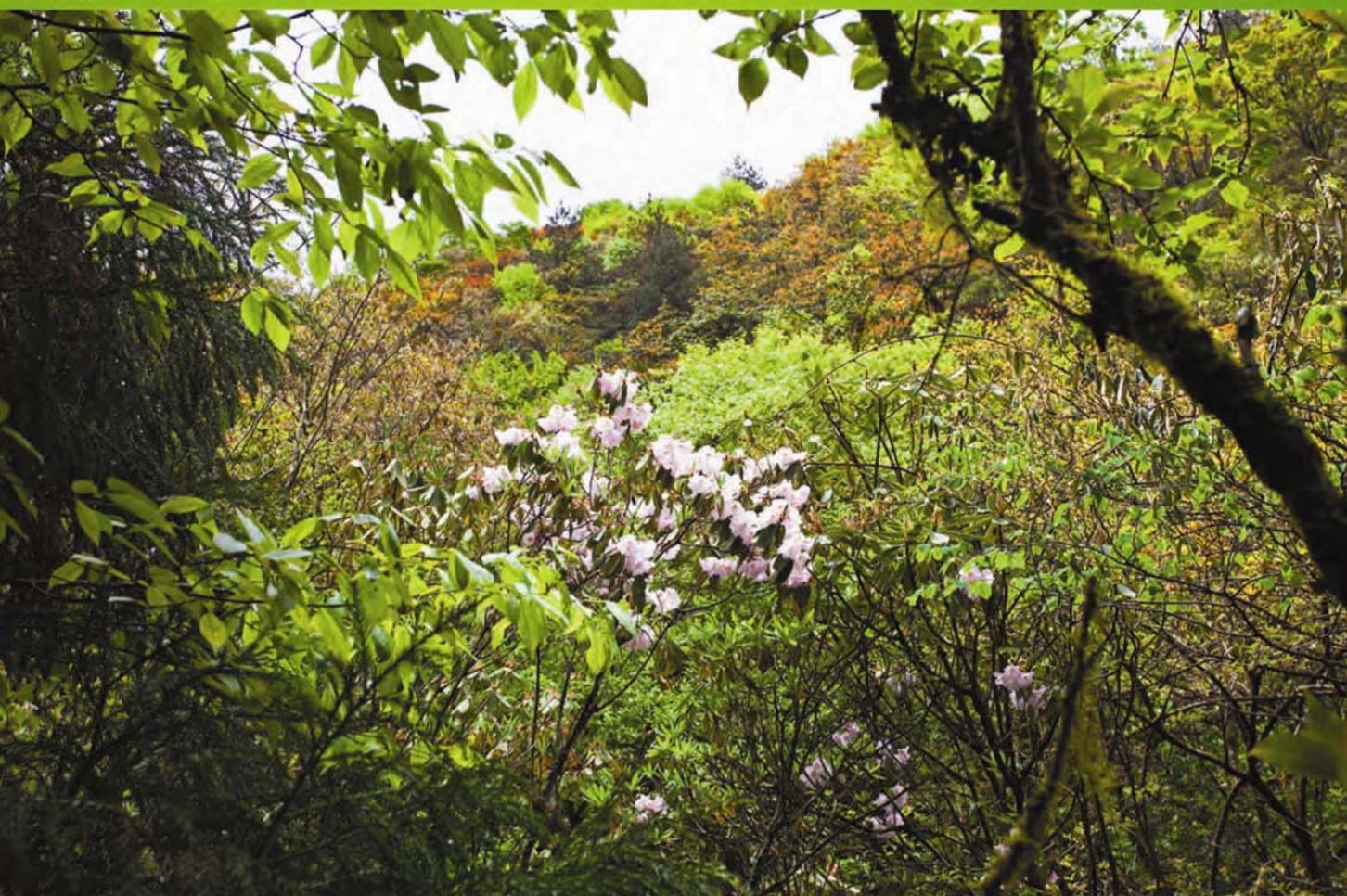


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 21 期 Vol.33 No.21 **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 21 期 2013 年 11 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究····· 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等 (6747)
- 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展····· 李国栋,张俊华,焦耿军,等 (6762)
- 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展····· 负娟莉,王艳芬,张洪勋 (6774)
- 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响····· 张云海,何念鹏,张光明,等 (6786)
- 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析····· 申效诚,张保石,张 锋,等 (6795)
- 风向因素对转基因抗虫棉花基因漂移效率的影响····· 朱家林,贺 娟,牛建群,等 (6803)

个体与基础生态

- 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点····· 孟昭翠,徐奎栋 (6813)
- 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究····· 吕巍巍,马长安,余 骥,等 (6825)
- 沔阳沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险····· 杨 阳,周正朝,王欢欢,等 (6834)
- 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响····· 李 玲,仇少君,檀菲菲,等 (6844)
- 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响····· 郑春芳,刘伟成,陈少波,等 (6853)
- 32 个切花菊品种的耐低磷特性····· 刘 鹏,陈素梅,房伟民,等 (6863)
- 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响····· 王召根,吴洪喜,陈肖肖,等 (6869)
- 角倍蚜虫瘦对盐肤木光合特性和总氮含量的影响····· 李 杨,杨子祥,陈晓鸣,等 (6876)
- 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦的降解特性····· 李冠喜,吴小芹,叶建仁 (6885)
- 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应····· 李为争,杨 雷,申小卫,等 (6895)

种群、群落和生态系统

- 白洋淀生态系统健康评价····· 徐 菲,赵彦伟,杨志峰,等 (6904)
- 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征····· 王 卉,钟 山,方展强 (6913)
- 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系····· 朱先进,于贵瑞,王秋风,等 (6925)
- 抚育间伐对油松人工林下大型真菌的影响····· 陈 晓,白淑兰,刘 勇,等 (6935)
- 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性····· 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等 (6944)
- 土霉素对堆肥过程中酶活性和微生物群落代谢的影响····· 陈智学,谷 洁,高 华,等 (6957)

景观、区域和全球生态

- 兴安落叶松针叶解剖结构变化及其光合能力对气候变化的适应性····· 季子敬,全先奎,王传宽 (6967)
- 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究····· 张华兵,刘红玉,李玉凤,等 (6975)

半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应 马赞花,张铜会,刘新平 (6984)

SWAT 模型融雪模块的改进 余文君,南卓铜,赵彦博,等 (6992)

科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应 常学礼,赵学勇,王 玮,等 (7002)

贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等 (7013)

三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素 吴述园,葛继稳,苗文杰,等 (7023)

资源与产业生态

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例 黄 翌,汪云甲,李效顺,等 (7035)

学术信息与动态

《中国当代生态学研究》新书推介 刘某承 (7044)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 300 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2013-11



封面图说: 百山祖保护区森林植物群落——百山祖国家级自然保护区位于浙西南闽浙交界处,由福建武夷山向东北伸展而成,主峰海拔 1856.7m,为浙江省第二高峰。其独特的地形和水文地理环境形成了中亚热带气候区中一个特殊的区域,保存着十分丰富的植物种质资源以及国家重点保护野生动植物种,尤其是 1987 年由国际物种保护委员会列为世界最濒危的 12 种植物之一的百山祖冷杉,是第四纪冰川的孑遗植物,素有“活化石”之称。随着海拔的升高,其植被为常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、针叶林、山地矮林和山地灌草丛。

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/stxb201207020922

王召根, 吴洪喜, 陈肖肖, 高业田. 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响. 生态学报, 2013, 33(21): 6869-6875.

Wang Z G, Wu H X, Chen X X, Gao Y T. Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6869-6875.

年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响

王召根^{1,2}, 吴洪喜^{2,3,*}, 陈肖肖^{2,4}, 高业田^{1,2}

(1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 2. 浙江省海洋水产养殖研究所, 温州 325000;

3. 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 温州 325005; 4. 华东理工大学 生物与化学工程学院, 上海 200237)

摘要: 采用实验生态学的方法研究了不同年龄、暴露时间、水温和盐度对泥蚶 (*Tegillarca granosa*) 富集重金属 Cd、Cu 的影响。在重金属 Cd 和 Cu 的浓度分别为 0.5mg/L 和 1mg/L 海水中, 实验 96h 后, 泥蚶对重金属 Cd、Cu 的吸收和富集能力呈现以下规律: (1) 与年龄的大小成反比, 1 龄组和 3 龄组泥蚶软体部中重金属 Cd、Cu 的含量分别为 60.434、38.598 $\mu\text{g/g}$ 和 30.914、21.617 $\mu\text{g/g}$; (2) 随暴露时间的延长而增强, 暴露 7 天后泥蚶软体部重金属 Cd 和 Cu 的含量分别达 118.293 $\mu\text{g/g}$ 和 315.328 $\mu\text{g/g}$; (3) 与水温的高低成正比, 水温 15 $^{\circ}\text{C}$ 组与 30 $^{\circ}\text{C}$ 组的泥蚶软体部中重金属 Cd、Cu 的含量分别为 44.524、33.805 $\mu\text{g/g}$ 和 125.859、576.504 $\mu\text{g/g}$; (4) 与海水的盐度成反比, 盐度 10 组和盐度 30 组的泥蚶软体部中重金属 Cd、Cu 的含量分别为 69.958、32.226 $\mu\text{g/g}$ 和 10.191、12.564 $\mu\text{g/g}$ 。(5) 泥蚶对重金属 Cd、Cu 的吸收和富集量以外套膜为最高, 分别达 131.433、289.432 $\mu\text{g/g}$; 闭壳肌最低, 分别为 34.812、47.759 $\mu\text{g/g}$ 。重金属 Cd 和 Cu 在不同组织器官中含量分别为: 外套膜>内脏>鳃>足>闭壳肌和外套膜>鳃>内脏>足>闭壳肌。

关键词: 年龄; 环境条件; 泥蚶; 镉; 铜; 富集

Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa*

WANG Zhaogen^{1,2}, WU Hongxi^{2,3,*}, CHEN Xiaoxiao^{2,4}, GAO Yetian^{1,2}

1 Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2 Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China

3 Zhejiang Key Lab of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-Resource, Wenzhou 325005, China

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

Abstract: The effects of various animal ages, somatic tissues, exposure times, seawater temperatures, and salinities on the accumulation of heavy metals, cadmium and copper, in *Tegillarca granosa* were investigated in the present study. When exposed to 0.5 mg/L cadmium and 1mg/L copper respectively, the accumulations of cadmium and copper in *T. granosa* were significantly influenced by the age of tested animal and environmental conditions. (1) The accumulations of cadmium and copper in somatic tissues were shown to be negatively related to the age of *T. granosa*. The elder *T. granosa* (three-years old) accumulated significant less heavy metal than the younger ones (one-year old). (2) During a seven days' heavy metal exposure, the cadmium and copper accumulated in somatic tissues of *T. granosa* increased with the exposure time increased, and reached 118.293 $\mu\text{g/g}$ and 315.328 $\mu\text{g/g}$ for cadmium and copper, respectively. (3) The accumulations of cadmium and copper in *T. granosa* were positively correlated to the water temperature. The concentrations of heavy metals in somatic tissues of *T. granosa* reached 125.859 $\mu\text{g/g}$ and 576.504 $\mu\text{g/g}$ for cadmium and copper respectively in the highest

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资助项目 (2010F30003)

收稿日期: 2012-07-02; 修订日期: 2012-11-19

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

temperature (30 °C) experimental trials, which were significant greater than 44.524 $\mu\text{g/g}$ cadmium and 33.805 $\mu\text{g/g}$ copper accumulated in the lowest temperature (15 °C) trials. (4) The accumulations of cadmium and copper in *T. granosa* were negatively affected by increased salinity. In the 10 ‰ salinity experimental trials, 69.958 $\mu\text{g/g}$ cadmium and 32.226 $\mu\text{g/g}$ copper were accumulated in *T. granosa*, which were significantly greater than 10.191 $\mu\text{g/g}$ cadmium and 12.564 $\mu\text{g/g}$ copper accumulated in the 30 ‰ salinity trials. (5) After 96 hours' heavy metal exposure, there were significant heavy metal content differences in various tissues. Cadmium and copper are mainly accumulated in the mantle of *T. granosa* and the concentrations reached 131.433 $\mu\text{g/g}$ and 289.432 $\mu\text{g/g}$ for cadmium and copper, respectively. Least cadmium (34.812 $\mu\text{g/g}$) and copper (47.759 $\mu\text{g/g}$) were accumulated in the adductor muscles. In general, the heavy metal accumulated in various tissues following decreasing order as mantle > viscera > gill > foot > adductor muscle for cadmium and mantle > gill > viscera > foot > adductor muscle for copper, respectively.

Key Words: age; environmental conditions; *Tegillarca granosa*; Cd; Cu; accumulation

泥蚶 (*Tegillarca granosa*), 俗称花蚶、血蚶、粒蚶等, 属双壳类, 常见于印度洋及太平洋的热带、亚热带近岸海域, 我国山东半岛以南诸海区均有分布, 是我国山东、江苏、浙江、福建、广西等省的主要养殖贝类之一。泥蚶等双壳类由于自身用于代谢的混合氧化系统存在缺陷, 对重金属的释放与鱼类和甲壳类动物相比慢得多, 导致体内重金属含量不断升高^[1-3], 也就是所谓的对重金属离子的富集作用^[4-6], 双壳类中的泥蚶是近年来出现重金属含量超标现象较多的种类之一。人类食用受重金属污染的贝类会造成不同程度的中毒现象^[7-9]。

关于贝类富集重金属的研究报道已有不少, 初步表明影响重金属富集的主要因子包括自身生物因子和非生物因子^[10-12], 但其具体机理尚不十分清楚^[13]。本文以我国浙江沿海一带的主要养殖贝类泥蚶为研究对象, 探讨了年龄、暴露时间、水温和盐度对泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的影响, 以为研究贝类富集重金属机理提供参考, 同时为新的近岸海域水质标准的制定, 全面有效地防治日益严重的海洋重金属污染提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 实验生物与暂养

实验生物泥蚶于 2011 年 11 月取自浙江省温州市乐清湾清江养殖区, 其生物学数据用游标卡尺和电子天平进行测量和称重, 测定结果见表 1。

表 1 实验生物泥蚶的生物学数据测定结果

Table 1 Biological data of the experimental *Tegillarca granosa* (Mean \pm SD, $n=10$)

实验组 Experiment group	壳长 Shell length/mm	壳宽 Shell width/mm	壳高 Shell height/mm	个体湿重 Wet weight/g
1 龄 1	16.11 \pm 0.66	11.01 \pm 0.77	12.58 \pm 0.50	1.69 \pm 0.23
2 龄	22.03 \pm 1.18	14.76 \pm 0.62	17.07 \pm 0.83	4.12 \pm 0.54
3 龄	27.63 \pm 1.68	18.52 \pm 0.82	21.29 \pm 1.08	7.74 \pm 1.04

实验用的自然海水取自浙江省温州市乐清湾海区, 经沉淀、砂滤、曝气后使用。盐度 25—27, pH 值 8.03—8.28, 水温 (17.47 \pm 1.82) °C。油类、总汞、铜、锌、铅、镉、铬等指标均符合《渔业水质标准》(GB11607—89)。

经挑选的健康泥蚶个体, 在清洗掉表面附着物后, 放入水族箱中暂养。暂养期间不间断充气, 每天换水 1/2, 换水后投喂扁藻 (*Platymonas subcordiformis*) 饵料, 密度为 5 \times 10⁴ 细胞/mL, 泥蚶个体在暂养 1 周后供实验使用。

1.2 Cd²⁺ 和 Cu²⁺ 母液配制与实验设计

分别用分析纯氯化镉 (CdCl₂·2.5H₂O) 和分析纯硫酸铜 (CuSO₄·5H₂O) 与去离子水配成质量浓度为 10mg/L

的 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 母液备用。

除暴露时间实验使用泥蚶 20 个外,其余实验均使用泥蚶 10 个。将实验泥蚶放入 6L 塑料盆中,向每个盆注入海水 3L,再用配制好的重金属母液调节到《渔业水质标准》中相应重金属限量值的 100 倍,即分别为 0.5mg/L 的 Cd^{2+} 和 1mg/L 的 Cu^{2+} 。实验期间连续充气,不投饵,每隔 24h 换入含有相应浓度重金属的新鲜海水,每个实验组设置 3 个平行。实验时间除暴露时间实验延长至 7d 外,其它均为 96h。各实验组的具体方案设计如下:

年龄实验 设定 1 龄蚶、2 龄蚶、3 龄蚶 3 个年龄梯度。

组织器官实验 均用 2 龄蚶,实验结束后分别测定泥蚶鳃、外套膜、内脏、足和闭壳肌中重金属 Cd 和 Cu 的含量。

暴露时间实验 均用 2 龄蚶,分别于实验 1、2、3、4d 和 7d 后取样。

水温实验 设 4 个温度梯度,分别为 15、20、25、30℃。均用 2 龄蚶,实验前对泥蚶进行 1 周的温度驯化。使用水浴箱调控不同水温。

盐度实验 设 5 个盐度梯度,分别为 10、15、20、25、30。均用 2 龄蚶,实验前对泥蚶进行 1 周的盐度驯化。不同盐度的实验海水用自然海水、曝气自来水和海水晶配置。

1.3 取样与测定

根据实验设计,除暴露时间实验分别于 1、2、3、4d 和 7d 后随机抽取 3 个泥蚶样品外,其它均在实验结束后随机抽取 3 个泥蚶样品,除组织器官实验特取指定部位外,其它实验均取泥蚶的整个软体部,样品在 80℃ 烘箱中烘至恒重,冷却后将样品研磨成粉,分别装入密封袋中,干燥保存。

分别称取 0.2g 左右的泥蚶软体部或组织器官样品和扇贝标准物质 (GBW10024),在 80℃ 烘箱中烘至恒重,冷却后称量。微波消解仪消解后用火焰原子吸收分光光度法 (AA240FS/GFA, Valian) 测定样品中的重金属 Cd、Cu 含量。分析过程中使用扇贝标准物质做回收率监测 (实际测得回收率为 90.36%—108.25%)。

1.4 数据处理

实验数据利用 SPSS 统计软件 (版本:19.0) 进行单因素方差分析 (ANOVA),定为 $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。数据统计结果表示为平均值 \pm 标准偏差 (Mean \pm SD)。

2 结果与分析

2.1 不同年龄泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的能力

图 1 为不同年龄泥蚶组富集重金属 Cd 和 Cu 的实验结果。可见,泥蚶对重金属 Cd 和 Cu 的富集能力与年龄的大小成反比,实验 96h 后 1 龄组和 3 龄组软体部中重金属 Cd、Cu 的含量分别为 60.434、38.598 $\mu\text{g/g}$ 和 30.914、21.617 $\mu\text{g/g}$ 。方差分析 (ANOVA) 表明,1 龄泥蚶对重金属 Cd、Cu 的富集能力显著高于其它年龄组 ($P < 0.05$)。各年龄组间泥蚶软体部中的重金属 Cd 含量存在显著性差异 ($P < 0.05$); 2 龄和 3 龄泥蚶软体部中的重金属 Cu 含量没有显著性差异 ($P > 0.05$),其余各年龄组间都有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.2 泥蚶不同组织器官富集重金属 Cd、Cu 的能力

泥蚶不同组织器官富集重金属 Cd、Cu 的实验结果见图 2。实验 96h 后,各组织器官中重金属 Cd 和 Cu 的含量顺序分别为:外套膜 > 内脏 > 鳃 > 足 > 闭壳肌和外套膜 > 鳃 > 内脏 > 足 > 闭壳肌。重金属 Cd 和 Cu 的含量在 5 种组织中,以外套膜最高,分别达 131.433、289.432 $\mu\text{g/g}$; 闭壳肌最低,分别为 34.812、47.759 $\mu\text{g/g}$ 。方差分析 (ANOVA) 表明:5 种组织中,重金属 Cd 含量在鳃和内脏、闭壳肌和足之间的差异性不显著 ($P > 0.05$),其余各组织之间差异性显著 ($P < 0.05$); 重金属 Cu 含量在外套膜和鳃、内脏和足、足和闭壳肌之间的差异性不显著 ($P > 0.05$),其余各组织间差异性显著 ($P < 0.05$)。

2.3 暴露时间对泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的影响

实验结果表明 (表 2),泥蚶对重金属 Cd 和 Cu 的富集量随暴露时间的延长而上升,暴露 7d 后重金属 Cd 和 Cu 的含量高达 118.293 $\mu\text{g/g}$ 和 315.328 $\mu\text{g/g}$ 。对泥蚶在重金属 Cd 和 Cu 环境中暴露不同时间的实验结果

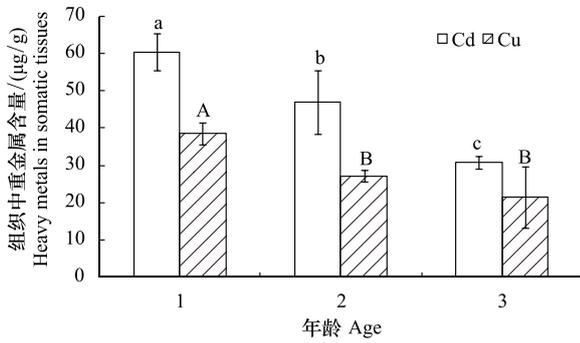


图1 不同年龄的泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的情况

Fig.1 Accumulation of Cd, Cu in somatic tissues of *Tegillarca granosa* at different ages

标有不同字母的数值间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

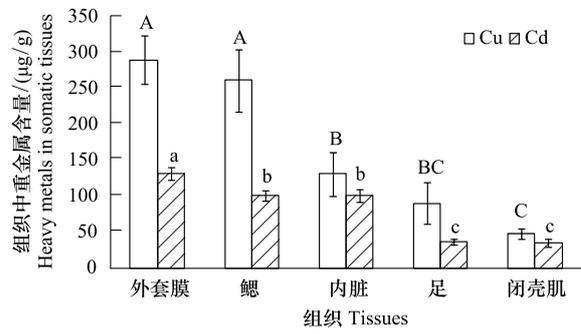


图2 泥蚶不同组织器官富集重金属 Cd、Cu 的情况

Fig.2 Accumulation of Cd, Cu in various tissues of *Tegillarca granosa*

标有不同字母的数值间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

多重比较显示,不同暴露时间的实验组泥蚶软体部富集重金属 Cd、Cu 的含量差异性显著 ($P < 0.05$)。泥蚶软体部中的重金属 Cd 含量,暴露时间 2d 和 3d 的组间差异性不显著 ($P > 0.05$),其它组间差异性显著 ($P < 0.05$);泥蚶软体部中重金属 Cu 含量,暴露时间 1d 和 2、2d 和 3d 组之间的差异性不显著 ($P > 0.05$),其它组间的差异性显著 ($P < 0.05$)。直线回归分析结果表明(图 3),泥蚶体内重金属 Cd 和 Cu 的含量与暴露时间之间呈显著的正相关关系 ($P < 0.01$),其直线回归方程式分别为: $y_1 = 47.06t - 25.46$ ($R^2 = 0.987$) 和 $y_2 = 13.54t + 27.74$ ($R^2 = 0.941$),式中 y_1 为泥蚶体内 Cd 含量 ($\mu\text{g/g}$ 干重), y_2 为泥蚶体内 Cu 含量 ($\mu\text{g/g}$ 干重), t 为暴露时间。

表2 暴露时间对泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的影响

Table 2 Effects of exposure times on the accumulation of heavy metals (Cd and Cu) in somatic tissues of *Tegillarca granosa*

暴露时间 Exposure time/d	Cd 含量 Cd content/($\mu\text{g/g}$)	Cu 含量 Cu content/($\mu\text{g/g}$)
1	30.737±5.945 ^d	33.872±0.608 ^d
2	64.085±3.664 ^c	73.526±2.748 ^{cd}
3	69.028±3.891 ^c	97.401±25.900 ^c
4	87.093±4.286 ^b	162.062±37.099 ^b
7	118.293±14.174 ^a	315.328±48.211 ^a

同列数值上字母不同,表示组间差异性显著 ($P < 0.05$)

2.4 水温对泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的影响

实验结果(表 3)显示,泥蚶对重金属 Cd 和 Cu 的富集能力随水温的升高而增强,实验 96 小时后,水温 15℃ 组与水温 30℃ 组的泥蚶软体部中重金属 Cd、Cu 的含量分别为 44.524 $\mu\text{g/g}$ 、33.805 $\mu\text{g/g}$ 和 125.859 $\mu\text{g/g}$ 、576.504 $\mu\text{g/g}$ 。方差分析(ANOVA)表明,水温对泥蚶软体部富集重金属 Cd 和 Cu 具有极显著的影响 ($P < 0.01$),泥蚶软体部中重金属 Cd 和 Cu 的含量在不同温度实验组间均差异显著 ($P < 0.05$)。直线回归分析结果表明(图 4),泥蚶体内重金属 Cd 和 Cu 的含量与暴露水体温度之间呈显著的正相关关系 ($P < 0.05$),其直线回

表3 水温对泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的影响

Table 3 Effects of seawater temperature on the accumulation of heavy metals (Cd and Cu) in somatic tissues of *Tegillarca granosa*

温度 Temperature/°C	Cd 含量 Cd content/($\mu\text{g/g}$)	Cu 含量 Cu content/($\mu\text{g/g}$)
15	44.524±2.823 ^d	33.805±3.685 ^d
20	82.774±4.474 ^c	127.075±24.474 ^c
25	101.222±10.225 ^b	433.002±87.546 ^b
30	125.859±7.488 ^a	576.504±10.450 ^a

同列数值上字母不同,表示组间差异性显著 ($P < 0.05$)

归方程式分别为: $y_1 = 5.254x + 29.64$ ($R^2 = 0.977$) 和 $y_2 = 38.65x - 577.2$ ($R^2 = 0.960$), 式中 y_1 为泥蚶体内 Cd 含量 ($\mu\text{g/g}$ 干重), y_2 为泥蚶体内 Cu 含量 ($\mu\text{g/g}$ 干重), x 为水温。

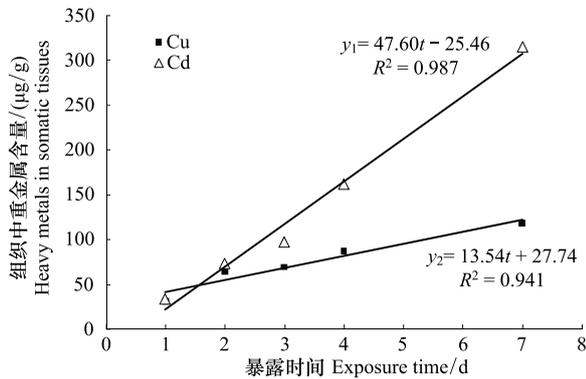


图3 泥蚶体内重金属 Cd 和 Cu 的含量与暴露时间之间的相关性

Fig.3 Correlation between the heavy metals (Cd and Cu) in somatic tissues of *Tegillarca granosa* and the exposure times

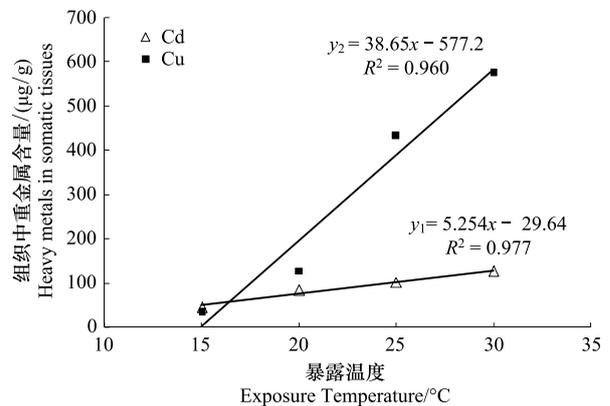


图4 泥蚶体内重金属 Cd 和 Cu 的含量与水温之间的相关性

Fig.4 Correlation between the heavy metals (Cd and Cu) in somatic tissues of *Tegillarca granosa* and the water temperature

2.5 盐度对泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的影响

实验结果(表4)表明,泥蚶对重金属 Cd 和 Cu 的富集能力随海水盐度的升高而下降,在海水中重金属 Cd 和 Cu 浓度分别为 0.5mg/L 和 1.0mg/L 的条件下,实验时间 96h 后,盐度 10 组和盐度 30 组泥蚶软体部中重金属 Cd、Cu 的含量分别为 69.958、32.226 $\mu\text{g/g}$ 和 10.191、12.564 $\mu\text{g/g}$ 。方差分析(ANOVA)表明,盐度对泥蚶软体部重金属 Cd 和 Cu 的富集能力具有极显著的影响($P < 0.01$)。各盐度组间泥蚶软体部重金属 Cd 含量存在显著差异($P < 0.05$);15、20 和 25 盐度组间重金属 Cu 含量差异不显著($P > 0.05$),其余盐度组间差异性显著($P < 0.05$)。直线回归分析结果表明(图5),泥蚶体内重金属 Cd 和 Cu 的含量与海水盐度之间呈显著的负相关关系($P < 0.05$),其直线回归方程式分别为: $y_1 = -2.86x - 96.2$ ($R^2 = 0.986$) 和 $y_2 = -0.848x + 39.14$ ($R^2 = 0.920$), 式中 y_1 为泥蚶体内 Cd 含量 ($\mu\text{g/g}$ 干重), y_2 为泥蚶体内 Cu 含量 ($\mu\text{g/g}$ 干重), x 为盐度。

表4 盐度对泥蚶富集重金属 Cd、Cu 的影响

Table 4 Effects of salinity on the accumulation of heavy metals (Cd and Cu) in somatic tissues of *Tegillarca granosa*

盐度 Salinity	Cd 含量 Cd content/($\mu\text{g/g}$)	Cu 含量 Cu content/($\mu\text{g/g}$)
10	69.958 \pm 6.736 ^a	32.226 \pm 4.259 ^a
15	49.264 \pm 4.716 ^b	23.633 \pm 2.155 ^b
20	40.159 \pm 2.672 ^c	22.728 \pm 2.518 ^b
25	26.166 \pm 3.076 ^d	19.969 \pm 1.601 ^b
30	10.191 \pm 3.213 ^e	12.564 \pm 2.196 ^c

同列数值上字母不同,表示组间差异显著($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 年龄对贝类生物富集重金属的影响分析

本实验结果表明泥蚶对重金属 Cd、Cu 的富集能力随年龄增加而下降,类似的规律也见于其它的研究报道。如:吴玉霖^[14]发现毛蚶 (*Scapharca subcrenata*) 年龄小的比年龄大的对重金属 Hg 有较强的富集能力; Dewolf^[15]研究表明采集于同一地点的紫贻贝 (*Mytilus edulis*), 较小个体比较大个体含有较高浓度的重金属 Hg; Boyden^[16]也报道了紫贻贝体内重金属 Pb、Cu、Zn 和 Fe 的浓度随年龄的增加而减少。可见,贝类生物体的年龄与其体内重金属含量之间呈负相关是较为普遍的现象。这可能是由于年龄较小的贝类生物处于较快的生长阶段,其新陈代谢更为旺盛^[17], 因此具有对重金属较强的富集能力。

3.2 贝类不同组织器官富集重金属的能力分析

生物的不同组织器官对重金属 Cd 和 Cu 的富集能力普遍具有较大差异。崔可铎等^[12]报道了毛蚶对重金属 Cd、Cu、Pb、Ni 和 Cr 的富集能力大小顺序,依次为:鳃>外套膜>闭壳肌>内脏>肌肉。蔡立哲等^[18]报道了重金属 Zn、Pb 在菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*) 2 种器官的富集系数大小顺序为:鳃>软体部。本实验的研究结果表明各组织中重金属 Cd 和 Cu 的含量顺序分别为:外套膜>内脏>鳃>足>闭壳肌和外套膜>鳃>内脏>足>闭壳肌。在泥蚶的呼吸代谢过程中,鳃和外套膜是泥蚶与外界水体交换首先接触和关系最为密切的器官,水体中的溶解态重金属更容易被其吸收,因而有可能含有较高的重金属含量。内脏作为泥蚶的解毒和排泄器官,也成为重金属富集的主要场所。因此,泥蚶不同组织器官对同一种重金属或不同种重金属的富集机制很有可能是不同的^[19]。

3.3 暴露时间对贝类富集重金属的影响

本实验结果表明泥蚶软体部内重金属 Cd、Cu 含量随暴露时间延长而增加,与崔可铎等^[12]在毛蚶富集和排出实验结果很相似,毛蚶对 Cu、Pb、Ni、Cr 和 Cd 都有一定的富集能力,富集量随着时间的延长而增加。可见,双壳类软体动物富集重金属有着共同的特性,暴露在重金属污染的水环境中进行呼吸代谢的同时也不断地富集重金属,而且时间越长,富集越多。

3.4 水温对贝类富集重金属的影响

由于水生动物不能调节自身的体温,环境温度的改变将显著影响其生理活动,尤其是机体的代谢活动,而且也能影响周围环境中重金属的化学性质,因此,温度是影响水生动物富集重金属的重要影响因子^[20]。Fischer^[21]在研究紫贻贝对 Cd 的富集与暴露温度的关系时发现:紫贻贝软组织中 Cd 浓度,25℃时最高,5℃时最低;Watkins^[22]也认为紫贻贝对溶解态 Cd 的富集与暴露温度呈依赖性关系;Denton^[23]的研究证实,在相同盐度下,黑唇牡蛎(*Pinctata margaritifera*)在高温(36℃)时对重金属 Hg、Cd 的吸收速率明显比低温时快。本实验的结果与上述结果基本一致,表明水温高,生物体新陈代谢旺盛,生物体对水体中重金属吸收和富集增多。

3.5 盐度对贝类富集重金属的影响

有关盐度对水生动物累积、吸收溶解态重金属的影响已经进行了大量的研究,本研究表明泥蚶对重金属 Cd、Cu 的富集随水体盐度的升高而下降。此结果与之前的一些学者的研究结果具有同样的规律。例如,Wang 等^[24]的研究表明,当盐度由 34 降至 15 时,紫贻贝对 Cd 和 Zn 的吸收率增加了 1.5—1.6 倍。Lee 等^[25]也报道过当盐度由 30 降至 10 时,2 种蛤仔:黑龙江河蓝蛤(*Potamocorbula amurensis*)和饰带白樱蛤(*Macoma balthica*)对 Cd 和 Cr 的吸收率平均增加了 1.5—2.2 倍。但到目前为止,盐度对双壳类富集重金属影响的机理尚不清楚。Bass 推测随着盐度的降低,双壳类的呼吸代谢加快,耗氧量增加,于是需要提高空气流通速率,进而导致了贝类对金属的富集加强^[11]。此外,盐度的变化也有可能影响金属在水体中的形态和金属间的相互作用,从而影响到生物对金属的可利用性^[22]。

References:

- [1] Cai L Z, Liu Q Y, Hong H S. Metal-accumulation of *Ruditapes philippinarum* in high zinc and lead experimental waters. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1998, 17(4): 456-461.
- [2] Ma Z Y, Liu H, Yao B, Ji H M, Wang S B, Zhang T. Studies on the bioaccumulation of Cd, Cu, Zn in some macrobenthos. *Chinese Research*

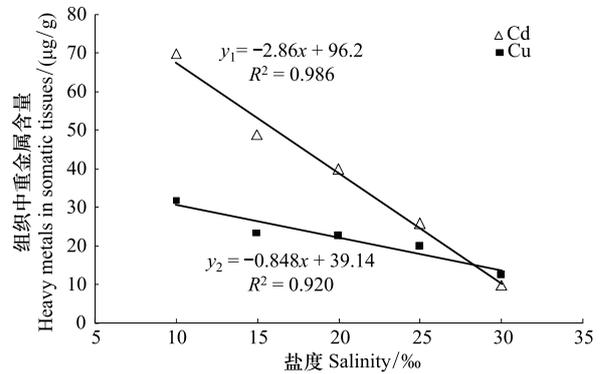


图5 泥蚶体内重金属 Cd 和 Cu 的含量与盐度之间的相关性

Fig.5 Correlation between the heavy metals (Cd and Cu) in somatic tissues of *Tegillarca granosa* and the salinity

- Academy of Environmental Sciences, 1997, 17(2): 151-155.
- [3] Chen R, Shen J C, Cai D J. Accumulation, release and control of three kinds of arsenides in fish and shellfish. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 1985, 5(2): 19-23.
- [4] Roesijadi G. Metallothioneins in metal regulation and toxicity in aquatic animals. Aquatic Toxicology, 1992, 22: 81-114.
- [5] Engel D W, Brouwer M. Trace metal-binding proteins in marine molluscs and crustaceans. Marine Environmental Research, 1984, 13: 177-194.
- [6] Liu M X, Li G J, Gu H K. Trace metal concentration in fish, crustacea and mollusca of the Bohai Bay. Acta Scientiae Circumstantiae, 1983, 3(2): 149-155.
- [7] Shuai J S, WANG L. Discussion about the health impact of heavy metal and the countermeasure. Environment and Exploitation, 2001, 16(4): 62.
- [8] Liu Z K, LAN Y F. The pollution of heavy metal and human health. Science Garden Plot, 1991, 2: 35-35.
- [9] Guo D F. Environment sources of Pb and Cd and their toxicity to man and animals. Evolvement of Environment Science, 1994, 2(3): 71-76.
- [10] Philips D J H. Quantitative aquatic biological indicators; their use to monitor trace metal and organochlorine pollution. London, Applied Science Publishers, 1980.
- [11] Bass L E. Influence of temperature and salinity on oxygen consumption of tissues in the American oyster (*Crassostrea virginica*). Comparative and Biochemical Physiology, 1977, 58: 125-130.
- [12] Cui K D, Wu Y L, Zhao H R. The experimental study of the accumulation, distribution and discharge of the Cd, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr in *Scapharca subcrenata*. Studia Marina Sinica, 1987, 28: 97-107.
- [13] Sun P Y, Wang B. Effects of Seasonal Variation and Individual Size on Heavy Metals Accumulation in *Corbicula fluminea*. Marine Science Bulletin, 2004, 23(2): 19-24.
- [14] Wu Y L, Cui K D, Liu Y M, Hou L Y, Lou Q X. Laboratory experiment on the accumulation and depuration of mercury by *Arca* (Anadara) *Subcrenata* Lischke. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(1): 30-34.
- [15] De Wolf P. Mercury content of mussels from West European coasts. Marine Pollution Bulletin, 1975(6): 61-63.
- [16] Boyden C R. Trace element content and body size in molluscs. Nature, 1974(251): 311-314.
- [17] 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, 1983, 14(1): 30-34.
- [18] Cai L Z, Hong H S, Hong L. Accumulation of zinc and lead in *Ruditapes philippinarum* and its tolerance. Acta Scientiae Circumstantiae, 1999, 19(3): 319-322.
- [19] Zhao W H, Chen X G, Fei Z H, Qian B J. Preliminary study on ability of accumulation of heavy metal in Different Mollusca and their different tissues and organs from Yancheng Seashore Botomland. Journal of Shanghai Jiao tong University(Agricultural Science), 2009, 27(1): 76-78.
- [20] Li J R, Li X P, Wang L, Duan Q Y. Advances in Uptake, Transportation and Bioaccumulation of Heavy Metal Ions in Bivalves. Fisheries Science, 2007, 26(1): 51-55.
- [21] Fischer H. Influence of temperature, salinity, and oxygen on the cadmium balance of mussels *Mytilus edulis*. Mar Ecol Prog Ser, 1986(32): 265-278.
- [22] Watkins B, Simkiss K. The effect of oscillating temperatures on the metalion metabolism of *Mytilus edulis*. Journal of the marine biological association of the United Kingdom, 1988(68): 93-100.
- [23] Denton G R W, Burdon-Jones C. Influence of temperature and salinity on the uptake, distribution and depuration of mercury, cadmium and lead by the black-lip oyster *Saccostrea echinata*. Marine Biology, 1981, 64: 317-326.
- [24] Wang W X, Fisher N S, Luoma, S N. Kinetic determinations of trace element bioaccumulation in the mussel *Mytilus edulis*. Marine Ecology Progress Series, 1996, 140: 91-113.
- [25] Lee B G, Wallace W G, Luoma S N. Uptake and loss kinetics of Cd, Cr and Zn in the bivalves *Potamocorbula amurensis* and *Macoma balthica*: effects of size and salinity. Marine Ecology Progress Series, 1998, 175: 177-189.

参考文献:

- [1] 蔡立哲, 刘琼玉, 洪华生. 菲律宾蛤仔在高浓度锌铅水体中的金属积累. 台湾海峡, 1998, 17(4): 456-461.
- [2] 马藏允, 刘海, 姚波, 纪会敏, 王淑波, 张通. 几种大型底栖生物对 Cd, Zn, Cu 的积累实验研究. 中国环境科学, 1997, 17(2): 151-155.
- [3] 陈锐, 沈介楚, 蔡道基. 三种砷化物在鱼、贝内的积累、释放与控制. 中国环境科学, 1985, 5(2): 19-23.
- [6] 刘明星, 李国基, 顾宏堪. 渤海湾鱼类、甲壳动物、软体动物的痕量金属含量. 环境科学学报, 1983, 3(2): 149-155.
- [12] 崔可铨, 吴玉霖, 赵鸿儒. 镉、铜、铅、镍、铬在毛蚶体内的累积、分布和排出的实验研究. 海洋科学集刊, 1987, 28: 97-107.
- [13] 孙平跃, 王斌. 季节变化和个体大小对河蚬积累重金属的影响. 海洋通报, 2004, 23(2): 19-24.
- [14] 吴玉霖, 崔可铨, 刘玉梅, 侯兰英, 姜清香. 毛蚶对汞积累和排出的室内试验. 海洋与湖沼, 1983, 14(1): 30-34.
- [17] 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.
- [18] 蔡立哲, 洪华生, 洪丽. 菲律宾蛤仔对锌和铅的累积特征. 环境科学学报, 1999, 19(3): 319-322.
- [19] 赵卫红, 陈献稿, 费正皓, 钱炳俊. 盐城滩涂贝类及其不同组织器官对重金属富集能力的初步研究. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 27(1): 76-78.
- [20] 励建荣, 李学鹏, 王丽, 段青源. 贝类对重金属的吸收转运与累积规律研究进展. 水产科学, 2007, 26(1): 51-55.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.21 Nov., 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Gross ecosystem product: theory framework and case study OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al (6747)
- Advances in impacts of climate change on infectious diseases outbreak LI Guodong, ZHANG Junhua, JIAO Gengjun, et al (6762)
- Ecology of aerobic methane oxidizing bacteria (methanotrophs) YUN Juanli, WANG Yanfen, ZHANG Hongxun (6774)
- Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland
..... ZHANG Yunhai, HE Nianpeng, ZHANG Guangming, et al (6786)
- Worldwide distribution and multivariate similarity clustering analysis of spiders
..... SHEN Xiaocheng, ZHANG Baoshi, ZHANG Feng, et al (6795)
- The influence of wind direction on pollen-mediated gene flow in transgenic insect-resistant cotton
..... ZHU Jialin, HE Juan, NIU Jianqun, et al (6803)

Autecology & Fundamentals

- Ecological characteristics of benthic diatoms, protozoa and meiobenthos in the sediments of the Changjiang Estuary and East China
Sea in spring MENG Zhaoctui, XU Kuidong (6813)
- Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River
..... LV Weiwei, MA Chang'an, YU Ji, et al (6825)
- Enrichment and ecological risk of heavy metal in soils and dominant plants in the riparian of the Fenghe River
..... YANG Yang, ZHOU Zhengchao, WANG Huanhuan, et al (6834)
- Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River
Delta LI Ling, QIU Shaojun, TAN Feifei, et al (6844)
- Effects of short-term dark chilling on leaves carbon and nitrogen metabolism and involved activities of enzymes in mangrove *Kandelia
obovata* seedling ZHENG Chunfang, LIU Weicheng, CHEN Shaobo, et al (6853)
- Preliminary evaluation on tolerance to phosphorous deficiency of 32 cultivars of cut chrysanthemum
..... LIU Peng, CHEN Sumei, FANG Weimin, et al (6863)
- Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa*
..... WANG Zhaogen, WU Hongxi, CHEN Xiaoxiao, et al (6869)
- Effects of Chinese gallnut on photosynthetic characteristics and total nitrogen content of *Rhus chinensis*
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (6876)
- The characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren (6885)
- Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles
..... LI Weizheng, YANG Lei, SHEN Xiaowei, et al (6895)

Population, Community and Ecosystem

- Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng, et al (6904)
- Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China
..... WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang (6913)
- The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems
..... ZHU Xianjin, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al (6925)
- Effects of thinning on macro fungi and their relationship with litter decomposition in *Pinus tabulaeformis* plantations
..... CHEN Xiao, BAI Shulan, LIU Yong, et al (6935)

- Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve TAN Shanshan, YE Zhenlin, YUAN Liubin, et al (6944)
- Effect of Oxytetracycline (OTC) on the activities of enzyme and microbial community metabolic profiles in composting
 CHEN Zhixue, GU Jie, GAO Hua, et al (6957)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Variations in leaf anatomy of *Larix gmelinii* reflect adaptation of its photosynthetic capacity to climate changes
 JI Zijiang, QUAN Xiankui, WANG Chuankuan (6967)
- The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng Coastal wetland
 ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al (6975)
- Eco-physiological response of *Phragmites communis* to water table changes in the Horqin Sand Land
 MA Yunhua, ZHANG Tonghui, LIU Xinpeng (6984)
- Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model ... YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al (6992)
- Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land
 CHANG Xueli, ZHAO Xueyong, WANG Wei, et al (7002)
- Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island
 XIA Jiangbao, ZHANG Shuyong, WANG Rongrong, et al (7013)
- Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir
 WU Shuyuan, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (7023)

Resource and Industrial Ecology

- Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area
 HUANG Yi, WANG Yunjia, LI Xiaoshun, et al (7035)

《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 余新晓

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 21 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 21 (November, 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