖, 郑 华, 阳柏苏, 等 (3027)
桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征·····	刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (3036)
重金属 Cd 胁迫对红树蚬的抗氧化酶、消化酶活性和 MDA 含量的影响·····	赖廷和, 何斌源, 范航清, 等 (3044)
海南霸王岭天然次生林边缘效应下木质藤本与树木的关系·····	乌玉娜, 陶建平, 奚为民, 等 (3054)
半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺·····	杨 磊, 卫 伟, 莫保儒, 等 (3060)
季节性干旱对中亚热带人工林显热和潜热通量日变化的影响·····	贺有为, 王秋兵, 温学发, 等 (3069)
新疆古尔班通古特沙漠南缘多枝桉柳光合作用及水分利用的生态适应性·····	王珊珊, 陈 曦, 王 权, 等 (3082)
利用数字图像估测棉花叶面积指数·····	王方永, 王克如, 李少昆, 等 (3090)
野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应·····	薛忠财, 高辉远, 柳 洁 (3101)
水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态与结构的影响·····	张 均, 贺德先, 段增强 (3110)
应用物种指示值法解析昆崙山植物群落类型和植物多样性·····	孙志强, 张星耀, 朱彦鹏, 等 (3120)
基于 MSIASM 方法的中国省级行政区体外能代谢分析·····	刘 晔, 耿 涌, 赵恒心 (3133)
不同生态区烟草的叶面腺毛基因表达·····	崔 红, 冀 浩, 杨惠娟, 等 (3143)
B 型烟粉虱对 23 种寄主植物适应度的评估和聚类分析·····	安新城, 郭 强, 胡琼波 (3150)
杀虫剂啉虫脒和毒死蜱对捕食蜘蛛血细胞 DNA 的损伤作用·····	李 锐, 李生才, 刘 佳 (3156)
杀真菌剂咪鲜安对蓼花臂尾轮虫的影响·····	李大命, 陆正和, 封 琦, 等 (3163)
长、短期连续孤雌生殖对蓼花臂尾轮虫生活史和遗传特征的影响·····	葛雅丽, 席貽龙 (3170)
专论与综述	
区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展·····	赵 军, 杨 凯, 邵 俊, 等 (3180)
露水对植物的作用效应研究进展·····	叶有华, 彭少麟 (3190)
葡萄座腔菌科研究进展——鉴定, 系统发育学和分子生态学·····	程燕林, 梁 军, 吕 全, 等 (3197)
人工林生产力年龄效应及衰退机理研究进展·····	毛培利, 曹帮华, 田文侠, 等 (3208)
树木年轮在干扰历史重建中的应用·····	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (3215)
植物中逆境反应相关的 WRKY 转录因子研究进展·····	李 冉, 娄永根 (3223)
研究简报	
三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量·····	任佐华, 张于光, 李迪强, 等 (3232)
3 种黑杨无性系水分利用效率差异性分析及相关 <i>ERECTA</i> 基因的克隆与表达·····	郭 鹏, 夏新莉, 尹伟伦 (3239)
猕猴桃园节肢动物群落重建及主要类群的生态位·····	杜 超, 赵惠燕, 高欢欢, 等 (3246)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 298 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-06	



封面图说: 盘锦市盘山县水稻田——盘锦市位于辽宁省西南部, 自古就有“鱼米之乡”的美称。这里地处温带大陆半湿润季风气候, 有适宜的温度条件和较长的生长期以供水稻生长发育, 农业以种植水稻为主, 年出口大米达 1 亿多公斤, 是国家级水稻高产创建示范区和重要的水稻产区。

彩图提供: 沈菊培博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: jpshe@reccs.ac.cn

重金属 Cd 胁迫对红树蚬的抗氧化酶、 消化酶活性和 MDA 含量的影响

赖廷和¹, 何斌源^{1,2}, 范航清^{1,2,*}, 周如琼^{3,1}, 杨 艳^{3,1}

(1. 广西科学院广西红树林研究中心, 广西北海 536007; 2. 广西红树林保护重点实验室, 广西北海 536007;

3. 广西大学林学院, 广西南宁 530000)

摘要: 在实验室条件下, 观测不同 Cd 胁迫处理(时间和水平)对红树蚬(*Geloina coxans* (Gmelin))的胃组织中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量, 及淀粉酶、脂肪酶和蛋白酶等 3 种消化酶活性的影响效应。结果表明, 高浓度组(4.00 mg/L 和 8.00 mg/L)在较短的暴露时间即出现 SOD 活性显著诱导, 而低浓度组则需要更长的暴露时间。所有处理组的 CAT 活性均先受诱导而后抑制, 但去除胁迫后低浓度组活性上升, 高浓度组则持续下降。低浓度处理组在胁迫初期 MDA 含量上升, 但随后下降至较低水平; 高浓度处理组 MDA 含量上升稍为滞后, 但随后上升至较高水平。在消化酶方面, Cd 对红树蚬胃组织淀粉酶的影响基本上表现为抑制; 在胁迫初期脂肪酶活性受到显著诱导, 随着胁迫时间延长酶活性则下降, 同时胁迫解除后不同程度恢复; 对蛋白酶的影响效应规律性不明显。显著的效应-剂量间相关关系存在于特定时间的 SOD 活性(1d), CAT、淀粉酶活性和 MDA 含量(7d 和恢复 6d)。探讨了这些指标作为生物标记物应用于监测海洋重金属污染的可能性。

关键词: 红树林; 红树蚬; Cd 胁迫; 消化酶; 抗氧化酶; 脂质过氧化

Effects of cadmium stress on the activities of antioxidant enzymes, digestive enzymes and the membrane lipid peroxidation of the mangrove mud clam *Geloina coxans* (Gmelin)

LAI Tinghe¹, HE Binyuan^{1,2}, FAN Hangqing^{1,2,*}, ZHOU Ruqiong^{3,1}, YANG Yan^{3,1}

1 Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai 536007, China

2 Guangxi Key Laboratory of Mangrove Protection, Beihai 536007, China

3 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530000, China

Abstract: Due to the increasing discharge of pollutants into mangrove wetlands in China, a trend of heavy metal pollution has been becoming more and more widely and intensively. The mangrove mud clam *Geloina coxans* (Gmelin, 1791) is a dominant macrobenthos of mangrove wetlands, and serves as common seafood in the South China coast. Owing to its wide distribution, large body size and high abundance, the mangrove mud clam would act as a potential indicator of marine heavy metal pollution.

In this study, the effects of Cd stresses (level×exposure time) on the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), amylase, lipase and proteinases and malondialdehyde (MDA) content in the stomach tissues of the mangrove mud clams were studied under hydrological culture. Eight Cd levels, i. e. 0, 0.125, 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00 and 8.00 mg/L were chosen. The stomach tissues of the mangrove mud clams were sampled on 0 d (the beginning day), 1d, 3d and 7d, and Cd-release 6d respectively.

The results showed that the SOD activities in the stomach tissues of the mangrove mud clams were induced rapidly after

基金项目: 国家自然科学基金(4067050); 广西北部湾基础研究重大专项(2010GXNSFE013002); 广西科技攻关项目(桂科攻 0895004-1; 0992026-1)

收稿日期: 2010-04-19; **修订日期:** 2010-11-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanhq666@126.com

exposure to higher levels of Cd (4.00 mg/L and 8.00 mg/L), while it needed longer time to induce the enzyme under lower Cd level. The CAT activities in all treatments were induced once exposure to Cd but inhibited with the prolonging of the exposure time. Stress-release experiments showed that these inhibition effects on the CAT activities could be reversed only under the lower levels of Cd exposure. MDA content increased once exposure to the low levels of Cd and then decreased with the prolonging of exposure time. However, under the high levels of Cd stresses, MDA contents increased with the exposure time and maintained at higher level even after the stress was released. Cd exposure had an inhibitory effect on the activities of the amylase. Significant induction of the lipase by Cd occurred at the early time of the exposure, especially under the lower levels of Cd treatments; however, this induction effect vanished and the lipase activity decreased with the prolonging of Cd stress, and returned to higher level after the stress was released. The effects of Cd stress on proteinase activity varied disorderly. These results showed that the effects of Cd exposure on the stomach tissues of the mangrove mud clam differed through the course of the experiment. Whether it would be promotion or inhibition depended on the given indexes, exposure time and Cd levels.

Our results indicated that the mangrove mud clam could be suitable for an indicator organism because some significant effect-dosage relationships occurred. When the clams were exposed to Cd stress for 1d, the SOD activity responded regularly to the stress level, however, this regular effect didn't repeat as the stress time prolonged. As to the activities of CAT and amylase and the content of MDA, the regular effects occurred on the later stage of Cd exposure. Therefore, these four biochemical indexes would be complementary if they were applied to the cadmium monitoring together, but CAT and MDA would be more practicable than others.

Key Words: mangrove; mud clam *Geloina coxans* (Gmelin); cadmium stress; digestive enzyme; antioxidant enzyme; lipid peroxidation

近年来我国沿海地区大量工农业污染物向海域排放,对海洋生物尤其是对环境毒物具有较强富集能力的贝类的生长和繁衍构成严重威胁,相应的食品安全问题堪忧。红树林湿地处于人类活动最为活跃的海陆过渡带,人为扰动日益严重。红树林湿地在吸收和分解有机污染物、降低重金属毒性等方面有着强大的潜力^[1-3],成为寻找解决排污新途径的充分背景^[4-7]。但同时令人担忧,局部红树林湿地的重金属污染有加重的趋势^[8]。加强红树林湿地污染监测是维持我国东南沿海生态系统生态安全和持续发展的重要保障途径之一。

红树蚬(*Geloina coxans* (Gmelin))是蚬科(Corbiculidae)双壳贝类,广泛分布于亚洲的热带、亚热带沿海,栖息于河口潮间带滩涂,尤以红树林中数量最多^[6,9]。红树蚬是河口红树林生境大型底栖动物群落中具有较重要作用的关键种之一,同时也是红树林滩涂渔业的主要对象,但目前该物种的生理生态学研究几近空白。由于红树蚬分布很广、体型较大、数量较多,使之有可能成为滨海湿地生物监测的指示生物。本文设置了8个Cd浓度的处理组,观测胁迫条件下红树蚬在消化和抗氧化功能方面的响应变化,初步探讨重金属Cd对红树蚬的毒理机制,目的为滨海湿地生物监测的指示生物种类和生物标记物指标选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验动物及其饲养

红树蚬于2009年8月在广西北仑河口红树林保护区的生态养殖基地泥质滩涂采集,选择大小相近的个体用于试验。经测定供试红树蚬个体鲜重为 (29.32 ± 2.14) g/个体,壳高 (43.9 ± 3.6) mm,壳长 (46.3 ± 2.7) mm。

试验用水为经脱脂棉二次过滤的自然海水,海水盐度 15 ± 1 , pH 7.8,水质符合渔业水质标准(GB11607—1989)。试验在室内进行,试验期间气温为23—28℃。用长宽高分别为60、40cm和20cm的长方形塑料托盘为试验容器,每容器注入海水30L,放养红树蚬30个。供试红树蚬在过滤海水中静养6d后开始胁迫试验。试验期间持续充氧,每次取样后换水并投喂扁藻(*Platymonas* sp.)。

1.2 试验方法

1.2.1 胁迫处理

根据急性毒性试验结果,本文按等比等级设置了 Cd 离子浓度 0、0.125、0.25、0.50、1.00、2.00、4.00 mg/L 和 8.00 mg/L 等 8 个处理组,每处理组均设 2 个平行样,30 个红树蚬放入同一个装有 30L 过滤海水的容器为 1 个平行样。Cd 离子来源采用分析纯 CdO,先配制成 1000 mg/L 母液,再稀释至各设置试验浓度。

1.2.2 消化酶和抗氧化功能测定指标和方法

在胁迫试验的 0、1、3、7d 和消除胁迫后 6d (R6d) 共 5 次采样,每个处理组每次取 5 个贝进行单个检测 ($n=5$)。将红树蚬置于冰盘上尽快剖开,取出胃和消化盲囊(下文称胃组织),并去除多余的组织块,作为制备酶液的样品。每克胃组织样品用预冷双蒸水 3mL 混合,匀浆 5min,匀浆皿外置碎冰降低温度。匀浆液倒入离心管中,0℃下 20000 r/min 离心 20 min,取上清液(粗酶液)测定红树蚬胃组织的消化酶和抗氧化功能指标,每样品测定重复 3 次。

消化酶测定指标有淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶活性。抗氧化功能测定指标选用超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(CAT)活性及过氧化代谢产物丙二醛(MDA)含量。参照蒋传葵等^[10]、施特尔马赫^[11]的方法,蛋白酶活性采用福林-酚法测定;脂肪酶活性测定采用稀 NaOH 溶液滴定测量反应产物中脂肪酸的酸价法,以聚乙烯醇橄榄油乳液为底物;淀粉酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)显色法;SOD 测定采用黄嘌呤氧化酶-NBT 法;CAT 采用紫外分光法测定;酶提液的蛋白浓度采用福林-酚法测定。MDA 测定采用改进硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[12]。

1.3 数据处理

不同处理组数据的差异均应用 SPSS 软件进行计算和分析。采用单因素方差分析进行显著性检验, $P<0.05$ 认为存在显著性差异, $P<0.01$ 认为存在极显著差异。采用“标记字母法”显示显著性检验结果。

2 结果

2.1 Cd 胁迫对红树蚬胃组织 SOD 活性的影响效应与时间及剂量关系

从图 1 可看出,在胁迫的第 1 天,相比于对照组,除 0.125mg/L 外其他 6 个处理组的红树蚬胃组织 SOD 活性受到显著诱导($P<0.05$)。在 0.125、0.25 mg/L 和 0.50 mg/L 等 3 个低浓度处理组,SOD 活性随胁迫时间延长而上升,在 7d 达到最高值,经过去除胁迫静养,SOD 活性下降。但在高浓度处理组则相反,表现为先诱导后抑制,最高值出现很早,尤其是在 4 mg/L 和 8mg/L 处理组,最高值出现在 1d,其后则持续下降,在消除胁迫

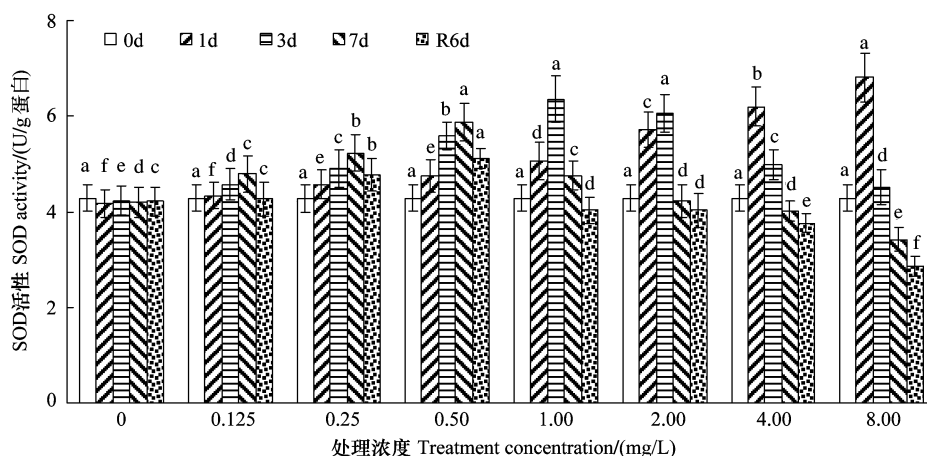


图 1 在胁迫和恢复期间不同 Cd 浓度下红树蚬胃组织中 SOD 活性变化

Fig. 1 SOD activity in the stomach tissue of clam *Geloina coxans* at the beginning day (0d), the cadmium-treated days (1d, 3d and 7d), and six days after the recovery (R6d) respectively

同一天测定的数据上标的不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著 ($n=5$)

迫之后显著低于试验前的水平($P<0.01$)。

观察特定时间的效应-剂量关系,可以看到 SOD 活性随 Cd 浓度单调上升的现象仅在 1d 测定时出现, SOD 活性与剂量浓度之间存在正相关关系($P<0.001$)。在其他时间不存在正相关关系,中等浓度胁迫对 SOD 活性的诱导效果最强,最高值出现在 0.50 mg/L 或 1.00 mg/L 处理组。

2.2 Cd 胁迫对红树蚬胃组织 CAT 活性的影响效应与时间及剂量关系

在胁迫 1d 时红树蚬胃组织中 CAT 活性均受到不同程度的诱导,低浓度处理组受诱导程度比高浓度处理组更为显著(图 2),随之均受到抑制,活性下降。在恢复阶段表现出显著不同的响应,低浓度处理组 CAT 活性在去除胁迫静养之后略微上升,与对照组差异不显著($P>0.05$),高浓度处理组则活性持续下降。

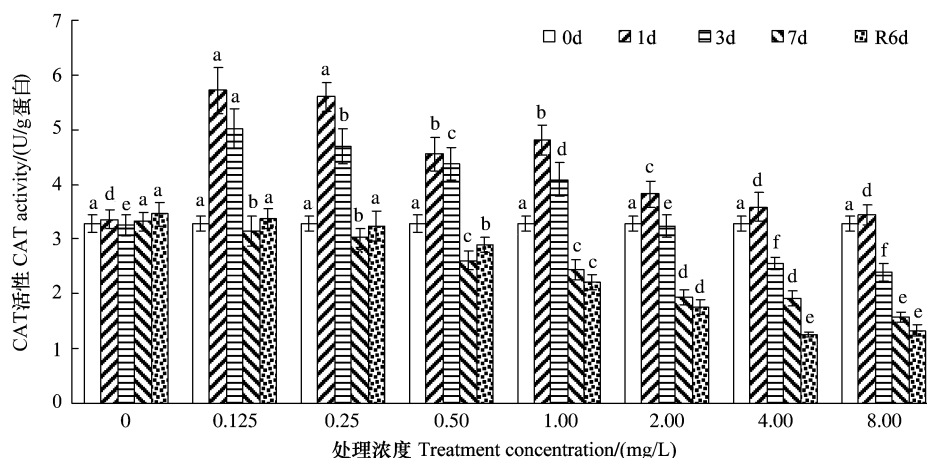


图 2 在胁迫和恢复期间不同 Cd 浓度下红树蚬胃组织中 CAT 活性变化

Fig. 2 CAT activity in the stomach tissue of clam *Geloina coxans* on the beginning day (0d), the cadmium-treated days (1d, 3d and 7d), and six days after the recovery (R6d) respectively

同一天测定的数据上标的不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著($n=5$)

在胁迫后期 7d 和去除胁迫静养 6d 时,红树蚬胃组织 CAT 活性与剂量浓度存在显著负相关关系($P<0.01$)。在胁迫初期的 1d 和 3d,效应-剂量关系规律与后期不同,0.125mg/L 和 0.25mg/L 处理组显著地高于对照组及其他处理组($P<0.01$)。

2.3 Cd 胁迫对红树蚬胃组织 MDA 含量的影响效应与时间及剂量关系

从图 3 可看出,MDA 含量变化在不同的剂量浓度区间表现出不同的规律;在 1.00 mg/L 及以下的处理组,MDA 含量很快(1d)达到最大值,随后下降,去除胁迫静养 6d 后仍不同程度地高于对照组。在 2、4、8 mg/L 这 3 个高浓度处理组则较为单调,在整个胁迫过程 MDA 含量持续上升,去除胁迫静养 6d 后升至较高水平。

观察某一监测时间的效应-剂量关系,可发现红树蚬胃组织的 MDA 含量在 7d 和恢复 R6d 时,均表现出随 Cd 浓度呈上升趋势,MDA 含量与剂量浓度存在显著正相关关系($P<0.01$)。而在初期效应-剂量关系规律与后期不一致,在 1d 和 3d 时分别以 0.50 mg/L 和 4.00mg/L 处理组 MDA 含量最大。

2.4 Cd 胁迫对红树蚬胃组织淀粉酶活性的影响效应与时间及剂量关系

Cd 对红树蚬胃组织淀粉酶活性的影响基本上表现为抑制(图 5)。0.125 mg/L 处理组在 1d 时淀粉酶活性受到诱导,随后小幅度地降低,但与对照组无显著差异($P>0.05$)。高于 0.125mg/L 的处理组酶活性均比 0d 时有较大幅度下降,显著低于同时期的对照组($P<0.01$),在去除胁迫 6d 后均未能恢复原有水平;尤其是 8.00 mg/L 处理组,酶活性持续下降。

观察 7d 和恢复 R6d 这 2 个时间的效应-剂量关系,可发现红树蚬胃组织的淀粉酶活性均随 Cd 浓度呈线性下降的趋势,淀粉酶活性与剂量浓度存在显著负相关关系($P<0.05$)。在初期的效应-剂量关系规律与后期有一些差异,在 1d 和 3d 时均以 0.125mg/L 处理组淀粉酶活性稍高于对照组及其他处理组。

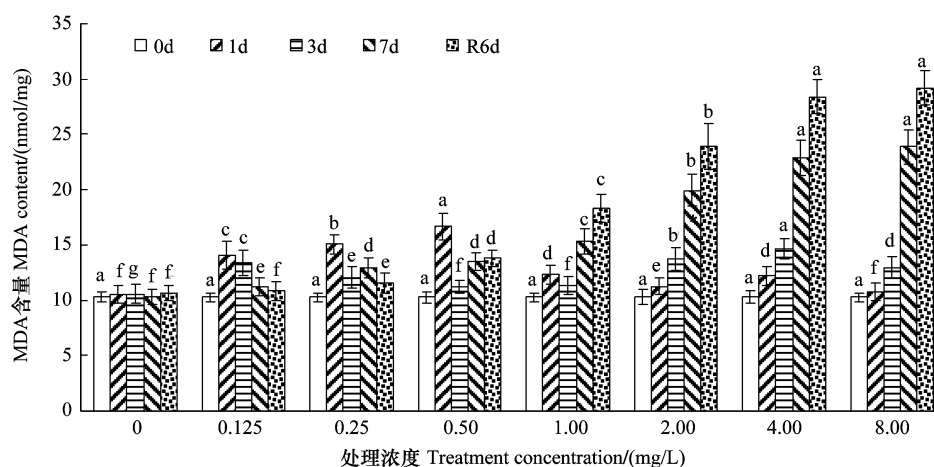


图3 在胁迫和恢复期间不同 Cd 浓度下红树蚬胃组织中 MDA 含量变化

Fig. 3 MDA content in the stomach tissue of clam *Geloina coxans* at the beginning day (0d), the cadmium-treated days (1d, 3d and 7d), and six days after the recovery (R6d) respectively

同一天测定的数据上标的不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著 ($n=5$)

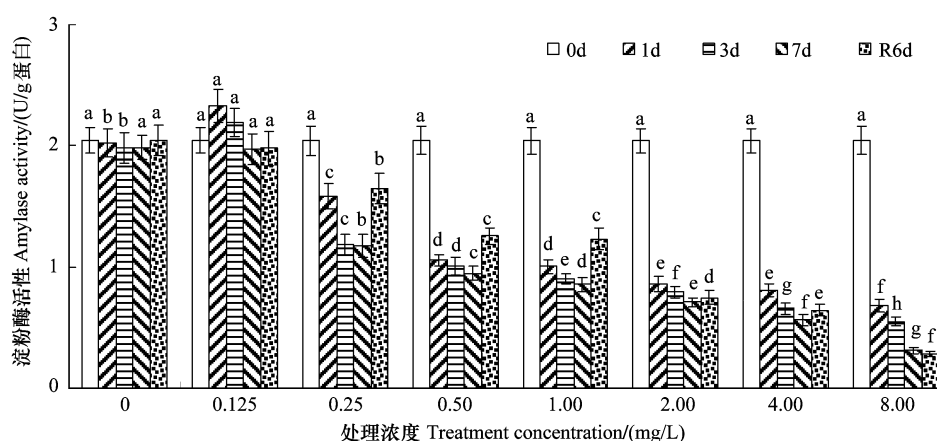


图4 在胁迫和恢复期间不同 Cd 浓度下红树蚬胃组织中淀粉酶活性变化

Fig. 4 Amylase activity in the stomach tissue of clam *Geloina coxans* at the beginning day (0d), the cadmium-treated days (1d, 3d and 7d), and six days after the recovery (R6d) respectively

同一天测定的数据上标的不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著 ($n=5$)

2.5 Cd 胁迫对红树蚬胃组织脂肪酶活性的影响效应与时间及剂量关系

在试验初期 Cd 对脂肪酶活性起着显著的促进作用 (图 1), 尤其是 0.125、0.25、0.50 mg/L 这 3 个处理组, 1d 时脂肪酶活性被显著诱导, 比对照组分别高出 4.1、3.3 和 1.6 倍。随着胁迫时间延长, 各处理组脂肪酶活性则下降, 在 7d 时除 0.125 mg/L 处理组外其他组的脂肪酶活性均显著低于对照组 ($P<0.01$); 但去除胁迫 6d 后均活性上升, 比同期对照组高出 62.4% 至 141.2%。Cd 对脂肪酶的效应与剂量关系方面, 在 3 个胁迫和恢复 6d 的测定时间均观察不到线性趋势。

2.6 Cd 胁迫对红树蚬胃组织蛋白酶活性的影响效应与时间及剂量关系

Cd 对蛋白酶的效应与时间关系规律性不明显 (图 6)。在 0.125 mg/L 和 0.25 mg/L 处理组, Cd 的影响呈现为先诱导后抑制再诱导的过程; 0.50 mg/L 和 1.00 mg/L 处理组则表现为持续的诱导, 这 4 个处理组在去除胁迫静养 6d 后活性下降, 但显著高于对照组 ($P<0.05$); 4.00 mg/L 和 8.00 mg/L 处理组则先受到抑制再上升, 恢复 6d 后活性下降, 但显著低于对照组 ($P<0.05$)。在 Cd 对蛋白酶的效应与剂量关系方面, 没有观察

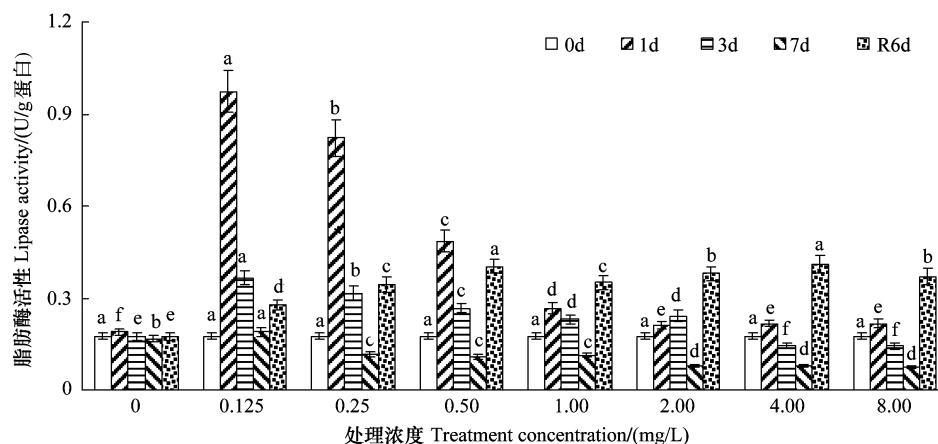


图5 在胁迫和恢复期间不同 Cd 浓度下红树蚬胃组织中脂肪酶活性变化

Fig. 5 Lipase activity in the stomach tissue of clam *Geloina coxans* at the beginning day (0d), the cadmium-treated days (1d, 3d and 7d), and six days after the recovery (R6d) respectively

同一天测定的数据上标的不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著 ($n=5$)

到任何时间的效应-剂量关系呈现出线性关系。

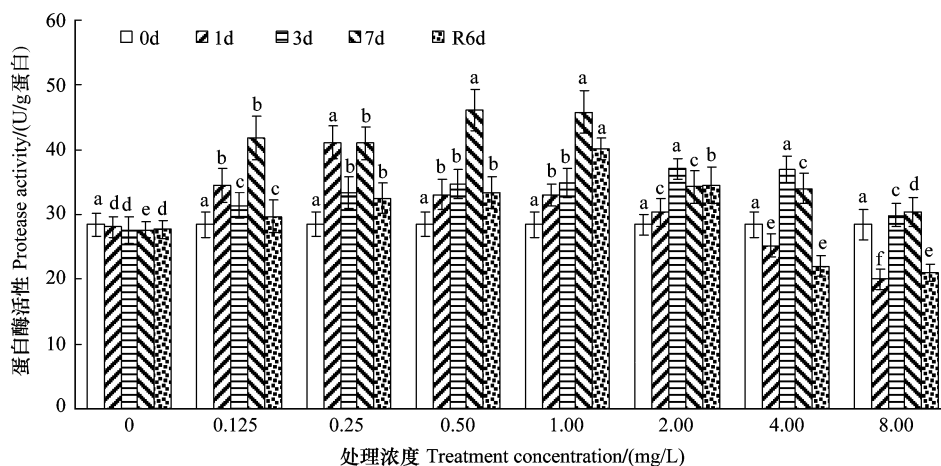


图6 在胁迫和恢复期间不同 Cd 浓度下红树蚬胃组织中蛋白酶活性变化

Fig. 6 Protease activity in the stomach tissue of clam *Geloina coxans* at the beginning day (0d), the cadmium-treated days (1d, 3d and 7d), and six days after the recovery (R6d) respectively

同一天测定的数据上标的不同字母表示在 0.05 的水平上差异显著 ($n=5$)

3 讨论

3.1 抗氧化酶和脂质过氧化对 Cd 胁迫的响应

Cd 是一种生物非必需的毒副作用很强的有毒元素, 已知能促进细胞内活性氧组分的合成, 加剧细胞的氧化胁迫; 此外, Cd 能与位于蛋白分子结合位置的重要金属 (如 Fe^{2+} 和 Cu^{2+}) 竞争, 引起这些离子的流失, 导致更严重的活性氧产生和氧化胁迫^[13]。

SOD、CAT 和 MDA 是研究生物对各种胁迫影响效应中受到密切关注的生理指标。抗氧化酶 (SOD、CAT 等) 的作用是清除氧自由基保护机体, 酶活性的变化可以间接地反映出生物体内自由基含量的变化。Porte 等^[14] 研究发现地中海沿岸的紫贻贝 (*Mytilus galloprovincialis*) 消化腺中 SOD 和 CAT 活性与体内污染物 PAHs 含量呈正相关。Zikic 等^[15] 把银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 暴露在 20 mg/L 的 Cd 溶液里数天后, 肝脏中 SOD 和 CAT 活性受到显著抑制。MDA 既是机体内脂质过氧化反应的重要产物, 同时又可与蛋白质的游离氨基作

用,引起蛋白质分子内与分子间交联,导致细胞损伤^[16]。Company 等^[17]报道暴露在 0.9 $\mu\text{mol/L}$ 的 Cd 溶液里 24h 后贻贝 (*Bathymodiolus azoricus*) 的鳃中 MDA 含量显著升高,然而显著抑制了 SOD 和 CAT 的酶活性。

本试验表明,重金属 Cd 胁迫对红树蚬胃组织抗氧化酶活性和 MDA 的影响效应表现为一个动态的变化过程,诱导和抑制两种效应因不同的测定指标、胁迫时间和处理剂量等而异。这在众多的污染胁迫动态研究中有类似的结果。在本文中,高浓度 Cd 对 SOD 活性的显著诱导影响在胁迫早期迅速出现,低浓度 Cd 的诱导需要更长的暴露时间。CAT 与 SOD 不表现出同步性,高浓度对 CAT 活性的诱导影响效应有限,而低浓度胁迫的诱导效应相对明显,而且在去除胁迫后低浓度组 CAT 活性上升,高浓度组却持续下降。SOD 与 CAT 活性变化不一致表明两者在功能上具有相对的独立性。Peters 等^[18]、黄周英等^[19]和杨晓斌等^[20]的研究中也观察到类似状况。Peters 等^[18]认为可能是 SOD 和 CAT 的影响模式不完全相同,SOD 催化 O_2^- 的歧化反应不是 CAT 底物 H_2O_2 的唯一来源, H_2O_2 亦可从氨基酸或细胞色素 P450 氧化酶激活产生。MDA 含量是毒性作用和保护作用的综合反映。本文研究表明,低浓度 Cd 胁迫使初期 MDA 含量上升,但随后下降至较低水平;高浓度 Cd 胁迫对 MDA 含量促进作用稍为滞后,但随之升高处在较高水平。这表明了低浓度胁迫下,红树蚬机体里由各种非酶和抗氧化酶的抗氧化系统在抵抗氧化胁迫和消除自由基损伤时有效地发挥作用,然而在高浓度胁迫下似乎抗氧化系统遭到损坏。

3.2 重金属对海洋生物消化酶的胁迫效应

贝类消化酶活性是反映贝类动物消化生理机能的一项重要指标,与其遗传性、环境和食性有关。本文实验结果表明,无胁迫条件下红树蚬的 3 种消化酶的活力水平表现为:蛋白酶>淀粉酶>脂肪酶,这与安贤惠等^[21]报道的缢蛏、剖刀蛏相同。红树蚬以滤食底栖硅藻和有机碎屑为生^[9],与缢蛏、剖刀蛏的食性和生境相似,其酶活力也就接近。

消化酶活力变化在一定程度上反映了生物体对饵料的消化能力的变化,重金属离子通过改变消化酶而影响了生物体的生长甚至生存。重金属离子与消化酶产生极强的亲和力,从而导致酶活性的改变,产生诱导或抑制效应因不同消化酶种类而异,金属离子对不同消化酶的作用机制不同。Sastry 和 Gupta^[22]报道 0.4—1.6 $\mu\text{mol/L}$ 的 HgCl_2 使鱼 *Channa punctatus* 肝脏的脂肪酶活性下降 28.30%—45.28%。杨蕙萍等^[23-24]研究表明, 2×10^{-3} mol/L 浓度下 Hg^{2+} 、 Ag^+ 、 Cu^{2+} 对皱纹盘鲍 (*Haliotis discushannai*) 的蛋白酶活性有抑制作用,而 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 无显著影响; Hg^{2+} 、 Ag^+ 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 抑制淀粉酶活性; Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 能提高淀粉酶的活性。吴众望等^[25]报道 9 种金属离子 5 个浓度梯度对缢蛏 (*Sinonovacula constricta*) 胃组织中蛋白酶和淀粉酶活力的影响,表现为: Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Pb^{2+} 对蛋白酶活力影响不显著, Hg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ag^+ 、 Mn^{2+} 则影响显著; Pb^{2+} 对淀粉酶活力影响不显著, Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Hg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ag^+ 、 Mn^{2+} 对淀粉酶活力影响显著。杨志彪等^[26]研究发现,不同浓度的 Cu^{2+} 对中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 肝胰腺的胃蛋白酶和淀粉酶活性均有不同程度的抑制,且 Cu^{2+} 浓度越高,抑制作用越明显;但对脂肪酶活性则有浓度依存的增强作用。

本文研究表明,Cd 对红树蚬胃组织 3 种消化酶的影响效应不一致。对淀粉酶的影响效应基本上为抑制,仅在胁迫初期 0.125 mg/L 处理组表现小幅度的诱导。在胁迫初期,脂肪酶活性受到显著诱导,随着胁迫时间延长酶活性则下降,同时胁迫解除后不同程度恢复。Cd 对蛋白酶的影响效应规律性不明显。

3.3 关于生物标记物的探讨

红树蚬是一种很好的 Cd 积聚者。研究表明广西英罗港红树林生境下红树蚬软体组织中 Cd 含量为 2.13×10^{-6} ,其生境沉积物中 Cd 含量为 0.70×10^{-6} ,红树蚬对环境沉积物浓缩系数为 3.0^[8],这显示红树蚬对 Cd 主动地吸收和富集,同时对 Cd 有一定耐受能力。虽然轻度污染尚未足以产生致死等可见的毒性效应,但对动物的生理生化过程仍可能产生影响,例如引起金属硫蛋白的变化^[27-28]、酶活性变化^[17,29]、脂质过氧化^[16]、DNA 损伤^[30]等。这些变化为寻找生物标记物提供有用信息。在本文研究的 6 个生化指标中,SOD、CAT 和 MDA 这 3 个生化指标受到比较广泛深入的研究和探讨^[17,31-33]。

近年来,在我国探索抗氧化体系应用于海洋污染监测的生物标记物方面已开展了一些研究。黄周英

等^[19,34]研究认为文蛤 (*Meretrix meretrix*) 鳃中 MDA 含量和 GSH、GST 活性,以及文蛤消化腺中 MDA 含量和 SOD 活性能较好地反映氧化胁迫的情况,具有较好的相关性,是海洋有机锡污染的潜在生物监测指标;然而鳃中和消化腺中的 CAT 活性的有效性均较差。刘伟成等^[35]指出在 Cd 浓度低于 0.5mg/L 时,大弹涂鱼 (*Boleophthalmus pectinirostris*) 肝脏 SOD 活性对水体中污染具有很好的指示作用,而 CAT 活性和 MDA 含量不适宜指示水体污染。曾丽璇等^[36]指出在重金属 Cd、Cu 的 50—150 $\mu\text{g/L}$ 浓度区间,河蚬 (*Corbicula fluminea*) 软组织中 CAT 活性可以作为监测 Cd、Cu 污染的有效生物标记。赵扬等^[37]认为从长期效应来看,褐菖鲉 (*Sebastiscus marmoratus*) 肝脏中抗氧化防御系统(包括 GPx、CAT、SOD 活性和 MDA、GSH 含量)可以作为监测海洋环境中有机锡污染的潜在生物标志物。综合这些研究结果表明,生物监测指标的有效性与动物种类和器官、污染物种类和水平等因素密切相关。

本文研究表明,SOD 活性在 1d 时,CAT 活性和 MDA 含量在 7d 和恢复 6d 时,均出现了显著的效应-剂量相关关系。1d 时 SOD 活性能较好地指示水体环境中 Cd 离子的胁迫,具有迅速的短期效应,然而,这一效应随着胁迫时间的延长没有再现。CAT 活性和 MDA 含量的效应-剂量相关关系则具有长期效应。显然,这 3 个生化指标对于重金属监测具有互补性。正如王重刚等^[38]指出:在应用抗氧化酶活性进行海洋环境监测时,不能仅依据某一种抗氧化酶的活性,而是应该将几种抗氧化酶甚至其他的生物标志物结合起来分析。相较而言,本文研究显示 CAT 活性和 MDA 含量这两个指标的应用可能性比 SOD 活性更高。

应用消化酶作为污染物胁迫的生物标志物的研究探讨相对较少。Barfield 等^[39]发现河蚬暴露于 Cd 中 28d 后,消化酶(纤维素酶)活性随剂量增加而减少,认为消化酶可以作为重金属 Cd 胁迫的生物标记物。本文中红树蚬在暴露 7d 和恢复 6d 时,淀粉酶活性随 Cd 浓度呈线性下降的趋势,酶活性与剂量之间存在显著负相关关系。这表明红树蚬胃组织的淀粉酶活性亦有可能作为重金属 Cd 污染监测的一种生物标记物。

References:

- [1] Harbison P. Mangrove mud-a sink and a source for trace metals. *Marine Pollution Bulletin*, 1986, 17(6): 246-250.
- [2] Silva C A R, Lacerda L D, Rezinde C E. Metal-reservoir in a red mangrove sediments forest. *Biotropica*, 1990, 22(4): 335-345.
- [3] Ray A K, Tripathy S C, Patra S, Sarma V V. Assessment of Codavari estuarine mangrove ecosystem through trace metal studies. *Environment International*, 2006, 32(2): 219-223.
- [4] Huang L N, Lan C Y, Shu W S. Effects of sewage discharge on soil and plants of the mangrove wetland ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(2): 13-19.
- [5] Li M, Zhang J H, Chen G Z. Effects of sewage discharge on growth of mangrove. *Protection Forest Science and Technology*, 2002, (3): 1-5.
- [6] Wang W Q, Wang M. *The Mangroves of China*. Beijing: Science Press, 2007: 113-160.
- [7] Zhang J H, Li M, Chen G Z. Effects of estuarine discharge of wastewater on mangrove wetlands. *Shanghai Environmental Sciences*, 2004, 23(4): 147-151.
- [8] He B Y, Dai P J, Fan H Q. A study on the contents of the heavy metals in the sediments and macrobenthos of Yingluo mangrove swamps, Guangxi. *Marine Environmental Science*, 1996, 15(1): 35-41.
- [9] Cai Y Y, Huang X H, Wu D K. Studies on the ecology of *Polymesoda erosa* (Solander). *Tropic Oceanology*, 1995, 14(1): 94-98.
- [10] Jiang C K, Jin C D, Wu R L, Tao Z J, eds. *Method for Tool Enzymes Determination*. Shanghai: Shanghai Science Press, 1982: 74-117.
- [11] Stellmach B. *Method for Enzyme Determination*//Qian J Y translated. Beijing: China Light Industry Press, 1992: 21-310.
- [12] Huang H. The improved determination method for lipid peroxidation product, malondialdehyde in the blood serum. *Journal of Zhenjiang Medical College*, 1999, 9(3): 457-458.
- [13] Pruski A M, Dixon D R. Effects of cadmium on nuclear integrity and DNA repair efficiency in the gill cells of *Mytilus edulis* L. *Aquatic Toxicology*, 2002, 57(3): 127-137.
- [14] Porte C, Sole M, Albaigés J, Livingstone D R. Responses of mixed-function oxygenase and antioxidant enzyme system of *Mytilus* sp. to organic pollution. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology*, 1991, 100(1/2): 183-186.
- [15] Zikic R V, Stajin A, Saicic Z S, Spasic M B, Ziemnicki K, Petrovic V M. The activities of superoxide dismutase, catalase and ascorbic acid content in the liver of goldfish (*Carassius auratus gibelio* Bloch.) exposed to cadmium. *Physiology Research*, 1996, 45(6): 479-481.
- [16] Papadimitriou E, Loubourdis N S. Exposure of the frog *Rana ridibunda* to copper impact on two biomarkers, lipid peroxidation, and glutathione.

- Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, 69(6): 885-891.
- [17] Company R, Serafim A, Bebianno M J, Cosson R, Shillito B, Fiala-Médioni A. Effect of cadmium, copper and mercury on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in the gills of the hydrothermal vent mussel *Bathymodiolus azoricus*. Marine Environmental Research, 2004, 58(2/5): 377-381.
- [18] Peters L D, Porte C, Albaiges J, Livingstone D R. 7-Ethoxyresorufin O-deethylase (EROD) and antioxidant enzyme activities in larvae of Sardine (*Sardina pilchardus*) from the north coast of Spain. Marine Pollution Bulletin, 1994, 28(5): 299-304.
- [19] Huang Z Y, Chen Y X, Zuo Z H, Zhao Y, Wang C G. Effects of tributyltin on lipid peroxidation and antioxidant enzymes activity of digestive gland in hard clam *Meretrix meretrix*. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2006, 45(1): 102-105.
- [20] Yang X B, Jin Y F, Wu B. Effects of cerium on the antioxidant enzyme activity and MDA content in *Hyriopsis cumingii* liver. Reservoir Fisheries, 2008, 28(3): 16-18.
- [21] An X H, Li L T, Lin C M. Comparative study on the activities of different seashell digestive ferments. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2007, 16(1): 57-59.
- [22] Sastry K V, Gupta P K. In vitro inhibition of digestive enzymes by heavy metals and their reversal by chelating agent: Part I. Mercuric chloride intoxication. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1978, 20(6): 729-735.
- [23] Yang H P, Tong S Y, Wang Z C. The study of protease in *Haliotis discus Hannai* Ino. Journal of Fisheries of China, 1997, 21(2): 128-133.
- [24] Yang H P, Tong S Y, Wang Z C. The properties of amylase and algalase in *Haliotis discus Hannai*. Journal of Fisheries of China, 1998, 22(4): 345-351.
- [25] Wu Z W, Pan L Q, Dong S L. Effects of nine metal ions on digestive enzyme activities of *Sinonovacula constricta*. Journal of Fishery Sciences of China, 2003, 10(4): 297-300.
- [26] Yang Z B, Zhao Y L, Zhou Z L, Zhou X, Yang J. Effects of copper in water on distribution of copper and digestive enzymes activities in *Eriocheir sinensis*. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 29(4): 496-501.
- [27] Baudrimont M, Lemaire-Gony S, Ribeyre F, Métivaud J, Boudou A. Seasonal variations of metallothionein concentrations in the Asiatic Clam (*Corbicula fluminea*). Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology, 1997, 118(3): 361-367.
- [28] Baudrimont M, Andres S, Durrieu G. The key role of metallothioneins in the bivalve *Corbicula fluminea* during the deputation phase, after in situ exposure to Cd and Zn. Aquatic Toxicology, 2003, 63(2): 89-102.
- [29] Francesco R, Giovanni P. Glutathione, glutathione-dependent and antioxidant enzymes in mussel, *Mytilus galloprovincialis*, exposed to metals under field and laboratory conditions: implications for the use of biochemical biomarkers. Aquatic Toxicology, 1995, 31(2): 143-164.
- [30] Zhang Y M, Wang Y J, Yu R L, Zhang S, Wu Z B. Effects of heavy metals Cd^{2+} , Pb^{2+} and Zn^{2+} on DNA damage of loach *Misgurnus anguillicandatus*. Acta Hydrobiologica Sinica, 2006, 30(4): 399-403.
- [31] Rodríguez-Ariza A, Peinado J, Pueyo C, López-Barea J. Biochemical indicators of oxidative stress in fish from polluted littoral areas. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1993, 50(12): 2568-2573.
- [32] Hasspieler B M, Behar J V, Carlson D B, Watson D E, Di Giulio R T. Susceptibility of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and brown bullhead (*Ameriurus nebulosus*) to oxidative stress: a comparative study. Aquatic Toxicology, 1994, 28(1/2): 53-64.
- [33] Petřivalský M, Machala M, Nezveda K, Piačka V, Svobodová Z, Drábek P. Glutathione-dependent detoxifying enzymes in rainbow trout liver: search for specific biochemical markers of chemical stress. Environmental Toxicology and Chemistry, 1997, 16(7): 1417-1421.
- [34] Huang Z Y, Wang C G, Zuo Z H, Zhao Y, Chen Y X. Effects of tributyltin on antioxidant enzymes activity and lipid peroxidation in the gill of hard clam *Meretrix meretrix*. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(10): 1408-1413.
- [35] Liu W C, Li M Y, Huang F Y, Zhu J Q, Dong W, Yang J F. Effects of cadmium stress on xanthine oxidase and antioxidant enzyme activities in *Boleophthalmus pectinirostris* liver. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(7): 1310-1314.
- [36] Zeng L X, Wu H H, Chen G Z. Toxic effects of Cd and Cu on the catalase activity in Asian clam (*Corbicula fluminea*). Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2007, (4): 81-84, 97.
- [37] Zhao Y, Wang Y, Zuo Z H, Chen Y X, Wang C G. Effects of tributyltin on hepatic antioxidant system in *Sebastiscus marmoratus*. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2008, 47(5): 748-751.
- [38] Wang C G, Zheng W Y, Yu Q, Zhao Y, Chen Y X. The effect of mixture of benzo(a)pyrene and pyrene exposure on hepatic antioxidant enzymes activities in *Mugil soiuy*. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(4): 529-533.
- [39] Barfield M L, Farris J L, Black M C. Biomarker and bioaccumulation responses of asian clams exposed to aqueous cadmium. Journal of Toxicology and Environmental Health, 2001, 63(7): 495-510.

参考文献:

- [4] 黄立南, 蓝崇钰, 束文圣. 污水排放对红树林湿地生态系统的影响. 生态学杂志, 2000, 19(2): 13-19.

- [5] 李玫, 章金鸿, 陈桂珠. 生活污水排放对红树林植物生长的影响. 防护林科技, 2002, (3): 1-5.
- [6] 王文卿, 王珺. 中国红树林. 北京: 科学出版社, 2007: 113-160.
- [7] 章金鸿, 李玫, 陈桂珠. 港湾污水排放对红树林湿地的影响. 上海环境科学, 2004, 23(4): 147-151.
- [8] 何斌源, 戴培建, 范航清. 广西英罗港红树林沼泽沉积物和大型底栖动物中重金属含量的研究. 海洋环境科学, 1996, 15(1): 35-41.
- [9] 蔡英亚, 黄翔鹤, 吴洞科. 红树蚬的生态观察. 热带海洋, 1995, 14(1): 94-98.
- [10] 蒋传葵, 金承德, 吴仁龙, 陶宗晋. 工具酶的活力测定. 上海: 上海科技出版社, 1982: 74-117.
- [11] 施特马赫 B. 酶的测定方法//钱嘉渊, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 1992: 21-310.
- [12] 黄虹. 血清脂质过氧化代谢产物丙二醛测定方法的改进. 镇江医学院学报, 1999, 9(3): 457-458.
- [19] 黄周英, 陈奕欣, 左正宏, 赵扬, 王重刚. 三丁基锡对文蛤消化腺脂质过氧化及抗氧化酶活性的影响. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(1): 102-105.
- [20] 杨晓斌, 金叶飞, 吴波. 镉对三角帆蚌肝脏抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响. 水利农业, 2008, 28(3): 16-18.
- [21] 安贤惠, 李联泰, 林春梅. 几种贝类消化酶活力的比较. 淮海工学院学报(自然科学版), 2007, 16(1): 57-59.
- [23] 杨蕙萍, 童圣英, 王子臣. 皱纹盘鲍蛋白酶的研究. 水产学报, 1997, 21(2): 128-133.
- [24] 杨蕙萍, 童圣英, 王子臣. 皱纹盘鲍淀粉酶和褐藻酸酶的研究. 水产学报, 1998, 22(4): 345-351.
- [25] 吴众望, 潘鲁青, 董双林. 9 种金属离子对缢蛏消化酶活力的影响. 中国水产科学, 2003, 10(4): 297-300.
- [26] 杨志彪, 赵云龙, 周忠良, 周鑫, 杨健. 水体铜对中华绒螯蟹体内铜分布和消化酶活性的影响. 水产学报, 2005, 29(4): 496-501.
- [30] 张迎梅, 王叶菁, 虞闰六, 张晟, 吴振斌. 重金属 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 对泥鳅 DNA 损伤的研究. 水生生物学报, 2006, 30(4): 399-403.
- [34] 黄周英, 王重刚, 左正宏, 赵扬, 陈奕欣. 三丁基锡对文蛤鳃的抗氧化酶活性及脂质过氧化的影响. 环境科学学报, 2005, 25(10): 1408-1413.
- [35] 刘伟成, 李明文, 黄福勇, 竺俊全, 董武, 杨景峰. 镉胁迫对大弹涂鱼肝脏黄嘌呤氧化酶和抗氧化酶活性的影响. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1310-1314.
- [36] 曾丽璇, 吴宏海, 陈桂珠. 镉、铜污染对河蚬过氧化氢酶活性的影响. 华南师范大学学报(自然科学版), 2007, (4): 81-84, 97-97.
- [37] 赵扬, 王云, 左正宏, 陈奕欣, 王重刚. 三丁基锡 (TBT) 对褐菖鲉肝脏抗氧化系统的影响. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(5): 748-751.
- [38] 王重刚, 郑微云, 余群, 赵扬, 陈奕欣. 苯并(a)芘和芘的混合物暴露对梭鱼肝脏抗氧化酶活性的影响. 环境科学学报, 2002, 22(4): 529-533.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 11 June, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Responses of microbes-mediated carbon and nitrogen cycles to global climate change	SHEN Jupei, HE Jizheng (2957)
Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis	JIA Xiaohui, SHI Dingji, SHI Mianhong, et al (2968)
Unbalanced cyclical fluctuation pattern of intermittent outbreaks of beet armyworm <i>Spodoptera exigua</i> (Hübner) in China	WEN Lizhang, ZHANG Youjun, ZHU Liang, et al (2978)
Self-organizing feature map classification and ordination of <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest in Pangquangou Nature Reserve	ZHANG Qindi, ZHANG Jintun, Suriguga, et al (2990)
Ecological effects of lakeside wetlands restoration in Dalian Lake, Shanghai	WU Di, YUE Feng, LUO Zukui, et al (2999)
Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain	WU Xiaogang, GUO Jinping, YANG Xiuyun, et al (3009)
Response of soil microbial community structure to the leaf litter decomposition of three typical broadleaf species in mid-subtropical area, southern China	ZHANG Shengxi, CHEN Falin, ZHENG Hua (3020)
The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China	CHEN Falin, ZHENG Hua, YANG Bosu, et al (3027)
Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst Peak-Cluster depression area of Northwest Guangxi, China	LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (3036)
Effects of cadmium stress on the activities of antioxidant enzymes, digestive enzymes and the membrane lipid peroxidation of the mangrove mud clam <i>Geloina coaxans</i> (Gmelin)	LAI Tinghe, HE Binyuan, FAN Hangqing, et al (3044)
The edge effects on tree-liana relationship in a secondary natural forest in Bawangling Nature Reserve, Hainan Island, China	WU Yuna, TAO Jianping, XI Weimin, et al (3054)
Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau	YANG Lei, WEI Wei, MO Baoru, et al (3060)
The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought	HE Youwei, WANG Qiubing, WEN Xuefa, et al (3069)
Ecological adaptability of photosynthesis and water use for <i>Tamarix ramosissima</i> in the southern periphery of Gurbantungut Desert, Xinjiang	WANG Shanshan, CHEN Xi, WANG Quan, et al (3082)
Estimation of leaf area index of cotton using digital Imaging	WANG Fangyong, WANG Keru, LI Shaokun, et al (3090)
Different response of photosynthetic apparatus between wild soybean (<i>Glycine soja</i>) and cultivated soybean (<i>Glycine max</i>) to NaCl stress	XUE Zhongcai, GAO Huiyuan, LIU Jie (3101)
Effects of water and phosphorus supply on morphology and structure of special root hairs on nodal roots of wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.)	ZHANG Jun, HE Dexian, DUAN Zengqiang (3110)
Applications of species indicator for analyzing plant community types and their biodiversity at Kunyushan National Forest Reserve	SUN Zhiqiang, ZHANG Xingyao, ZHU Yanpeng, et al (3120)
Societal metabolism for chinese provinces based on multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM)	LIU Ye, GENG Yong, ZHAO Hengxin (3133)
Comparative gene expression analysis for leaf trichomes of tobacco grown in two different regions in China	CUI Hong, JI Hao, YANG Huijuan, et al (3143)
Performance evaluation of B biotype whitefly, <i>Bemisia tabaci</i> on 23 host plants	AN Xincheng, GUO Qiang, HU Qiongbo (3150)
Studies of hemocytes DNA damage by two pesticides acetamiprid and chlorpyrifos in predaceous spiders of <i>Pardosa astrigera</i> Koch	LI Rui, LI Shengcai, LIU Jia, (3156)
Effects of the fungicide prochloraz on the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LI Daming, LU Zhenghe, FENG Qi, et al (3163)
Effects of long- and short-term successive parthenogenesis on life history and genetics characteristics of <i>Brachionus calyciflorus</i>	GE Yali, XI Yilong (3170)
Review and Monograph	
Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality	ZHAO Jun, YANG Kai, TAI Jun, et al (3180)
Review of dew action effect on plants	YE Youhua, PENG Shaolin (3190)
Advances in Botryosphaeriaceae: identification, phylogeny and molecular ecology	CHENG Yanlin, LIANG Jun, LÜ Quan, et al (3197)
Advances in research on the mechanisms of age-related productivity decline of planted forests	MAO Peili, CAO Banghua, TIAN Wenxia, et al (3208)
The application of tree-ring on forest disturbance history reconstruction	FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (3215)
Research advances on stress responsive WRKY transcription factors in plants	LI Ran, LOU Yonggen (3223)
Scientific Note	
The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan Alpine grassland	REN Zuohua, ZHANG Yuguang, LI Diqiang, et al (3232)
The differences of water use efficiency (WUE) among three <i>Populus deltoids</i> clones, and the cloning and characterization of related gene, <i>PdERECTA</i>	GUO Peng, XIA Xinli, YIN Weilun (3239)
Arthropod community reestablishment and niche of the main groups in kiwifruit orchards	DU Chao, ZHAO Huiyan, GAO Huanhuan, et al (3246)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 11 期 (2011 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 11 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元