

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第24期 Vol.33 No.24 **2013**

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 33 卷 第 24 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策 赵其国, 黄国勤, 马艳芹 (7615)
- 《生态学基础》: 对生态学从传统向现代的推进——纪念 E.P. 奥德姆诞辰 100 周年
..... 包庆德, 张秀芬 (7623)
- 食物链长度理论研究进展 张 欢, 何 亮, 张培育, 等 (7630)

个体与基础生态

- 天山盘羊夏季采食地和卧息地生境选择 李 叶, 余玉群, 史 军, 等 (7644)
- 松果梢斑螟对虫害诱导寄主防御的抑制作用 张 晓, 李秀玲, 李新岗, 等 (7651)
- 菹草附着物对营养盐浓度的响应及其与菹草衰亡的关系 魏宏农, 潘建林, 赵 凯, 等 (7661)
- 濒危高原植物羌活化学成分与生态因子的相关性 黄林芳, 李文涛, 王 珍, 等 (7667)
- 四年 O₃ 熏气对小麦根际土壤氮素微生物转化的影响 吴芳芳, 郑有飞, 吴荣军, 等 (7679)
- 重金属 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 胁迫下泥蚶消化酶活性的变化 陈肖肖, 高业田, 吴洪喜, 等 (7690)

种群、群落和生态系统

- 不同生境中橘小实蝇种群动态及密度的差异 郑思宁 (7699)
- 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征 李忠文, 闫文德, 郑 威, 等 (7707)

景观、区域和全球生态

- 中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性 王绍强, 陈蝶聪, 周 蕾, 等 (7715)
- 雅鲁藏布江流域 NDVI 变化与风沙化土地演变的耦合关系 李海东, 沈渭寿, 蔡博峰, 等 (7729)
- 高精度遥感影像下农牧交错带小流域景观特征的粒度效应 张庆印, 樊 军 (7739)
- 高寒草原土壤有机碳及土壤碳库管理指数的变化 蔡晓布, 于宝政, 彭岳林, 等 (7748)
- 芦芽山亚高山草甸、云杉林土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性
..... 武小钢, 郭晋平, 田旭平, 等 (7756)
- 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征 孙伟军, 方 晰, 项文化, 等 (7765)
- 东北黑土区片蚀和沟蚀对土壤团聚体流失的影响 姜义亮, 郑粉莉, 王 彬, 等 (7774)
- 滇西北高原纳帕海湿地土壤氮矿化特征 解成杰, 郭雪莲, 余磊朝, 等 (7782)
- 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价 杨尚东, 吴 俊, 谭宏伟, 等 (7788)
- 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等 (7798)
- 庐山森林景观格局变化的长期动态模拟 梁艳艳, 周年兴, 谢慧玮, 等 (7807)

暖温带-北亚热带生态过渡区物种生境相关性分析 袁志良,陈 云,韦博良,等 (7819)
不同生境和去趋势方法下的祁连圆柏径向生长对气候的响应 张瑞波,袁玉江,魏文寿,等 (7827)

资源与产业生态

大小兴安岭生态资产变化格局 马立新,覃雪波,孙 楠,等 (7838)
生态环境移动数据采集系统研究与实现 申文明,孙中平,张 雪,等 (7846)

城乡与社会生态

城市遥感生态指数的创建及其应用 徐涵秋 (7853)

研究简报

大明竹属遗传多样性 ISSR 分析及 DNA 指纹图谱研究 黄树军,陈礼光,肖永太,等 (7863)
干旱胁迫下 4 种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价 卢广超,许建新,薛 立,等 (7872)
基于 ITS2 和 16S rRNA 的西施舌群体遗传差异分析 孟学平,申 欣,赵娜娜,等 (7882)
两种浒苔无机碳利用对温度响应的机制 徐军田,王学文,钟志海,等 (7892)
北京山区侧柏林冠层对降雨动力学特征的影响 史 宇,余新晓,张建辉,等 (7898)

学术信息与动态

景观生态学研究:传统领域的坚守与新兴领域的探索——2013 厦门景观生态学论坛述评
..... 杨德伟,赵文武,吕一河 (7908)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 黄土丘陵农牧交错带——黄土丘陵是中国黄土高原的主要地貌形态,由于黄土质地疏松,加之雨季集中,降水强度较大,地表流水冲刷形成很多沟谷,斜坡所占的面积很大。这里千百年来的农牧交错作业,地表植被和生态系统均遭受了严重的破坏。利用高精度影像对小流域景观的研究表明,这里耕地、林地和水域景观相对比较规则简单,荒草地和人工草地景观比较复杂。农牧交错带小流域景观形态具有分形特征,各类景观斑块的分维数对粒度变化的响应不同,分维数随粒度的增大呈非线性下降趋势。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208221183

陈肖肖, 高业田, 吴洪喜, 王召根, 王瑶华, 周朝生, 胡园. 重金属 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 胁迫下泥蚶消化酶活性的变化. 生态学报, 2013, 33(24): 7690-7698.
Chen X X, Gao Y T, Wu H X, Wang Z G, Wang Y H, Zhou C S, Hu Y. Changes of digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7690-7698.

重金属 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 胁迫下泥蚶消化酶活性的变化

陈肖肖^{1,2}, 高业田^{2,3}, 吴洪喜^{2,4,*}, 王召根^{2,3}, 王瑶华^{2,3}, 周朝生^{2,4}, 胡园^{2,4}

(1. 华东理工大学, 上海 200237; 2. 浙江省海洋水产养殖研究所, 温州 325005;

3. 上海海洋大学, 上海 201306; 4. 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 温州 325005)

摘要:为了探讨重金属 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 胁迫对泥蚶消化酶活性的影响, 运用酶学分析的方法, 按《渔业水质标准》(GB 11607) 规定的 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 最高限量值的 1、2、5、10 倍设置重金属离子 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度及其组合, 研究了在重金属 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 胁迫下, 30d 内泥蚶 3 种消化酶活性的变化规律。结果表明: 与空白对照组相比, 在重金属 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 或其组合的胁迫下, 较低浓度组泥蚶的淀粉酶活性实验前期增强(即被诱导), 实验后期减弱(即被抑制), 较高浓度组泥蚶的淀粉酶活性从实验一开始就减弱, 并保持在较低水平, 毒性比较, 同一重金属高浓度>低浓度, 不同重金属及其组合 Cu^{2+} >($Cd^{2+}+Cu^{2+}$)组合> Cd^{2+} ; 泥蚶脂肪酶的活性实验前期增强, 实验后期转为微减弱或减弱, 毒性比较, 同一重金属高浓度>低浓度, 不同重金属及其组合($Cd^{2+}+Cu^{2+}$)组合> Cu^{2+} > Cd^{2+} ; 泥蚶胃蛋白酶的活性实验前期增强, 且活性呈现升高-降低-再升高-再降低的变化, 实验后期分别表现微增强、微减弱和减弱, 毒性比较, 同一重金属高浓度>低浓度, 不同重金属及其组合($Cd^{2+}+Cu^{2+}$)组合> Cu^{2+} > Cd^{2+} 。可见: 环境中的 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 对泥蚶的消化酶活性起着明显的影响作用。

关键词:泥蚶; 重金属胁迫; Cd^{2+} ; Cu^{2+} ; 消化酶活性

Changes of digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper

CHEN Xiaoxiao^{1,2}, GAO Yetian^{2,3}, WU Hongxi^{2,4,*}, WANG Zhaogen^{2,3}, WANG Yaohua^{2,3}, ZHOU Chaosheng^{2,4}, HU Yuan^{2,4}

1 East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

2 Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China

3 Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

4 Zhejiang Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-Resource, Wenzhou 325005, China

Abstract: In order to investigate the effect of Cd^{2+} and Cu^{2+} stress on digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa*. enzyme analytical method was conducted to analyze the changes of the digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa* exposed to different concentrations of Cd^{2+} or/and Cu^{2+} for 30 days. The concentrations of heavy metal ion Cd^{2+} , Cu^{2+} , and their combination ($Cd^{2+}+Cu^{2+}$) were set as one, two, five, and ten times of the corresponding maximum limit values according to the Water Quality Standard for Fisheries (GB 11607). The results showed that compared with the blank control groups, when *Tegillarca granosa* were exposed to low concentrations of Cd^{2+} , Cu^{2+} and ($Cd^{2+}+Cu^{2+}$), their digestive enzyme activity increased at the early experimental period (or be induced), and then decreased at the later period (or be inhibited); when the *Tegillarca granosa* samples were exposed to high concentrations, the amylase activity decreased from the start and kept low level all along. For the same heavy metal ion, the toxicity of the high concentration groups was higher

基金项目:浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室人才培养基金(2010F30003)

收稿日期:2012-08-22; 修订日期:2013-08-22

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

than that of the low concentration groups in the amylase activity analysis. In the comparison of the two heavy metal ions and their combination, the toxicity of the Cu²⁺ group was highest, followed by the (Cd²⁺+Cu²⁺) group, and the Cd²⁺ group was lowest. The lipase activity of *Tegillarca granosa* increased at the early experimental period, and then decreased moderately or weakly at the later period. For the same heavy metal ion, the toxicity of the high concentration groups was higher than that of the low concentration groups in the lipase activity analysis. In the comparison of the two heavy metal ions and their combination, the toxicity of the (Cd²⁺+Cu²⁺) group was highest, followed by the Cu²⁺ group, and the Cd²⁺ group was lowest. The pepsin activity of *Tegillarca granosa* increased at the early experimental period. In the middle period, the activity had the variance of being increased, decreased, increased again, and then decreased. At the later period, the activity increased weakly, decreased moderately, and decreased weakly for different ion groups. For the same heavy metal, the toxicity of the high concentration groups was higher than that of the low concentration groups in the pepsin activity analysis. In the comparison of the two heavy metals and their combination, the toxicity of the (Cd²⁺+Cu²⁺) group was highest, followed by the Cu²⁺ group, and the Cd²⁺ group was lowest. The results show that there were obvious stress of Cd²⁺ and Cu²⁺ in the environment for the digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa*.

Key Words: *Tegillarca granosa*; Heavy metal stress; Cd²⁺; Cu²⁺; digestive enzyme activity

消化酶是由消化腺和消化系统分泌的一类水解酶,主要分为淀粉酶、脂肪酶和胃蛋白酶等几大类,消化酶能将食物分解成可吸收的小分子物质,为机体提供所需的营养和能量,消化酶的活性变化能及时反映出生物体对消化生理调节和对环境适应的响应。已证实外界多种因素能对消化酶活性产生影响^[1-6],其中重金属离子就是主要因素之一^[7-9]。泥蚶(*Tegillarca granosa*)是一种栖息于沿海滩涂的双壳贝类,因其营底栖生活,且移动性差,极易受重金属污染的水域和底质的影响,但迄今尚未见到有关重金属对泥蚶消化酶活性影响的详细研究报道。

本文总结和分析了重金属 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 及其组合对泥蚶 3 种消化酶活性的影响结果,探讨重金属 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 对泥蚶的毒害作用机制,为重金属的潜在生态风险评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

FLUKO F6/10 超细匀浆器(上海弗鲁克流体机械制造有限公司);DK-600 电热恒温水槽(上海精宏实验设备有限公司);WFZ UV-2000 紫外可见分光光度计(尤尼克上海仪器有限公司);Anke TGL-16G-A 低温离心机(上海安宁科学仪器厂);LDZ4-0.8A 离心机(北京医用离心机厂);1.5mL 和 5mL 离心管、滤纸、培养皿(江苏志达实验器材商城);淀粉酶、脂肪酶、胃蛋白酶试剂盒、考马斯亮蓝总蛋白试剂盒(南京建成生物工程研究所);CdCl₂·2.5H₂O、冰乙酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);CuSO₄·5H₂O(分析纯,上海新宝精细化工);NaCl(分析纯,浙江中星化工试剂厂)。

1.2 实验动物及其暂养

实验泥蚶于 2012 年 5 月采自浙江乐清湾养殖区,为 2 龄个体,从中随机取得 20 个,用游标卡尺和电子天平测量和称重,壳长(28.22±2.29) mm,体重(8.14±1.95) g。实验前,将泥蚶暂养于盛有 40 L 海水、规格为 48 cm×36 cm×30 cm 的塑料箱中。实验海水取自乐清湾清江海区,经 24 h 以上沉淀和沙滤后使用。水温(20.51±1.91)℃,pH 值 8.09±0.58,盐度 20.33±0.58,油类、总汞、铜、锌、铅、镉、铬等指标符合《渔业水质标准》(GB 11607)。暂养期间 24h 连续充氧,每天上午换新鲜海水 1 次,换水量为 100%,早晚各投喂扁藻(*Platymonas subcordiformis*) 1 次,投喂后保持水体中扁藻密度约为 5×10⁴ 细胞/mL。

1.3 重金属 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 母液的配制

Cd²⁺ 母液的配制 称取国药集团化学试剂有限公司生产的分析纯级氯化镉(CdCl₂·2.5H₂O) 1.016 g,溶于 500 mL 去离子水,配成浓度为 1 g/L 的 Cd²⁺ 母液。

Cu^{2+} 母液的配制 称取上海新宝精细化工生产的分析纯级硫酸铜($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 1.950g,溶于500 mL去离子水,配成浓度为1 g/L的 Cu^{2+} 母液。

1.4 实验设计

Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 离子浓度分别按《渔业水质标准》(GB 11607)最高限量值的1、2、5、10倍设置,重金属组合浓度为 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 相对应浓度的叠加,再设1个空白对照(表1)。每个实验组设置3个平行。实验在若干个盛有40 L海水、规格为48 cm×36 cm×30 cm的塑料箱中进行,实验海水用配制好的重金属母液调节到表1中设定的浓度,然后向每个塑料箱中放养已暂养1周的健康泥蚶40个。实验期间管理同暂养期,每次换水后分别加入含有相应重金属离子浓度的新鲜海水,以保持水体中重金属离子浓度的恒定。整个实验历时30d。

表1 重金属胁迫实验设计

Table 1 The design of heavy metal stress experiment

组别 Group	$\text{Cd}^{2+}/(\text{mg/L})$	$\text{Cu}^{2+}/(\text{mg/L})$	$\text{Cd}^{2+}+\text{Cu}^{2+}/(\text{mg/L})$
空白对照 Control	0	0	0
1	0.005	0.01	0.005+0.01
2	0.01	0.02	0.01+0.02
3	0.025	0.05	0.025+0.05
4	0.05	0.1	0.05+0.1

1.5 样品制备和酶活性的测定

实验开始时及实验后第2天、5天、10天、15天、30天各取样1次,每次每箱随机取5只实验泥蚶。将其置于冰盘上尽快解剖,取出胃和消化盲囊,用预冷的0.86%生理盐水清洗2次,除去血液,用滤纸拭干后称取0.35 g置于5 mL干净的离心管中。加入1.4 mL 0.86%生理盐水(比例为1 g样品/5mL 0.86%生理盐水),用眼科小剪刀将其剪碎,然后用超细匀浆器在15000 r/min速度下匀浆3—5 min,制成20%的组织匀浆液,以上步骤均在冰浴中进行。再将匀浆液置于低温离心机,2000 r/min速度下离心15 min,取上清液测定有关数值。

样品淀粉酶、胃蛋白酶和脂肪酶活性以及总蛋白含量的测定步骤与方法严格按照南京建成生物工程研究所试剂盒上的说明书进行。

淀粉酶活性单位 每毫克的组织蛋白在37℃与底物作用30min,水解10 mg淀粉为一个淀粉酶活力单位(U/mg 蛋白)。

胃蛋白酶活性单位 每毫克组织蛋白在37℃条件下每分钟分解蛋白生成1 μg氨基酸相当于1个酶活力单位(U/mg蛋白)。

脂肪酶活性单位 每毫克蛋白在37℃条件下与底物作用1min,每消耗1 μmol底物为一个酶活力单位(U/mg 蛋白)。

1.6 数据处理及分析

采用SPSS 15.0软件中的双因素方差分析(Two-way ANOVA)和Tukey检验处理浓度和时间对消化酶活性影响的相应数据,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 及其组合胁迫下泥蚶淀粉酶活性的变化

实验结果表明:与空白对照组相比, Cd^{2+} 对泥蚶淀粉酶活性的影响,0.005 mg/L浓度在整个实验期间均起着诱导作用,0.01 mg/L浓度在实验开始后约13 d内也起着不同程度的诱导作用;较高浓度组在实验开始后第2天表现出显著的抑制作用,随着胁迫时间的延长,淀粉酶的活性虽有所恢复,但至实验结束时仍处于抑制状况(图1)。 Cu^{2+} 对泥蚶淀粉酶活性的影响,0.01、0.02 mg/L等低浓度组在实验开始后的4 d内起诱导作用,然后转变成与高浓度组一样,表现出显著的抑制作用(图2)。 $\text{Cd}^{2+}+\text{Cu}^{2+}$ 组合对泥蚶淀粉酶活性的影响,(0.005+0.01)mg/L和(0.01+0.02)mg/L浓度组所起的作用与低浓度 Cu^{2+} 所起的作用基本相似,实验前期起

诱导作用,实验后期转变为抑制作用,但起诱导作用的时间较长,持续约 7—12 d,高浓度的 Cd²⁺+Cu²⁺ 组合从实验一开始就表现出显著的抑制作用,且剂量效应明显,随着胁迫时间的延长,对酶的活性影响增大(图 3)。

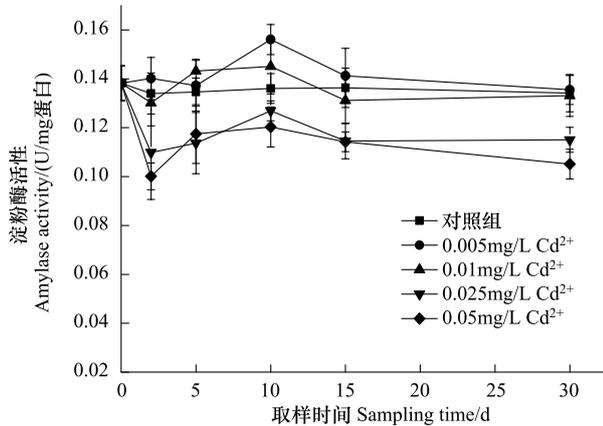


图 1 Cd²⁺ 胁迫下泥蚶淀粉酶活性的变化

Fig. 1 Time course changes of amylase activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium

比较实验第 30 天淀粉酶活性值大小,发现受单一离子胁迫时,在相同的浓度下,Cu²⁺ 组泥蚶明显小于 Cd²⁺ 组泥蚶。Cd²⁺+Cu²⁺ 组合的泥蚶介于相对应浓度的单一 Cd²⁺ 组泥蚶和 Cu²⁺ 组泥蚶之间。

Two-way ANOVA 分析表明,重金属 Cd²⁺、Cu²⁺ 和 Cd²⁺+Cu²⁺ 组合的浓度、胁迫时间对泥蚶淀粉酶活性均有显著性影响,时间与浓度的交互作用(Cd²⁺ 组除外)也显著地影响着淀粉酶的活性($P < 0.05$) (表 2)。

2.2 Cd²⁺、Cu²⁺ 及其组合胁迫下泥蚶脂肪酶活性的变化

实验结果表明:与空白对照组相比,Cd²⁺、Cu²⁺ 对泥蚶脂肪酶活性的影响,除 Cd²⁺+Cu²⁺ 组合的高浓度(0.05+0.1) mg/L 组外,其它浓度胁迫下的泥蚶脂肪酶活性均呈先迅速升高后缓慢降低的变化。在 Cd²⁺ 的胁迫下,泥蚶脂肪酶活性在实验的第 5 天达到峰值(图 4)。Cu²⁺ 的胁迫对泥蚶脂肪酶活性的影响更强烈,在实验第 2 天就达高峰,特别是浓度为 0.01 mg/L 的 Cu²⁺ 组,在实验的第 2 天,泥蚶脂肪酶活性上升到空白对照组的 3 倍(图 5)。Cd²⁺+Cu²⁺ 组合,除最高浓度(0.05+0.1) mg/L 外,其余浓度对泥蚶脂肪酶活性的影响,前期起诱导作用,且在实验开始后的 2—5 d 内达到峰值,实验后期起微抑制或微诱导作用(图 6)。

比较实验第 30 天脂肪酶活性,发现受单一离子胁迫时,在相同的浓度下,Cu²⁺ 组泥蚶脂肪酶活性值明显低于 Cd²⁺ 组泥蚶。Cd²⁺+Cu²⁺ 组合的泥蚶脂肪酶活性值明显低于相对应浓度的单一 Cd²⁺ 组泥蚶或 Cu²⁺ 组泥蚶。

Two-way ANOVA 分析表明:在 Cd²⁺、Cu²⁺ 和 Cd²⁺+Cu²⁺ 胁迫过程中,浓度和时间对泥蚶脂肪酶活性影响均有显著性差异,时间与浓度的交互作用也显著地影响着脂肪酶的活性($P < 0.01$) (表 3)。

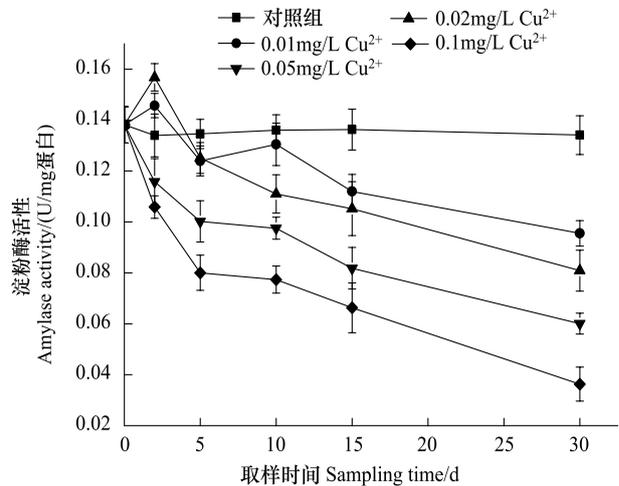


图 2 Cu²⁺ 胁迫下泥蚶淀粉酶活性的变化

Fig. 2 Time course changes of amylase activity of *Tegillarca granosa* exposed to copper

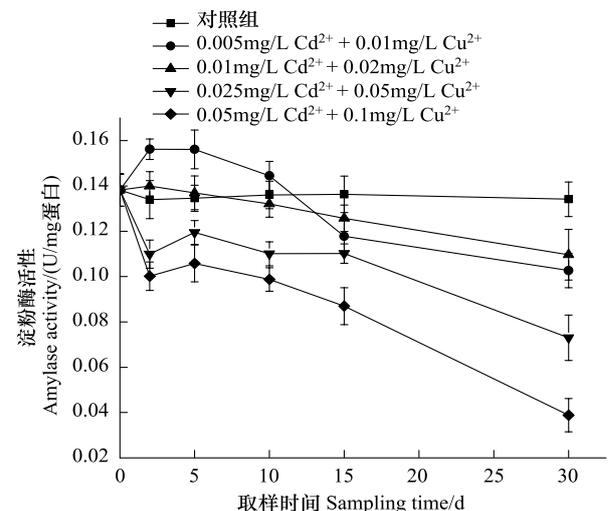


图 3 Cd²⁺+Cu²⁺ 组合胁迫下泥蚶淀粉酶活性的变化

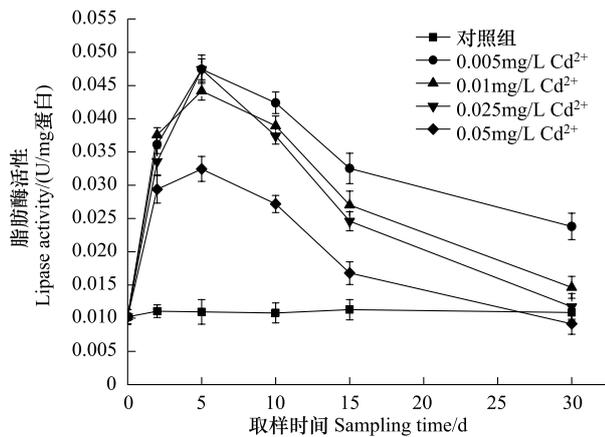
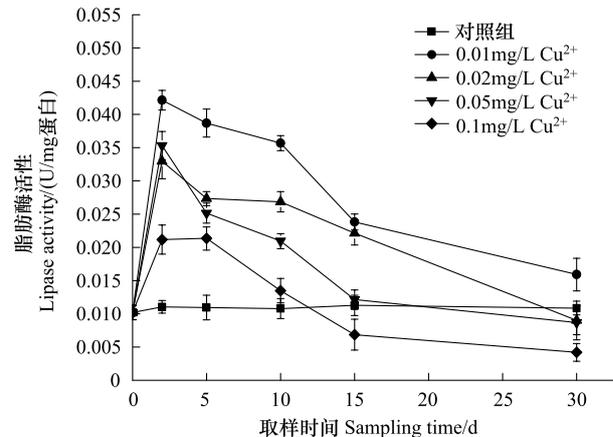
Fig. 3 Time course changes of amylase activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper

表 2 重金属胁迫下泥蚶淀粉酶活性的双因素方差分析结果

Table 2 The Two-way ANOVA result of amylase activity of *Tegillarca granosa* exposed to heavy metal

组别 Group	浓度 Concentration			时间 Time			浓度×时间 Concentration×Time		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
Cd ²⁺	4	14.447	0.005 **	5	3.79	<0.001 ***	20	0.892	0.597
Cu ²⁺	4	20.369	<0.001 ***	5	19.344	<0.001 ***	20	2.069	0.016 *
Cd ²⁺ +Cu ²⁺	4	32.977	<0.001 ***	5	28.752	<0.001 ***	20	4.273	<0.001 ***

df: 自由度; 显著性概率: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

图 4 Cd²⁺胁迫下泥蚶脂肪酶活性的变化Fig.4 Time course changes of lipase activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium图 5 Cu²⁺胁迫下泥蚶脂肪酶活性的变化Fig.5 Time course changes of lipase activity of *Tegillarca granosa* exposed to copper

2.3 Cd²⁺、Cu²⁺及其组合胁迫下泥蚶蛋白酶活性的变化

实验结果表明:与空白对照组相比,Cd²⁺、Cu²⁺的胁迫对泥蚶胃蛋白酶活性影响复杂。在Cd²⁺的胁迫下,实验前期,泥蚶胃蛋白酶活性受到诱导,且酶的活性呈现升高-降低-再升高-再降低的变化,在实验的第2天和第15天出现2个活性较强的峰,而实验后期,0.025、0.05 mg/L等较高浓度胁迫对泥蚶蛋白酶活性影响开始转化为抑制作用(图7)。在Cu²⁺的胁迫下,当浓度为0.01、0.02 mg/L时,泥蚶胃蛋白酶活性在实验的前25d呈先升高后降低的变化,此后,基本不受影响;当浓度为0.05 mg/L和0.1 mg/L时,分别在实验的4 d、9 d内对泥蚶的蛋白酶的活性起诱导作用,然后转化为抑制作用(图8)。Cd²⁺+Cu²⁺组合对泥蚶胃蛋白酶活性的影响更为复杂,在低浓度组合(0.005+0.01) mg/L和(0.01+0.02) mg/L胁迫下,泥蚶胃蛋白酶活性在实验前期受到诱导,都在实验的第2天和10天各出现1个峰($P < 0.05$),表现为升高-降低-升高-降低的变化,然后约在实验的第13天开始受到抑制。而在较高浓度组合(0.025+0.05) mg/L胁迫下,酶活在实验第5天时出现一个显著性诱导的峰值($P < 0.05$),最高浓度组合(0.05+0.1) mg/L对泥蚶胃蛋白酶的活性一直呈抑制作用(图9)。

比较实验第30天泥蚶胃蛋白酶活性值,发现受单一离子胁迫时,在相同的浓度下,Cu²⁺组明显低于Cd²⁺组。Cd²⁺+Cu²⁺组合明显低于相对应浓度的单一Cd²⁺组或Cu²⁺组值。

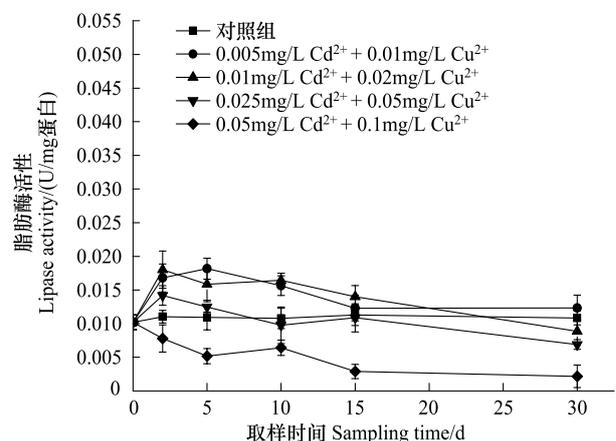
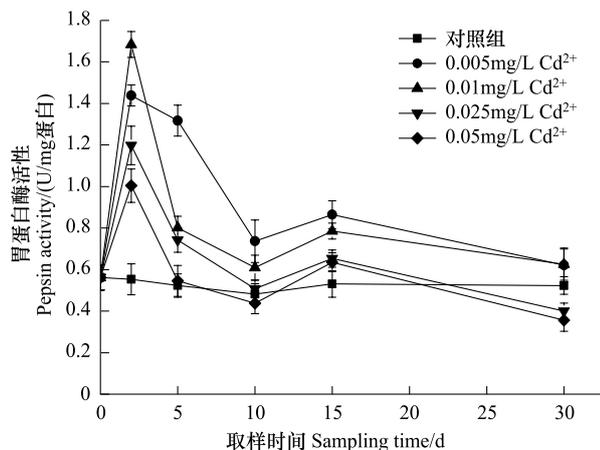
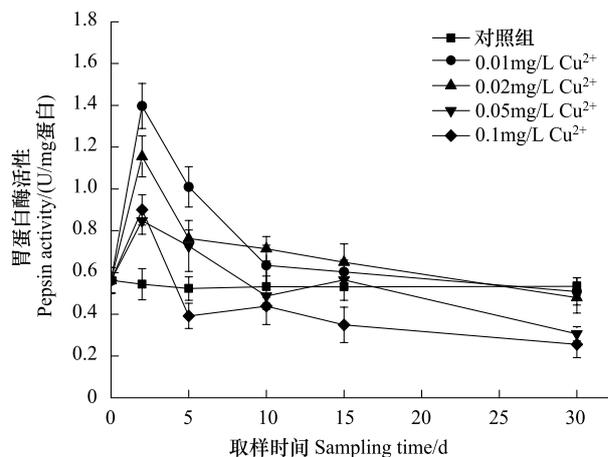
图 6 Cd²⁺+Cu²⁺组合胁迫下泥蚶脂肪酶活性的变化Fig.6 Time course changes of lipase activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper

表 3 重金属胁迫下泥蚶脂肪酶活性的双因素方差分析结果

组别 Group	浓度 Concentration			时间 Time			浓度×时间 Concentration×Time		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
Cd ²⁺	4	377.149	<0.001 ***	5	473.663	<0.001 ***	20	36.122	<0.001 ***
Cu ²⁺	4	23.068	<0.001 ***	5	24.967	<0.001 ***	20	2.586	0.002 **
Cd ²⁺ +Cu ²⁺	4	34.938	<0.001 ***	5	11.264	<0.001 ***	20	4.888	<0.001 ***

df: 自由度; 显著性概率: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

图 7 Cd²⁺ 胁迫下泥蚶胃蛋白酶活性的变化Fig. 7 Time course changes of pepsin activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium图 8 Cu²⁺ 胁迫下泥蚶胃蛋白酶活性的变化Fig. 8 Time course changes of pepsin activity of *Tegillarca granosa* exposed to copper

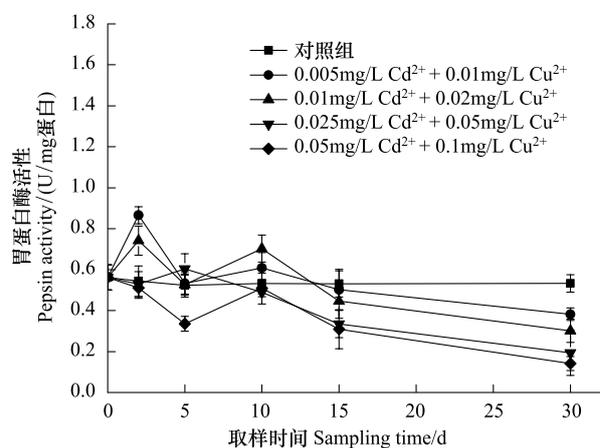
Two-way ANOVA 分析表明:在 Cd²⁺、Cu²⁺ 或 Cd²⁺ + Cu²⁺ 的胁迫过程中,浓度和时间对泥蚶蛋白酶活性均有显著性差异,时间与浓度的交互作用(Cu²⁺组除外)也极显著地影响着蛋白酶的活性($P < 0.01$)(表 4)。

3 讨论

3.1 重金属离子胁迫对底栖贝类消化酶活性的影响

本实验结果表明,Cd²⁺对泥蚶的淀粉酶活性影响,低浓度有诱导作用,高浓度有抑制作用;脂肪酶活性前期受到诱导,后期逐渐减弱;胃蛋白酶活性基本处于诱导状态,且呈升高—降低—再升高—再降低的变化规律。这与赖廷和^[10]报道在 Cd²⁺ 的胁迫下,红树蚶的淀粉酶基本表现为抑制作用;脂肪酶前期呈显著诱导,随着胁迫时间延长酶活性下降;蛋白酶的影响规律性不明显的研究结果不完全一致。其实,赖廷和实验的重金属 Cd²⁺ 浓度设定范围为 0.125—4.00 mg/L,其最低浓度

(0.125 mg/L)比本实验的最高浓度(0.05 mg/L)还高,二者的 Cd²⁺ 浓度范围不在同一个区间,所以二者的结果也无可比性,但可以认为,本实验是赖廷和试验较低浓度范围的延伸,是在较低浓度条件下 Cd²⁺ 对底栖贝类消化酶的影响研究的补充。至于为何赖廷和的实验 Cd²⁺ 对蛋白酶的影响效应规律性不明显,笔者认为,这可能是由于赖廷和实验设置的 Cd²⁺ 浓度过高,对生物体的消化酶分泌系统的基本活动已经造成损害,甚至影

图 9 Cd²⁺+Cu²⁺ 组合胁迫下泥蚶胃蛋白酶活性的变化Fig. 9 Time course changes of pepsin activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper

响正常生理功能。

表 4 重金属胁迫下泥蚶胃蛋白酶活性的双因素方差分析结果

Table 4 The Two-way ANOVA result of pepsin activity of *Tegillarca granosa* exposed to heavy metal

组别 Group	浓度 Concentration			时间 Time			浓度×时间 Concentration×Time		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
Cd ²⁺	4	32.458	<0.001 ***	5	61.465	<0.001 ***	20	6.802	<0.001 ***
Cu ²⁺	4	7.471	<0.001 ***	5	13.599	<0.001 ***	20	1.637	0.073
Cd ²⁺ +Cu ²⁺	4	11.424	<0.001 ***	5	28.359	<0.001 ***	20	3.602	<0.001 ***

df: 自由度; * 显著性概率: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

吴众望^[8]做过重金属 Cu²⁺ (浓度为 0.128、1.28、12.8、128、1280 mg/L) 对缢蛏消化酶的胁迫实验,发现浓度为 0.128、1.28 mg/L 的 Cu²⁺ 对缢蛏的淀粉酶活性有显著的促进作用,其余浓度 (12.8、128、1280mg/L) 的 Cu²⁺ 对缢蛏的淀粉酶活性的影响不显著;对缢蛏蛋白酶活性影响也不显著。估计这种结果也是实验设计的重金属浓度太高,超出了实验生物消化酶系统能够正常承受的胁迫范围。

与 ZHEN^[11] 等发现,消化酶活性与重金属之间存在明显的剂量效应不同,本实验前期的剂量效应规律性不明显,直到后期,特别是第 30 天测得的酶活值与重金属浓度表现出负相关性。究其原因,刚开始实验时,由于金属硫蛋白^[12] 等解毒系统的存在,致使泥蚶 3 种消化酶活性有不同程度的诱导或修复作用,表现出某些实验组别 (如 Cd²⁺ 胁迫下的淀粉酶) 剂量效应不明显;随着时间的延长和泥蚶体内重金属的大量富集,重金属对酶活的影响,呈明显的剂量效应。可见,泥蚶 3 种消化酶活性变化可以灵敏反映重金属对泥蚶生理的胁迫程度,还可作为重金属生态风险的评价指标。

3.2 组合金属离子对底栖贝类消化酶的毒性

比较相同浓度下单一的 Cd²⁺ 或 Cu²⁺ 对泥蚶 3 种消化酶活性影响,发现实验结束时 (第 30 天),泥蚶淀粉酶、脂肪酶和胃蛋白酶活性值 Cu²⁺ 组均明显低于 Cd²⁺ 组,说明对于泥蚶体内这 3 种消化酶活性而言,Cu²⁺ 对酶活的影响更显著,毒性强于 Cd²⁺,这与其他贝类急性毒性实验中^[13-14] 得到的 Cu²⁺ 的毒性要大于 Cd²⁺ 的结果相一致。比较组合 Cd²⁺+Cu²⁺ 与单一 Cd²⁺ 或 Cu²⁺,在组合 Cd²⁺+Cu²⁺ 的胁迫下,实验第 30 天泥蚶的脂肪酶和胃蛋白酶活性均明显低于任一单独重金属的胁迫,说明 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 对该 2 种泥蚶酶活性具有协同毒性作用。但对淀粉酶来说,2 种重金属的协同毒性作用对其活性的影响就没有那么明显,淀粉酶活性值介于单一的 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 作用下的活性值之间,相对毒性也介于两者之间。

3.3 重金属离子胁迫对生物消化酶影响机理的探讨

当重金属 Cd²⁺ 或 Cu²⁺ 进入泥蚶体内时,将引起泥蚶机体一系列的生理防御反应,少量重金属离子可能通过操纵基因作用诱导消化酶蛋白合成^[15],或者作为酶结构的辅基增强酶活性中心与底物间的配位结合,维持酶分子及其活性中心的特定结构,通过改变酶蛋白的表面电荷和酶催化反应的平衡^[16] 从而提高消化酶的活性,如实验前期低浓度组的 Cd²⁺、Cu²⁺ 和 Cd²⁺+Cu²⁺ 对泥蚶淀粉酶和脂肪酶活性的诱导,增强泥蚶的消化吸收利用能力用于补偿因应对不良环境所需的能量消耗,满足其代谢的能量需求^[17]。

本实验结果表明,在高浓度 0.025、0.05 mg/L Cd²⁺ 组、各浓度 Cu²⁺ 组和 Cd²⁺+Cu²⁺ 组合的胁迫下,泥蚶淀粉酶活性在实验后期均受到抑制,而在单一和组合重金属的胁迫下,随时间延长对泥蚶脂肪酶活性的诱导效应不断减弱,逐渐转变为抑制作用,并且浓度越高,转变的时间越早,酶活受到的抑制作用越强。同样,胃蛋白酶活性在实验后期基本上也呈抑制状态。总之,泥蚶长时间在重金属胁迫下,3 种消化酶活性都会受到不同程度的抑制,泥蚶通过这种方式减少进食量,降低新陈代谢速率^[18] 以减轻重金属对机体的损伤程度。Cu²⁺ 作为生物体的一种必需微量元素,与 Cd²⁺ 不同,只有在生物体内累积过多时才会产生致毒效应。一般认为致毒反应与生物体内金属硫蛋白 (Metallothionein, 简称 MT) 的合成有关,金属硫蛋白可以螯合和贮存多余的铜,或与 Cu²⁺ 形成结合物来维持细胞内 Cu²⁺ 的浓度,以减轻其毒性。但是当泥蚶体内累积的 Cu²⁺ 浓度过高时,MT

结合 Cu²⁺ 能力将达到饱和,而溢出的 Cu²⁺ 作用到其他生物大分子,如酶上,即引起酶活性的降低。对于 Cd²⁺ 来说,一种方式是通过取代酶蛋白中其他金属离子而导致酶活性的失去,已有研究表明淀粉酶是 Ca²⁺ 的依赖性酶,低浓度 Cd²⁺ 对酶活性有激活作用,而高浓度 Cd²⁺ 可能通过占据 Ca²⁺ 的结合位点,且与结合位点外的氨基酸残基结合使酶的构象改变,从而抑制酶的活性^[19]。Cd²⁺ 还可以取代机体中含锌酶中的锌,与锌指蛋白结合,使其失去功能^[20]。此外,还可结合酶分子中的咪唑基、巯基、羟基、氨基、肽基等功能基团从而达到抑制酶活的效果^[21]。

重金属离子 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 可能通过上述机制来影响消化酶的活性,但每种消化酶的作用机制也不完全相同。环境化学物的联合毒性作用类型主要有相加、协同、增强、拮抗和独立作用等类型,且目前未见 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 联合作用机理的研究报道,混合重金属之间又相互联系、相互影响的情况比较复杂,具体机制仍需进一步的探讨。

References:

- [1] Sun J L, Zhang Y P, Gao H. The effect of pH and temperature on protease activity in *Tegillarca granosa*. Fisheries Science, 2002, 21(6): 7-9.
- [2] Zhang Y P, Sun J L, Zhou H B. Seasonal changes in activity of some digestive enzymes in different ages of *Tegillarca granosa*. Chinese Journal of Zoology, 2003, 38(4): 28-31.
- [3] Fan D P, PAN L Q, Xiao G Q, Ma S, Dong S L. The effect of pH and temperature on digestive enzyme activity in *Sinonoracula constricta*. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003, (4): 69-73.
- [4] Supannapong P, Pimsalee T, A-komol T, Engkagul A, Kovitvadhi U, Kovitvadhi S, Rungruangsak-Torrissen K. Digestive enzymes and in-vitro digestibility of different species of phytoplankton for culture of the freshwater pearl mussel, *Hyriopsis (Hyriopsis) bialatus*. Aquaculture International, 2008, 16(5): 437-453.
- [5] Hassett R P, Landry M R. Seasonal changes in feeding rate, digestive enzyme activities and assimilation efficiency of *Calanus pacificus*. Marine Ecology-Progress Series, 1990, 62(3): 203-210.
- [6] Li J H, Wang Q H, Du X D, Zhang S F. Effects of temperature and pH on digestive enzyme activities in hepatopancreas of pearl oyster *Pinctada martensii*. Fisheries Science, 2011, 30(2): 115-117.
- [7] De Coen W M, Janssen C R. The use of biomarkers in *Daphnia magna* toxicity testing II. Digestive enzyme activity in *Daphnia magna* exposed to sublethal concentrations of cadmium, chromium and mercury. Chemosphere, 1997, 35(5): 1053-1067.
- [8] 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): 298-300.
- [9] Xin B F, Xie J J, Zhuang Q Y. Effects of metal ions on activities of amylase from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) Hepatopancreatic. Journal of Hydroecology, 2009, 2(3): 91-95.
- [10] Lai T H, He B Y, Fan H Q, Zhou R Q, Yang Y. 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). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3044-3053.
- [11] Chen Z, Mayer L M, Weston D P, Bock M J, Jumars P A. Inhibition of digestive enzyme activities by copper in the guts of various marine benthic invertebrates. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, 21(6): 1243-1248.
- [12] Bodar C W M, van der Sluis I, van Montfort J C P, Voogt P A, Zandee D I. Cadmium resistance in *Daphnia magna*. Aquatic Toxicology, 1990, 16(1): 33-39.
- [13] Li G J, Liu M X, Zhang S L, Bao W Y, Gu H K. The toxicity effect of Zn metal to *Chlamys farreri* juvenile. Marine Environmental Science, 1994, 13(2): 13-16.
- [14] Zhang Y K, Song X K, Liu A Y, Liu L J, Jiang X Y, Mm J X. Acute toxicity effects of Cd²⁺ and Cu²⁺ on *Meretrix meretrix* linnaeus. Transactions of Oceanology and Limnology, 2011, (3): 51-56.
- [15] Kong F X. Environmental Biology. Beijing: China Higher Education Press, 2000: 68-73.
- [16] He W X, Zhu M E, Zhang Y P. Recent advance in relationship between soil enzymes and heavy metals. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(2): 139-142.
- [17] Ribeiro S, Souza J P, Nogueira A J A, Soares A M V M. Effect of endosulfan and parathion on energy reserves and physiological parameters of the terrestrial isopod *Porcellio dilatatus*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, 49(2): 131-138.
- [18] Xu W J, Pan L Q, Yue F, Li J. Effects of ammonia-N stress on digestive enzyme activities of swimming crab *Portunus trituberculatus*. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2011, 41(6): 35-40.

- [19] Hong F S, Wang X F, Wu K, Shen S D, Su G X, Pan X F. Echanism of heavy metal ions on α -Amylase activity from porcine pancreas. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2001, 12(22): 1979-1983.
- [20] Ye H Q, Yang X L, Zhou J Y, Xu H B. The research progress of toxicity mechanism of environmental pollutant of cadmium. *Guangdong Trace Elements Science*, 2001, 8(3): 9-12.
- [21] Hu Y, Pan L Q. Effects of ten metal ions on digestive enzyme activities of *Portunus trituberculatus*. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(6): 52-57.

参考文献:

- [1] 孙建礼, 张永普, 高辉. 温度和 pH 值对乐清养殖泥蚶蛋白酶的影响. *水产科学*, 2002, 21(6): 7-9.
- [2] 张永普, 孙建礼, 周化斌. 不同年龄泥蚶几种消化酶活性的季节变化. *动物学杂志*, 2003, 38(4): 28-31.
- [3] 范德朋, 潘鲁青, 肖国强, 马牲, 董双林. 温度、pH 对缢蛏 (*Sinonoracula constricta*) 消化酶活力的影响. *海洋湖沼通报*, 2003, (4): 69-73.
- [6] 李俊辉, 王庆恒, 杜晓东, 张善发. 温度和 pH 对马氏珠母贝肝胰脏消化酶活力的影响. *水产学报*, 2011, 30(2): 115-117.
- [8] 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): 298-300.
- [9] 辛碧芬, 谢进金, 庄巧阳. 几种金属离子对鲢肝胰脏淀粉酶的影响. *水生态学杂志*, 2009, 2(3): 91-95.
- [10] 赖廷和, 何斌源, 范航清, 周如琼, 杨艳. 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. *生态学报*, 2011, 31(11): 3044-3053.
- [13] 李国基, 刘明星, 张首临, 包万友, 顾宏堪. Zn 等金属离子对栉孔稚贝成活的毒性影响. *海洋环境科学*, 1994, 13(2): 13-16.
- [14] 张宜奎, 宋秀凯, 刘爱英, 刘丽娟, 姜向阳, 马建新. 重金属 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 对文蛤的急性毒性. *海洋湖沼通报*, 2011, (3): 51-56.
- [15] 孔繁翔. *环境生物学*. 北京: 高等教育出版社, 2000: 68-73.
- [16] 和文祥, 朱铭莪, 张一平. 土壤酶与重金属关系的研究现状. *土壤与环境*, 2000, 9(2): 139-142.
- [18] 徐武杰, 潘鲁青, 岳峰, 李健. 氨氮胁迫对三疣梭子蟹消化酶活力的影响. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2011, 41(6): 35-40.
- [19] 洪法水, 王雪峰, 吴康, 沈颂东, 苏国兴, 潘新法. 重金属离子对猪胰 α -淀粉酶活性影响的作用机理研究. *高等学校化学学报*, 2001, 12(22): 1979-1983.
- [20] 叶寒青, 杨祥良, 周井炎, 徐辉碧. 环境污染物质毒性作用机理研究进展. *广东微量元素科学*, 2001, 8(3): 9-12.
- [21] 胡毅, 潘鲁青. 10 种金属离子对三疣梭子蟹中肠腺消化酶活性的影响. *热带海洋学报*, 2006, 25(6): 52-57.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.24 Dec., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures ZHAO Qiguo, HUANG Guoqin, MA Yanqin (7615)

Fundamentals of Ecology: promoting ecology from tradition to modern; To Commemorate The 100th Anniversary of E. P. Odum's Birthday BAO Qingde, ZHANG Xiufen (7623)

Food chain length theory: a review ZHANG Huan, HE Liang, ZHANG Peiyu, et al (7630)

Autecology & Fundamentals

Foraging and bed site selection of Tianshan argali (*Ovis ammon karelini*) in Central Tianshan Mountains in Summer LI Ye, YU Yuqun, SHI Jun, et al (7644)

Inhibition of pine coneworm, larvae *Dioryctria pryeri*, on herbivore-induced defenses of *Pinus tabulaeformis* ZHANG Xiao, LI Xiuling, LI Xingang, et al (7651)

Response of periphyton to nutrient level and relationships between periphyton and decay degree of *Potamogeton crispus* WEI Hongnong, PAN Jianlin, ZHAO Kai, et al (7661)

Correlative study between chemical constituents and ecological factors of *Notopterygii Rhizoma* Et Radix of endangered plateau plant HUANG Linfang, LI Wentao, WANG Zhen, et al (7667)

Induced changes in soil microbial transformation of nitrogen in maize rhizosphere by 4-year exposure to O₃ WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (7679)

Changes of digestive enzyme activity of *Tegillarca granosa* exposed to cadmium and copper CHEN Xiaoxiao, GAO Yetian, WU Hongxi, et al (7690)

Population, Community and Ecosystem

Population dynamics and density of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) in different habitats ZHENG Sining (7699)

Litter fall production and nutrient dynamic of *Cinnamomum camphora* and *Pinus massoniana* mixed forests in subtropics China LI Zhongwen, YAN Wende, ZHENG Wei, et al (7707)

Landscape, Regional and Global Ecology

Assessing the spatial representativeness of eddy covariance flux observation stations of terrestrial ecosystems in China WANG Shaoqiang, CHEN Diecong, ZHOU Lei, et al (7715)

The coupling relationship between variations of NDVI and change of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet, China LI Haidong, SHEN Weishou, CAI Bofeng, et al (7729)

Effects of higher resolution image and spatial grain size on landscape pattern in a small watershed of the farming-pastoral zone ZHANG Qingyin, FAN Jun (7739)

The changes of soil organic carbon and carbon management index in alpine steppe CAI Xiaobu, YU Baozheng, PENG Yuelin, et al (7748)

Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen at small scale in subalpine meadow and *Picea meyeri* forest in Luya Mountain WU Xiaogang, GUO Jinping, TIAN Xuping, et al (7756)

Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan, China SUN Weijun, FANG Xi, XIANG Wenhua, et al (7765)

The impact of sheet and gully erosion on soil aggregate losses in the black soil region of Northeast China JIANG Yiliang, ZHENG Fenli, WANG Bin, et al (7774)

Net nitrogen mineralization in soils of Napahai wetland in Northwest Yunnan XIE Chengjie, GUO Xuelian, YU Leichao, et al (7782)

- Variation of soil fertility in *Eucalyptus robusta* plantations after controlled burning in the red soil region and its ecological evaluation YANG Shangdong, WU Jun, TAN Hongwei, et al (7788)
- The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010 YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al (7798)
- Long-term dynamic simulation on forest landscape pattern changes in Mount Lushan LIANG Yanyan, ZHOU Nianxing, XIE Huiwei, et al (7807)
- Species habitat correlation analysis in temperate-subtropical ecological transition zone YUAN Zhiliang, CHEN Yun, WEI Boliang, et al (7819)
- Responses of Qilian junipers radial growth of different ecological environment and detrending method to climate change in Qinghai Province ZHANG RuiBo, YUAN Yujiang, WEI Wenshou, et al (7827)
- Resource and Industrial Ecology**
- The pattern of ecological capital in Daxiaoxinganling, Heilongjiang Province, China MA Lixin, QIN Xuebo, SUN Nan, et al (7838)
- Research and implementation of mobile data collection system for field survey of ecological environment SHEN Wenming, SUN Zhongping, ZHANG Xue, et al (7846)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- A remote sensing urban ecological index and its application XU Hanqiu (7853)
- Research Notes**
- Genetic diversity and DNA fingerprint of *Pleioblastus* by ISSR HUANG Shujun, CHEN Liguang, XIAO Yongtai, et al (7863)
- Comprehensive evaluation on photosynthetic and fluorescence characteristics in seedlings of 4 drought resistance species LU Guangchao, XU Jianxin, XUE Li, et al (7872)
- Stock difference of *Coelomactra antiquata* based on nuclear (ITS2) and mitochondrial (16S rRNA) DNA sequence and secondary structure MENG Xueping, SHEN Xin, ZHAO Nana, et al (7882)
- The mechanism of the characters of inorganic carbon acquisition to temperature in two *Ulva* species XU Juntian, WANG Xuwen, ZHONG Zhihai, et al (7892)
- Research on changes of dynamic characteristics of rainfall though *Platyclusus Orientalis* plantation canopy in Beijing Mountain Area SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jianhui, et al (7898)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 丁 平 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 33 卷 第 24 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 24 (December, 2013)

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

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

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

订 购 全国各地邮局

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

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

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

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



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 90.00 元