

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H_2O_2 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N_2O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O_3 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价

杜秀萍, 孟范平*, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100)

摘要: 采用多生物标志物污染指数法 (multi-biomarker pollution index, MPI) 评价北部湾潮间带的污染状况。2011年4月在北部湾沿海潮间带设置9个站位采集波纹巴非蛤 (*Paphia undulata*) 和沉积物样品, 分析波纹巴非蛤鳃和内脏中9种生物标志物活性 (含量) 以及沉积物中12种化学污染物的含量。根据每种生物标志物与沉积物中化学污染物之间的皮尔逊相关性, 筛选波纹巴非蛤鳃中的氧化型谷胱甘肽 (GSSG)、还原型谷胱甘肽 (GSH) 和谷胱甘肽硫转移酶 (GST), 以及内脏中的硫代巴比妥酸反应物 (TBARS) 和谷胱甘肽过氧化物酶 (GPx) 作为评价指标, 将某站位上述5种生物标志物响应值赋予相应的污染指数, 叠加后即得到该站位的MPI值。结果表明, 不同站位污染水平有所差别, 所有站位的MPI值范围在18~39之间, 涵盖“清洁”、“质量良好”、“轻微污染”三个等级, 未出现“污染”或“严重污染”站位。湛江市北港码头 (S1)、钦州湾老人沙浅滩 (S3)、防城港西湾 (S4) 和北海市西场 (S7) 呈轻微污染, 其他站位环境清洁或质量良好, 说明北部湾潮间带整体环境质量良好, 但已开始受到人为活动的轻微干扰。

关键词: 北部湾; 波纹巴非蛤 (*Paphia undulata*); 生物标志物; 多生物标志物污染指数法 (MPI); 污染评价

中图分类号: X820.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)10-3336-08

Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index

DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, LI Xiang-lei, YANG Fei-fei, CHENG Feng-lian, YANG Yue-zhi, LI Zheng-yan

(College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: This paper assessed the coastal environmental quality along the Beibu Gulf using a statistical approach, multi-biomarker pollution index (MPI). Samples of clam (*Paphia undulata*) and sediment were collected at nine sites from the intertidal zone of Beibu Gulf in April 2011. Nine biomarkers of response were measured both in gill and digestive gland in *Paphia undulata*, and twelve kinds of contaminants were measured in different sediment samples. According to the Pearson's correlation coefficients between biomarker responses in *Paphia undulata* and contaminant levels in sediments, five biomarkers either in gill for oxidized glutathione (GSSG), reduced glutathione (GSH), glutathione S-transferase (GST) or in digestive gland for thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) and glutathione peroxidase (GPx) were selected for MPI calculation. For each biomarker at each site, a response index was allocated, and the MPI value of this site was calculated as the sum of the response index of the five biomarkers. The results of the calculation (MPI values from 18 to 39) showed significant differences among sampling sites. The environmental quality of all sites ranged from class 1 (clean) to class 3 (lightly contaminated), and no site fell into class 4 (contaminated) or class 5 (heavily contaminated), indicating a good environmental quality in the intertidal zone of Beibu Gulf. However, the environmental quality at some sites (S1, S3, S4 and S7) fell into class 3 (lightly contaminated), indicating mild interference from human activities has occurred.

Key words: Beibu Gulf; *Paphia undulata*; biomarkers; multi-biomarker pollution index (MPI); pollution assessment

海岸环境中污染物的组成复杂, 受监测指标数量的限制以及污染物之间相互作用的影响, 传统的化学因子污染评价方法不能有效地指示监测区域的综合污染程度^[1]; 而基于生物标志物的评价方法可弥补这一不足, 因此在海岸环境质量评价中得到广泛应用^[2~4]。生物标志物是指生物体在组织、体液或个体水平上能够反映一种或多种化学污染物暴露及效应的生理、生化、细胞和行为的变化^[5]。有研究表明, 生物组织中标志物活性 (含量) 与环境中污

染物含量呈一定相关性^[6,7], 可用于指示环境污染程度。用于环境质量评价的生物标志物大多能够反映污染物早期影响, 如 I 相代谢酶 [7-乙氧基-3-异酚噻唑酮脱乙酰基酶 (EROD)、细胞色素 P450^[8] 等] 和 II 相代谢酶类 [谷胱甘肽硫转移酶 (GST)^[9] 等]、

收稿日期: 2011-12-08; **修订日期:** 2012-03-11

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目 (201005012)

作者简介: 杜秀萍 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生物监测与生物净化, E-mail: duxiuping3789@163.com

* 通讯联系人, E-mail: fangpingm@tom.com

氧化应激标志物[超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)^[10]等]、乙酰胆碱酯酶(AChE)^[6]等。目前,基于多种生物标志物的环境质量评价方法有:多生物标志物污染指数法(multi-biomarker pollution index, MPI)、综合标志物响应指数法(integrated biomarker response, IBR)等。其中, MPI 方法是将多种生物标志物对环境的响应效应叠加,把监测数据转化为反映环境污染水平的环境信息(即污染指数),它可对不同站位污染程度进行分级,因而在污染评价中具有一定优越性。该方法由 Narbonne 等^[2]在 1999 年提出,最早应用于欧洲 BIOMAR (“the European Biological Markers of Environmental Contamination in Marine Ecosystems”)项目,随后在地中海^[11]、欧洲波罗的海^[2]和非洲突尼斯泄湖^[12,13]等近岸海域环境质量评价中得到应用。

北部湾是我国南海西北部的半封闭大海湾。2000 年以前沿岸大型工业很少,相对于我国其他沿海地区,该海域环境质量较好。但是,近 10 年来,各类工业项目在海湾沿岸相继发展起来,人为活动将大量污染物质排入海湾,由此产生的环境污染问题日益显现,处于海陆交界的潮间带受到的污染尤为严重。因此,有必要对北部湾潮间带的环境质量进行综合评价,以便为北部湾沿海未来的发展与规划提供参考。海洋双壳类动物因营固着生活、滤食习性、代谢转化率低、对污染物富集作用大、分布广泛等特点,而成为海岸环境的典型指示生物^[14]。波纹巴非蛤(*Paphia undulata*)是我国南海著名的海产贝类,俗称花甲螺,系瓣鳃纲帘蛤目帘蛤科,在福建、广东、广西等地分布广泛。北部湾生态综合考察结果表明,波纹巴非蛤是北部湾北部沿岸的优势物种^[15]。本研究以北部湾潮间带为评价区域,采集波纹巴非蛤并对鳃和内脏中的 SOD、CAT 等 9 种生物标志物活性(含量)进行分析;同时采集沉积物样品进行有机、无机污染物含量分析。根据实测数据筛选出 5 种生物标志物作为评价指标,采用 MPI 方法对北部湾潮间带污染状况进行评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集与贮存

2011 年 4 月在北部湾主要沿海城市(湛江、北海、钦州、防城港)的潮间带设置 9 个采样站位(湛江市北港轮渡码头 S1、湛江市乐民镇码头 S2、钦州湾老人沙浅滩 S3、防城港西湾 S4、防城港东海湾 S5、防城港市月亮湾 S6、北海市西场 S7、湛江市北

潭港 S8、湛江市江洪码头 S9),站点布置见图 1。样品采集参照文献^[16]:采集壳长(2.5 ± 0.5) cm 的波纹巴非蛤用聚乙烯袋盛装并冷冻保存,用于生物标志物分析;采集表层(0 ~ 10 cm)沉积物样品,于棕色玻璃瓶和聚乙烯袋中盛装并冷冻保存,分别用于有机和无机污染物含量测定。

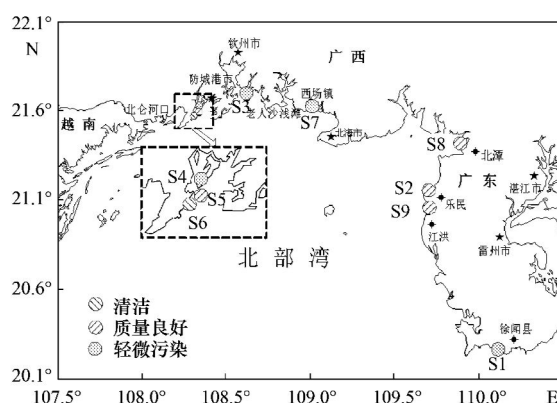


图 1 2011 年 4 月北部湾潮间带采样站位分布及环境质量评价结果

Fig. 1 Sampling sites in the intertidal zone of Beibu Gulf with results of environmental quality assessment (April, 2011)

1.2 样品分析

1.2.1 生物标志物分析

(1) 提取液制备

取出波纹巴非蛤鳃和内脏组织,于 -80°C 冷冻保存,用于标志物分析。测定前称取一定量待测组织参照文献^[17]制备提取液,按质量体积比 1:4 加入 pH 为 7.8 的 Tris-HCl ($0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 缓冲溶液进行匀浆,离心后取上清液测定标志物。其中,测定硫代巴比妥酸反应物(TBARS)、还原型谷胱甘肽(GSH)、氧化型谷胱甘肽(GSSG)的匀浆液离心条件为:转速 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,时间 15 min,温度 4°C ;测定 SOD、AChE、CAT、GST、谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)的离心条件为:转速 $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,时间 15 min,温度 4°C 。金属硫蛋白(MTs)的提取参照肖静^[18]的方法:对于鳃和内脏,分别按质量体积比为 1:4 和 1:5 加入 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Tris-HCl 缓冲液(pH = 7.8,含 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 蔗糖, $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 苯甲基磺酰氟, 0.01% β -巯基乙醇)进行匀浆,之后于 4°C 下 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 30 min,得到 MTs 提取液。

(2) 标志物分析

SOD、CAT、TBARS 和组织蛋白均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定。GSH 和 GSSG 采用张迺哲等^[19]的荧光分光光度法测定,分别用每 g 组织蛋白中 GSH、GSSG 的含量表示,单位

均为 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$. GST 采用 Habig 等^[20]的 GSH 分光光度法测定,以每 mg 组织蛋白中每 min 催化生成 1 nmol 产物为一个酶活力单位,单位为 $\text{nmol}\cdot(\text{min}\cdot\text{mg})^{-1}$. GPx 参照汤建林等^[21]的 DTNB 分光光度法测定,酶活性表示为单位时间内每 mg 组织蛋白中 GSH 的减少量,单位为 $\text{nmol}\cdot(\text{min}\cdot\text{mg})^{-1}$. AChE 参照 Ellman 等^[22]的 5,5-双二硫代(2-硝基苯甲酸)分光光度法测定,酶活力定义为每 g 组织蛋白每 min 水解碘化硫代乙酰胆碱(ATChI)的 μmol 数,单位为 $\mu\text{mol}\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$. MTs 参照肖静^[18]的分光光度法测定,以每 g 组织蛋白中-SH 的 μmol 数间接表示 MTs 含量,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$.

1.2.2 沉积物样品的污染物分析

(1) 样品预处理

将部分沉积物湿样于 -20°C 冷冻保存,用于壬基酚(NP)和硫化物的测定;另一部分沉积物样品于阴凉处风干后,分别研磨后过 80 目金属筛和 160 目尼龙筛,前者用于有机污染物[多氯联苯(PCBs)、苯并(a)芘(BaP)、石油类(TPH)]含量分析,后者用于 7 种重金属(总 Hg、Cu、Pb、Cd、Zn、As、Cr)的含量分析.

(2) 污染物测定

NP 采用 Li 等^[23]的气相色谱质谱联用法测定;BaP 采用美国环境保护署推荐方法 EPA8100 气相色谱质谱联用法^[24]测定;TPH 采用文献[16]的荧光分光光度法测定;PCBs 参照文献[16]的气相色谱法,并根据周传光等^[25]的方法分离除去提取液中的有机氯农药.

重金属按照文献[16]测定,其中,Cu、Pb 和 Cd 为无火焰原子吸收分光光度法,Zn 为火焰原子吸收分光光度法,总 Hg、As 为原子荧光法,Cr 为二苯碳酰二肼分光光度法.硫化物采用文献[16]的离子选择电极法.

主要仪器为:高速冷冻离心机(CR22G II 型);旋转蒸发器(瑞士 BUCHI R-3 型);气相色谱质谱联用仪(Agilent 6890N/5975B 型);气相色谱仪(岛津 GC 2010AF 型);分子荧光光度计(F4600 型);原子荧光分光光度计(AFS-920 型);原子吸收分光光度计(M6 型);紫外可见分光光度计(T6 型).

1.2.3 分析质量控制和质量保证

有机污染物分析过程中,采用空白试验和标准物质回收率进行质量控制:空白试验中待测物质均未检出;PCBs 以 PCBs 混标(ISO6468,

Accustandard)为标准物质,样品加标回收率为 71%~108%;TPH 以 20-3 号油标准[GBW(E) 080913,国家标准物质研究中心]为标准物质,样品加标回收率为 97%~102%;NP 以叔丁基苯酚作为替代标准物质,回收率为 66%~109%;BaP 以氘代菲为替代标准物质,回收率为 67%~90%;NP 和 BaP 均通过替代加标回收率进行质量校正.重金属分析过程中,以近海海洋沉积物标准物质(GBW 07314,国家海洋局第二海洋研究所)进行质量控制,所测重金属含量均在标准物质给定范围之内,平行样测定结果标准偏差均小于 10%.

1.3 数据处理

所有生物标志物和污染物指标均平行测定 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准偏差(mean $\pm$ SD)表示.数据统计分析使用 SPSS 18.0 软件.用单因素方差分析中 Games-Howell(方差非齐性)或 Tukey(方差齐性)检验方法对每种生物标志物进行站位间的显著性差异检验($P<0.05$).

1.4 生物标志物筛选

对生物标志物测定值和沉积物中污染物含量进行双变量皮尔逊相关性分析,选择与多种污染物(包括无机和有机污染物)存在显著相关性($P<0.05$)的 5 种生物标志物,用于 MPI 值计算.当 2 种以上(含 2 种)生物标志物具有相等的显著相关污染物种类时,优先选择站位差异性(即最大平均值与最小平均值之比)较大的标志物.

1.5 评价方法

根据 Narbonne 等^[2]的方法,对各站位上 5 种生物标志物的测定值进行处理,依次得到以下数值:①各站位该标志物 3 次平行测定结果的平均值($\bar{X}$);②生物标志物的响应范围(response range,RR),即各站位该标志物最大平均值与最小平均值之差;③在显著性水平为 0.05 时该标志物平均值的置信区间(confidence interval,CI);④判别因子(discriminatory factor,DF): $DF = (RR + CI)/CI$.实际计算过程中 DF 值常不为整数,需将其整数化(不足 1 的部分按“1”计算)得到判别水平(discriminatory level,DL).将各站位该标志物的测定值按大小顺序排序,根据测定值之间的显著性差异,将其分成“DL”组,并按表 1 赋予一定的污染指数(biomarker pollution index,BPI),使生物标志物对环境污染的响应值标准化.某站位 i 的 MPI 则按下式计算:

$$MPI_i = \sum_{j=1}^n BPI_j$$

式中, MPI_i 为站点 i 的 MPI 值; n 为生物标志物的种数, $n=5$; BPI_j 为站点 i 的第 j 种生物标志物的平均值 (X_j) 对应的污染指数值。

根据 MPI 值的大小, 污染程度划分为 5 个等级。各污染等级的 MPI 值范围及其对应的颜色分别为: 10~19, 清洁(蓝); 20~29, 质量良好(绿); 30~39, 轻微污染(黄); 40~49, 污染(橙); ≥ 50 , 严重污染(红)。各站点所处的污染等级可根据各自的 MPI 值得知, 在采样站位图上标以相应颜色, 可直观反映不同站位污染程度的差异。

表 1 生物标志物污染指数赋值表^[11]

Table 1 Index given for each biomarker response					
水平	判别因子 (DF)				
	1	2	3	4	5
污染指数 (BPI)	4	10			
	3	6	12		
	2	4	7	12	
	1	2	4	8	14

表 2 各站位沉积物中污染物分析结果¹⁾ (干重)

Table 2 Results of contaminant levels in sediments of 9 sites (dry weight)

站位	PCBs	BaP	NP	TPH	硫化物	总 Hg
S1	1.66 ± 0.32	0.86 ± 0.07	19.23 ± 1.05	342.98 ± 24.74	ND ²⁾	0.042 ± 0.008
S2	0.60 ± 0.03	ND	17.99 ± 1.44	14.01 ± 0.49	55.62 ± 3.91	0.057 ± 0.016
S3	1.07 ± 0.27	0.80 ± 0.04	17.05 ± 1.26	100.33 ± 17.96	3.54 ± 0.36	0.083 ± 0.011
S4	3.48 ± 0.58	0.79 ± 0.02	16.06 ± 0.76	4.72 ± 0.71	ND	0.062 ± 0.007
S5	0.59 ± 0.04	ND	35.79 ± 2.24	33.15 ± 1.85	31.44 ± 3.66	0.437 ± 0.013
S6	0.70 ± 0.11	ND	23.60 ± 0.48	5.03 ± 0.18	14.76 ± 2.38	ND
S7	1.55 ± 0.29	0.54 ± 0.05	18.81 ± 1.28	7.02 ± 1.12	13.28 ± 1.34	0.094 ± 0.010
S8	2.46 ± 0.09	0.59 ± 0.01	42.19 ± 2.82	40.17 ± 3.89	187.98 ± 5.32	0.099 ± 0.015
S9	1.17 ± 0.24	ND	21.68 ± 0.95	18.51 ± 3.36	11.95 ± 0.83	0.029 ± 0.010
站位	As	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn
S1	3.02 ± 0.70	0.097 ± 0.012	148.95 ± 7.37	17.07 ± 2.04	23.58 ± 0.81	1 271.88 ± 5.96
S2	12.81 ± 0.91	0.078 ± 0.018	14.41 ± 2.51	15.70 ± 0.59	13.37 ± 0.52	49.82 ± 1.38
S3	21.51 ± 2.56	0.083 ± 0.016	36.16 ± 4.65	27.97 ± 6.57	26.20 ± 2.26	90.23 ± 2.28
S4	10.61 ± 0.56	0.054 ± 0.007	35.94 ± 3.37	15.02 ± 1.02	15.24 ± 0.54	69.81 ± 0.57
S5	8.45 ± 0.10	0.306 ± 0.030	75.02 ± 3.86	17.75 ± 2.13	41.13 ± 0.57	170.81 ± 2.25
S6	6.84 ± 1.34	0.028 ± 0.007	7.50 ± 3.35	13.66 ± 1.56	7.15 ± 1.07	35.82 ± 1.24
S7	16.84 ± 2.24	0.122 ± 0.014	34.88 ± 2.70	14.34 ± 4.13	15.71 ± 0.41	72.19 ± 1.12
S8	5.31 ± 0.92	0.082 ± 0.011	51.99 ± 4.26	26.94 ± 7.80	29.02 ± 0.60	95.97 ± 1.70
S9	4.64 ± 0.59	0.039 ± 0.029	8.89 ± 7.10	12.30 ± 3.87	7.58 ± 0.13	21.36 ± 1.60

1) 结果以“平均值 ± 标准方差”(mean ± SD)表示, 单位: $\times 10^{-6}$, PCBs、BaP 和 NP 单位为 $\times 10^{-9}$; 2) ND 表示未检出或低于方法检出限

因子)有更为敏感的综合响应。这种差异为区分站位间的污染程度创造了有利条件。

2.2 生物标志物的筛选

根据 MPI 方法的适用条件, 需从上述生物标志物中筛选 5 种用于 MPI 值的计算。已有研究表明, 双壳类组织中某些生物标志物的活性(含量)与环

2 结果与分析

2.1 沉积物中污染物含量和波纹巴非蛤生物标志物水平

各站位沉积物中 12 种污染物分析结果见表 2。由于各站位所毗邻的污染源类型、数量不同, 站位间的污染物含量存在较大差异。

波纹巴非蛤两种组织(鳃和内脏)中 9 种生物标志物分析结果见表 3。大多数种类的生物标志物水平存在组织差异性: CAT、SOD、GSSG、GSH 和 AChE 在鳃中有较高活性(或含量); GST、TBARS 和 MTs 在内脏中有较高水平; 而 GPx 在两组织中无明显的分布差异性规律。此外, 每种生物标志物的水平在站位间也存在差异, 其中, GPx_g 、 GST_g 和 CAT_g 的站位差异性较高, 分别达到 31.49、13.46 和 13.02; 其次为 GPx_{dg} 和 $TBARS_{dg}$, 站位差异性分别为 5.24 和 4.28; 其他因子的站位差异性较低, 均小于 3。对于本研究中选定的 9 个站位, 某种标志物的站位间差异性越高, 意味着其对该区域环境变化(污染因子和非污染

境污染物浓度呈显著线性相关^[10]。为了通过生物标志物的响应值来评价海洋环境的综合质量, 应选用与较多种类的污染物(包括无机和有机污染物)具有显著相关性的生物标志物。为此, 本研究采用双变量皮尔逊相关性分析方法, 对北部湾潮间带波纹巴非蛤鳃和内脏组织中生物标志物水平与沉积物

表 3 波纹巴非蛤鳃和内脏组织中生物标志物分析结果¹⁾
Table 3 Results of biomarker responses in gill and digestive gland in *Paphia undulata*

站位	CAT _g ²⁾ /U·g ⁻¹	SOD _g U·mg ⁻¹	GST _g /nmol·(min·mg) ⁻¹	MT _g /μmol·g ⁻¹	GPx _g /nmol·(min·mg) ⁻¹	GSSG _g /mg·g ⁻¹	GSH _g /mg·g ⁻¹	TBARS _g /nmol·mg ⁻¹	ACHF _g /nmol·(min·g) ⁻¹
S1	340.48 ± 16.63 ^{cd(3)}	173.67 ± 7.31 ^e	247.24 ± 21.31 ^{acd}	0.12 ± 0.00 ^{ab}	1.94 ± 1.59 ^{ab}	6.71 ± 0.21 ^d	8.49 ± 0.12 ^e	7.06 ± 0.12 ^e	4.46 ± 1.33 ^{ab}
S2	29.66 ± 8.28 ^a	167.92 ± 18.77 ^e	315.92 ± 3.88 ^d	0.12 ± 0.00 ^{ab}	19.96 ± 0.48 ^e	3.78 ± 0.23 ^{bce}	5.02 ± 0.07 ^{cd}	2.73 ± 0.63 ^{ab}	6.13 ± 0.68 ^b
S3	386.10 ± 56.94 ^{bcd}	172.17 ± 4.82 ^e	775.82 ± 74.81 ^{acd}	0.15 ± 0.01 ^{ab}	0.63 ± 0.35 ^a	4.71 ± 0.42 ^{bce}	3.24 ± 1.16 ^{abcde}	5.52 ± 0.92 ^{abcde}	3.81 ± 0.16 ^{ab}
S4	344.01 ± 8.54 ^d	158.75 ± 9.06 ^e	141.51 ± 27.02 ^{acd}	0.14 ± 0.01 ^{ab}	6.72 ± 1.68 ^{abcd}	4.24 ± 0.27 ^{bce}	5.70 ± 0.21 ^d	6.01 ± 0.05 ^{bd}	3.04 ± 0.76 ^{ab}
S5	275.32 ± 1.85 ^c	97.32 ± 9.48 ^{ab}	57.64 ± 7.09 ^a	0.11 ± 0.00 ^a	5.94 ± 0.31 ^b	2.49 ± 0.11 ^a	4.16 ± 0.06 ^a	6.32 ± 0.45 ^{cde}	3.57 ± 0.27 ^{ab}
S6	285.00 ± 14.60 ^{cd}	135.38 ± 2.66 ^d	171.68 ± 6.00 ^c	0.15 ± 0.00 ^b	13.03 ± 0.18 ^d	4.06 ± 0.12 ^{bce}	4.64 ± 0.11 ^{bce}	5.73 ± 0.43 ^{cde}	3.40 ± 0.27 ^{ab}
S7	295.26 ± 15.90 ^{cd}	121.81 ± 3.06 ^{cd}	418.63 ± 46.22 ^{acd}	0.12 ± 0.00 ^{ab}	10.36 ± 0.35 ^c	4.49 ± 0.08 ^c	4.29 ± 0.03 ^{ab}	5.57 ± 0.17 ^{bd}	2.55 ± 0.29 ^a
S8	219.78 ± 9.08 ^b	111.91 ± 3.64 ^{bce}	167.39 ± 14.84 ^{bce}	0.14 ± 0.00 ^b	11.00 ± 0.58 ^c	3.80 ± 0.06 ^b	4.14 ± 0.08 ^a	4.68 ± 0.18 ^{ae}	3.04 ± 0.05 ^{ab}
S9	327.69 ± 19.07 ^{cd}	88.40 ± 8.50 ^a	108.79 ± 2.50 ^{ab}	0.13 ± 0.03 ^{ab}	7.03 ± 0.41 ^b	4.18 ± 0.01 ^c	4.18 ± 0.03 ^{ab}	6.14 ± 0.12 ^d	3.26 ± 0.40 ^a
站位差异性	13.02	1.96	13.46	1.37	31.49	2.69	2.62	2.59	2.40

站位	CAT _{dg} ²⁾ /U·g ⁻¹	SOD _{dg} /U·mg ⁻¹	GST _{dg} /nmol·(min·mg) ⁻¹	MT _{dg} /μmol·g ⁻¹	GPx _{dg} /nmol·(min·mg) ⁻¹	GSSG _{dg} /mg·g ⁻¹	GSH _{dg} /mg·g ⁻¹	TBARS _{dg} /nmol·mg ⁻¹	ACHF _{dg} /nmol·(min·g) ⁻¹
S1	103.02 ± 3.46 ^e	67.40 ± 3.56 ^e	317.23 ± 27.51 ^e	0.22 ± 0.02 ^{ab}	6.63 ± 0.37 ^{cde}	2.28 ± 0.03 ^f	1.53 ± 0.02 ^f	5.42 ± 0.07 ^b	1.35 ± 0.12 ^a
S2	87.93 ± 3.01 ^b	73.86 ± 1.35 ^f	173.62 ± 6.44 ^{ab}	0.37 ± 0.01 ^c	10.61 ± 0.27 ^f	1.15 ± 0.01 ^a	0.94 ± 0.03 ^a	3.41 ± 0.12 ^a	3.44 ± 0.35 ^c
S3	87.95 ± 3.30 ^b	49.10 ± 2.28 ^{ab}	166.35 ± 12.64 ^a	0.38 ± 0.04 ^{cde}	2.02 ± 0.25 ^a	1.55 ± 0.02 ^d	1.00 ± 0.01 ^b	5.64 ± 0.02 ^b	2.28 ± 0.29 ^{abc}
S4	76.64 ± 3.10 ^{ab}	52.21 ± 0.60 ^{bce}	299.02 ± 13.78 ^{de}	0.32 ± 0.04 ^{abc}	3.21 ± 0.49 ^{ab}	1.25 ± 0.05 ^b	1.08 ± 0.03 ^c	7.26 ± 0.19 ^d	1.93 ± 0.49 ^{abc}
S5	76.58 ± 3.6 ^{ab}	59.57 ± 1.07 ^d	285.30 ± 13.25 ^{de}	0.21 ± 0.00 ^{abcd}	7.32 ± 0.18 ^c	1.61 ± 0.02 ^d	0.96 ± 0.03 ^{ab}	14.59 ± 0.63 ^f	1.49 ± 0.12 ^a
S6	80.56 ± 8.33 ^b	59.93 ± 1.38 ^d	281.16 ± 1.28 ^d	0.26 ± 0.01 ^{bce}	6.58 ± 0.32 ^{ce}	1.25 ± 0.01 ^b	1.34 ± 0.03 ^e	4.02 ± 0.32 ^{ab}	2.60 ± 0.61 ^{abc}
S7	78.46 ± 4.63 ^{ab}	55.68 ± 2.71 ^{cd}	220.43 ± 6.51 ^e	0.23 ± 0.02 ^{ab}	4.86 ± 0.05 ^{bd}	1.77 ± 0.04 ^e	1.56 ± 0.02 ^{fg}	11.00 ± 0.55 ^e	1.57 ± 0.18 ^a
S8	68.07 ± 3.38 ^a	45.98 ± 0.59 ^a	229.18 ± 3.23 ^c	0.23 ± 0.01 ^{abcd}	6.20 ± 0.04 ^c	1.37 ± 0.01 ^c	1.21 ± 0.02 ^d	6.39 ± 0.11 ^c	1.66 ± 0.33 ^{ab}
S9	100.69 ± 1.38 ^c	47.97 ± 1.17 ^{ab}	201.58 ± 7.91 ^{bce}	0.21 ± 0.00 ^{ad}	7.91 ± 0.15 ^e	2.32 ± 0.01 ^f	1.60 ± 0.01 ^g	7.23 ± 0.21 ^{cd}	2.46 ± 0.08 ^{bc}
站位差异性	1.51	1.61	1.91	1.83	5.24	2.02	1.71	4.28	2.55

1) 结果用“平均值 ± 标准偏差”(mean ± SD)表示; 2) 生物标志物名称后的下标 g 代表鳃, dg 代表内脏; 3) 数据右上标为单因素方差分析(P < 0.05)结果, 标有相同字母者表示相应组之间无差异, 不同字母表示相应组之间有差异

污染物含量进行相关性分析,见表4。

由表4可见,本次调查所测定的波纹巴非蛤鳃和内脏的9种生物标志物中,GSSG_g、GSH_g各与3种污染物存在显著相关性;TBARS_{dg}与2种污染物存在显著相关性;MTs_g、MTs_{dg}、GPx_{dg}、AChE_{dg}、GST_g各与1种污染物存在显著相关性。对应如下:GSSG_g为Zn、TPH、BaP;GSH_g为Pb、Zn、TPH;TBARS_{dg}为总Hg、Cd;MTs_g为Cd;MTs_{dg}为As;AChE_{dg}为Pb;GPx_{dg}为BaP;GST_g为As。

根据1.4节生物标志物筛选方法,确定适于MPI值计算的5种生物标志物分别为:GSSG_g、GSH_g、TBARS_{dg}、GST_g和GPx_{dg},这些标志物的响应可反映

沉积物中至少7种污染物的信息。相对而言,MTs_g、MTs_{dg}和AChE_{dg}因所反映的潮间带沉积物污染信息较少且站位差异性较低,不适合MPI值计算。

2.3 MPI 计算与评价结果分析

对于上述筛选出的5种生物标志物,按1.5节的方法,依次计算得到每种生物标志物的判别因子、判别水平等参量(表5),进而计算得到相应的MPI值(表6)。然后,将各站位所处的污染等级在采样站位图上标出(见图1)。可见,各站位均不属于“严重污染”或“污染”等级,相对来说,S1、S3、S4和S7的污染程度较高,处于“轻微污染”等级,S2、S5、S8和S9为“质量良好”等级,S6属“清洁”等级。

表4 波纹巴非蛤中生物标志物与沉积物中污染物皮尔逊相关系数¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficients between biomarker responses in *Paphia undulata* and contaminant levels in sediments

鳃	CAT _g	SOD _g	GST _g	MTs _g	GPx _g	GSSG _g	GSH _g	TBARS _g	AChE _g
总 Hg	-0.02	-0.42	-0.24	-0.55	-0.18	-0.61	-0.24	0.17	-0.09
Cd	-0.03	-0.33	-0.17	-0.67 *	-0.20	-0.45	-0.11	0.20	-0.03
Pb	0.26	0.25	-0.08	-0.43	-0.55	0.55	0.73 *	0.52	0.11
Cr	0.10	0.20	0.53	0.37	-0.33	0.00	0.31	-0.16	-0.02
Cu	0.09	-0.11	0.03	-0.34	-0.42	-0.24	-0.07	0.19	-0.04
Zn	0.23	0.40	-0.04	-0.33	-0.45	0.78 *	0.88 *	0.48	0.26
As	0.05	0.36	0.84 *	0.18	-0.05	-0.11	-0.51	-0.32	0.02
硫化物	-0.47	-0.30	-0.21	0.08	0.38	-0.32	-0.24	-0.47	-0.03
TPH	0.30	0.47	0.16	-0.19	-0.56	0.82 *	0.76 *	0.46	0.28
PCBs	0.30	0.13	-0.17	0.27	-0.22	0.23	0.27	0.19	-0.44
BaP	0.53	0.60	0.45	0.27	-0.63	0.68 *	0.42	0.35	-0.17
NP	-0.18	-0.62	-0.46	-0.11	0.09	-0.51	-0.27	-0.02	-0.26
内脏	CAT _{dg}	SOD _{dg}	GST _{dg}	MTs _{dg}	GPx _{dg}	GSSG _{dg}	GSH _{dg}	TBARS _{dg}	AChE _{dg}
总 Hg	-0.36	0.02	0.20	-0.28	0.07	-0.04	-0.45	0.84 *	-0.41
Cd	-0.26	0.16	0.22	-0.32	0.11	0.06	-0.35	0.84 *	-0.47
Pb	0.28	0.28	0.58	-0.36	-0.06	0.47	0.15	0.19	-0.70 *
Cr	-0.31	-0.40	-0.32	0.31	-0.43	-0.22	-0.44	-0.09	-0.20
Cu	-0.33	-0.08	0.18	-0.16	-0.16	-0.01	-0.46	0.58	-0.59
Zn	0.55	0.42	0.53	-0.29	0.05	0.56	0.34	-0.11	-0.47
As	-0.20	-0.09	-0.59	0.68 *	-0.49	-0.34	-0.40	0.07	0.21
硫化物	-0.55	-0.25	-0.19	-0.15	0.24	-0.33	-0.19	-0.08	-0.06
TPH	0.60	0.31	0.37	-0.16	-0.06	0.57	0.28	-0.20	-0.42
PCBs	-0.32	-0.44	0.34	-0.01	-0.51	-0.10	0.07	-0.03	-0.41
BaP	0.07	-0.22	0.22	-0.22	-0.72 *	0.14	0.04	-0.15	-0.51
NP	-0.55	-0.30	0.14	-0.52	0.21	-0.12	-0.15	0.37	-0.36

1) * 表示 $P < 0.05$

各站位中,以S6的MPI值最低(18),环境质量属于“清洁”等级,这与防城港市月亮湾海域仅有零星养殖池、周围无工业污染源分布的实际情况相符。该站位沉积物中污染物监测结果也表明,BaP、总Hg、Cd、Pb、Cu含量为所有站位中最低值,其他污染物的含量也低于大多数站位。

相对而言,S1在所有站位中MPI值最高(39),处于“轻微污染”等级,该处沉积物中Pb、Zn、TPH

和BaP含量相对其它站位较高,主要是因为该站位毗邻粤海铁路北港轮渡码头,船舶喷漆及其洗舱水是主要污染来源。除S1外,S3、S4、S7也处于“轻微污染”水平(MPI值均为37)。现场调查发现,S3位于钦州南部海域的一片感潮沙滩,属当地的波纹巴非蛤养殖区,且该处距离钦州港约600 m,距城市陆源排污口亦不足3 km,养殖区残余农药和陆源排污的共同影响可能使得该站位As、Cr和BaP的含

量较高. S7 所在处亦为鱼、虾、螺等的养殖区,周围分布有大片红树林,一方面,红树林对来自陆源的污染起过滤和吸收作用;另一方面,红树林沉积物中有较高的有机质含量和黏粒含量,其富集重金属的能力比潮间带光滩要强,因而造成该处沉积物对养殖区残余农药中的重金属(主要是 Cr)有较强富

集. S4 位于防城港西湾跨海大桥下,北侧距城市排污口不足 100 m,防城港市为数众多的废旧物品回收拆解公司生产过程可能有 PCBs 流失,随排污进入海湾内,该站位南侧约 400 m~800 m 处还依次分布有防城港市港通码头和旅游码头,这些污染源是造成该站位 PCBs、BaP 含量较高的原因.

表 5 5 种生物标志物的判别水平表

Table 5 Discriminatory levels obtained for the five biomarkers of the studied nine sites

生物标志物	响应范围(RR)	置信区间(CI)	判别因子(DF)	判别水平(DL)
GST _g	718.18	338.69	3.12	4
GPx _{dg}	8.59	3.92	3.19	4
GSSG _g	4.22	1.71	3.47	4
GSH _g	5.25	2.33	3.25	4
TBARS _{dg}	11.18	5.43	3.06	4

表 6 各站位 MPI 值计算结果

Table 6 MPI values for each site

站位	污染指数(BPI)					MPI
	GST _g	GPx _{dg}	GSSG _g	GSH _g	TBARS _{dg}	
S1	7	4	12	12	4	39
S2	7	2	4	7	2	22
S3	12	12	7	2	4	37
S4	4	12	7	7	7	37
S5	2	4	2	4	12	24
S6	4	4	4	4	2	18
S7	7	7	7	4	12	37
S8	4	7	4	4	7	26
S9	2	4	7	4	7	24

依据文献[26],本研究中除 S1 站位的 Pb、Zn 符合三类标准,S5 站位的 Hg、Zn、Cu 符合二类标准外,其余的各站位每种污染物指标均符合一类标准,只根据沉积物中污染物监测结果,难以阐明并区分各站位的综合环境污染状况.应用 MPI 方法对各站位污染程度进行分析,各站位的评价结果与当地污染源的分布以及沉积物污染物含量分析结果较为相符.因此,根据本研究筛选的 5 种生物标志物测定值所计算的 MPI 值,能够较为真实地区分北部湾不同区域潮间带的综合污染水平.北部湾潮间带部分站位的综合环境质量处于“轻微污染”等级,表明目前部分区域已受到人为活动的污染影响.

3 结论

(1)为了计算 MPI 指数,需要选择对多种污染物具有良好线性相关性的生物标志物.在以波纹巴非蛤为指示物种的情况下,GSSG_g、GSH_g、TBARS_{dg}、GST_g和 GPx_{dg}这 5 种生物标志物的测定值可反映北部湾潮间带沉积物中大多数污染物的

信息.

(2)利用 MPI 指数可以较为客观地区分不同海域潮间带的综合环境质量.北部湾潮间带 9 个站位处于不同的污染水平,涵盖“清洁”、“质量良好”、“轻微污染”三个等级,相应的站位数分别为 1 个、4 个、4 个.其中,防城港市月亮湾海域环境质量为“清洁”等级.

(3)北部湾潮间带部分站位的综合环境质量处于“轻微污染”等级,表明这些区域已受到人为活动的污染影响.

参考文献:

- [1] 何明海.利用底栖生物监测与评价海洋环境质量[J].海洋环境科学,1989,8(4):49-54.
- [2] Narbonne J F, Daubèze M, Clérandeau C, et al. Scale of classification based on biochemical markers in mussels: application to pollution monitoring in European coasts [J]. Biomarkers, 1999, 4(6): 415-424.
- [3] Oliveira M, Maria V L, Ahmad I, et al. Contamination assessment of a coastal lagoon (Ria de Aveiro, Portugal) using defence and damage biochemical indicators in gill of *Liza aurata*-An integrated biomarker approach[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(3): 959-967.
- [4] Leiniö S, Lehtonen K K. Seasonal variability in biomarkers in the bivalves *Mytilus edulis* and *Macoma balthica* from the northern Baltic Sea [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Toxicology and Pharmacology, 2005, 140(3-4): 408-421.
- [5] Depledge M H, Aagaard A, Györkös P. Assessment of trace metal toxicity using molecular, physiological and behavioural biomarkers [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 31(1-3): 19-27.
- [6] Choi J Y, Yu J, Yang D B, et al. Acetylthiocholine (ATC)-Cleaving cholinesterase (ChE) activity as a potential biomarker of pesticide exposure in the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*, of Korea [J]. Marine Environmental Research, 2011, 71(3):

- 162-168.
- [7] Berthet B, Mouneyrac C, Pérez T, *et al.* Metallothionein concentration in sponges (*Spongia officinalis*) as a biomarker of metal contamination [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Toxicology and Pharmacology, 2005, **141** (3): 306-313.
- [8] Van der Oost R, Vindimian E, Van den Brink P J, *et al.* Biomonitoring aquatic pollution with feral eel (*Anguilla anguilla*). III. Statistical analyses of relationships between contaminant exposure and biomarkers [J]. Aquatic Toxicology, 1997, **39**(1): 45-75.
- [9] Zanette J, Monserrat J M, Bianchini A. Biochemical biomarkers in gills of mangrove oyster *Crassostrea rhizophorae* from three Brazilian estuaries [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Toxicology and Pharmacology, 2006, **143** (2): 187-195.
- [10] Richardson B J, Mak E, De Luca-Abbott S B, *et al.* Antioxidant responses to polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in green-lipped mussels (*Perna viridis*): Do mussels “integrate” biomarker responses? [J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, **57**(6-12): 503-514.
- [11] Narbonne J F, Aarab N, Clérandeau C, *et al.* Scale of classification based on biochemical markers in mussels: application to pollution monitoring in Mediterranean coasts and temporal trends [J]. Biomarkers, 2005, **10**(1): 58-71.
- [12] Bouraoui Z, Banni M, Chouba L, *et al.* Monitoring pollution in Tunisian coasts using a scale of classification based on biochemical markers in worms *Nereis (Hediste) diversicolor* [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **164** (1-4): 691-700.
- [13] Banni M, Jebali J, Daubeze M, *et al.* Monitoring pollution in Tunisian coasts: application of a classification scale based on biochemical markers [J]. Biomarkers, 2005, **10** (2-3): 105-116.
- [14] Saavedra C, Bachère E. Bivalve genomics [J]. Aquaculture, 2006, **256**(1-4): 1-14.
- [15] 叶洁琼, 蔡立哲, 黄睿婧, 等. 北部湾底拖网软体动物的种类组成及其环境影响 [J]. 海洋通报, 2010, **29** (6): 617-622.
- [16] GB 17378-2007, 海洋监测规范 [S].
- [17] 高鹰. 海水铜铅及环境因子对菲律宾蛤仔生物标志物的影响研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. 22-23.
- [18] 肖静. 海洋双壳类动物金属硫蛋白的提取与分析技术研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010. 27-36.
- [19] 张迺哲, 赵会军, 付宏杰, 等. 组织中氧化型和还原型谷胱甘肽荧光测定法 [J]. 生物化学与生物物理进展, 1993, **20** (2): 136-138.
- [20] Habig W H, Jakoby W B. Assays for differentiation of glutathione S-transferases [J]. Methods in Enzymology, 1981, **77**: 398-405.
- [21] 汤建林, 周世文, 徐传福. 分光光度法测定小鼠组织中谷胱甘肽过氧化物酶活力 [J]. 第三军医大学学报, 1996, **18** (6): 551-552.
- [22] Ellman G L, Courtney K D, Andres V, *et al.* A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity [J]. Biochemical Pharmacology, 1961, **7**(2): 88-90.
- [23] Li D, Oh J R, Park J. Direct extraction of alkylphenols, chlorophenols and bisphenol A from acid-digested sediment suspension for simultaneous gas chromatographic-mass spectrometric analysis [J]. Journal of Chromatography A, 2003, **1012**(2): 207-214.
- [24] US EPA. Method 8100, Polynuclear Aromatic Hydrocarbons [S].
- [25] 周传光, 徐恒振, 马永安, 等. 毛细管 GC-ECD 测定环境样品中的 PCBs [J]. 海洋环境科学, 2000, **19**(4): 57-61.
- [26] GB 18668-2002, 海洋沉积物质量 [S].

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行