

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

**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

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 ..... 吴起鑫, 韩贵琳 (2145)

成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 ..... 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)

太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 ..... 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)

环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 ..... 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)

南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布 ..... 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)

青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 ..... 刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)

城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 ..... 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)

基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 ..... 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)

浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 ..... 高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)

福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析 ..... 李雪丁 (2210)

HSPF 水文水质模型应用研究综述 ..... 李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)

城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 ..... 黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)

利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 ..... 姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)

嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 ..... 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)

重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 ..... 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)

南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 ..... 郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)

宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 ..... 邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)

影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 ..... 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)

大型底栖动物生物评价指数比较与应用 ..... 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)

青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 ..... 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)

青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 ..... 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)

用物理-生态集成技术局部控制富营养化 ..... 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)

太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 ..... 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)

富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 ..... 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)

巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 ..... 温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)

南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 ..... 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)

东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 ..... 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)

嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 ..... 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)

电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 ..... 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)

基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 ..... 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)

渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 ..... 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)

崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 ..... 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)

白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 ..... 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)

西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 ..... 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)

氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 ..... 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)

Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 ..... 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)

声电氧化处理扑热息痛的研究 ..... 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)

粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 ..... 白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)

利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 ..... 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)

Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究 ..... 王小蓉, 吴平霄 (2432)

核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究 ..... 武国正, 徐宗学 (2438)

A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 ..... 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)

系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究 ..... 蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)

氧化还原介体催化强化 *Paracoccus versutus* 菌株 GW1 反硝化特性研究 ..... 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)

1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析 ..... 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)

蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 ..... 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)

双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征及品种筛选研究 ..... 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄璜 (2475)

闽江河口短叶茳芰湿地 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放对氮输入的短期响应 ..... 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)

青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 ..... 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)

不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 ..... 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)

土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 ..... 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)

多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 ..... 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)

不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 ..... 梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)

废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 ..... 伊元荣, 韩敏芳 (2522)

中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 ..... 卢愿清, 史军 (2528)

《环境科学》征稿简则(2431) 《环境科学》征订启事(2532) 信息(2157, 2271, 2367, 2418)

# 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响

秦延文<sup>1,2</sup>, 郑丙辉<sup>1,2</sup>, 李小宝<sup>1,2</sup>, 张雷<sup>1,2</sup>, 时瑶<sup>1,2</sup>, 曹伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院环境保护部河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 为了解渤海湾围填海造成的生境变化趋势及重金属污染状况, 对 2003 年和 2011 年渤海湾表层沉积物 4 种重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn) 的含量及空间分布分别进行了研究, 并采用 BCR 三步分级提取法分析了 2011 年渤海湾表层沉积物中这 4 种重金属不同赋存形态的含量, 评估了这 4 种重金属的生物有效性, 最后分别采用富集系数法和潜在生态危害指数法对 2011 年重金属污染程度及潜在生态危害进行了评价. 结果表明, 2011 年渤海湾沉积物中 Cu、Cd、Pb 的含量均比 2003 年偏高, 重金属污染形势趋于严峻. Cu、Zn、Cd 的空间分布趋势基本相似, 其高值区均集中在渤海湾的中部海域. Pb 的高值区主要集中在近岸河口和渤海湾中部及南部. 4 种重金属相互之间相关性显著, 说明它们之间可能具有一定的同源性. 形态分析表明 Cu、Zn、Cd 主要以残渣态存在, Pb 主要以可还原态存在, 各元素生物有效性排序为: Cd > Pb > Cu > Zn. Cd 为渤海湾表层沉积物中最主要的污染元素, 且具有较强的生态危害. Cu、Zn、Pb 污染程度较低, 生态危害轻微.

**关键词:** 渤海湾; 表层沉积物; 重金属; 空间分布; 重金属形态; 污染评价; 生态危害

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2359-09

## Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay

QIN Yan-wen<sup>1,2</sup>, ZHENG Bing-hui<sup>1,2</sup>, LI Xiao-bao<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, SHI Yao<sup>1,2</sup>, CAO Wei<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Water Research Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** To explore the trend of the changes in ecological environment caused by reclamation and the situation of heavy metal pollution in Bohai Bay, the contents and spatial distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in the surface sediments of Bohai Bay were collected in 2003 and 2011 and studied. The BCR three-stage sequential extraction procedure was applied to investigate the speciation and contents of four heavy metals (Cd, Pb, Cu and Zn) in the surface sediments of Bohai Bay in 2011. The bioavailability of these four heavy metals was also determined preliminarily. Besides, the pollution level and potential ecological risk of these elements were evaluated using the potential ecological risk index and sediment enrichment factors. The results indicated that the contents of Cu, Cd and Pb in the surface sediments of Bohai Bay in 2011 were higher than those in 2003, indicating an increased level of heavy metal pollution. The distribution of Cu, Zn and Cd showed essentially the same pattern, all with higher content in the central area of Bohai Bay. High content of Pb was found in the estuarine, the central and southern area of Bohai Bay. There were significant positive correlations among these four elements. The results indicated that these four elements probably had the same pollution source. Cu, Zn and Cd were mainly found in the residual fractions, whereas Pb was mainly found in the reducible fractions. The bioavailability of these four metals is listed here in descending order: Cd > Pb > Cu > Zn. The comprehensive assessment results showed that Cd was the primary element with high ecological risk while Cu, Zn, Pb were the minor ones with relatively low risk.

**Key words:** Bohai Bay; surface sediment; heavy metal; spatial distribution; speciation of heavy metal; pollution evaluation; ecological risk

重金属是一类很难消除的累积性污染物, 不能被微生物所降解, 并可通过食物链逐级传递富集, 对人体和其他生物的潜在威胁极大<sup>[1]</sup>. 海洋重金属主要集中在沉积物中, 沉积物既是水体重金属的“汇”又是“源”, 经过长时间累积的重金属会随着沉积环境的改变, 从沉积物中排放出来, 造成水体重金属的污染, 导致水体生态环境恶化<sup>[2]</sup>. 沉积物中重金属的环境行为和生物有效性及毒性不仅与重金属的总量有关, 而且与重金属的地球化学形态也密切相

关<sup>[3]</sup>. 不同赋存状态的重金属有不同的物理化学行为, 其释放潜力不同, 对水体生态环境也会产生不同程度的危害<sup>[4]</sup>.

渤海是一个半封闭的陆架边缘海, 主要由辽东湾、渤海湾、莱州湾及中央海区组成, 面积为 7.7 ×

收稿日期: 2011-09-20; 修订日期: 2011-12-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2010BAC69B02); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB407306)

作者简介: 秦延文(1973~), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为河口污染物生物地球化学循环, E-mail: qinyw@craes.org.cn

$10^4 \text{ km}^2$ , 平均水深  $18 \text{ m}$ <sup>[5]</sup>. 渤海湾海岸带是当今中国重要的经济发展区之一, 为了适应经济的迅速发展, 弥补土地资源的不足, 该区域进行了大规模的围海造地工程. 随着周边临港工业区的建设, 围填海面积的逐渐增加, 使得该海域海洋污染严重, 渤海湾承受着越来越大的生态环境压力<sup>[6,7]</sup>. 研究表明人类的生产生活已造成渤海沉积物中重金属的含量增加, 其在沉积物中的沉积、分布变化主要受陆上排污及海湾和河口水动力条件的影响和控制<sup>[8]</sup>. 在某种程度上, 渤海沉积物中重金属的空间变化也体现了该海区生态环境地质演化的趋势<sup>[9]</sup>. 在渤海湾的研究中, 对重金属的含量及分布的研究已有较多工作, 秦延文等<sup>[9]</sup>分别报道了渤海湾海域沉积物中的重金属含量, 并用 2 种评价方法对该海域底质环境进行了评价; 彭士涛等<sup>[10]</sup>对渤海湾重金属污染的潜在生态风险进行评价; 刘俐等<sup>[11]</sup>探讨了渤海湾沉积物中重金属污染程度及其与粒级的关系. 渤海湾大规模的围海造地势必会给该海域沉积物生境带来一定的影响, 目前这样的研究还鲜见报道. 本研究通过对 2003 年和 2011 年渤海湾海岸带流场变化、表层沉积物理化性质、重金属的污染现状及其变化的分析, 以期为进一步揭示渤海湾由于围填海导致的沉积物生境变化趋势和今后渤海湾生态环境的治理提供直接依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 调查区域与站位设置

研究区域选择渤海湾近海海域, 具体位置为东经  $117.37^\circ \sim 118.22^\circ$ , 北纬  $38.36^\circ \sim 39.17^\circ$  之间, 监测点主要分布于渤海湾的陆源河口区域、海洋养殖区域、港口区及其他区域, 基本涵盖了渤海湾典型海岸带大部分海域. 现场调查的采样时间分别为 2003 年 7 月和 2011 年 4~5 月, 2003 年共采集沉积物样品 8 个, 站位设置参见文献<sup>[9]</sup>. 2011 年共采集表层沉积物样品 60 个(图 1).

### 1.2 样品采集与处理

用抓斗式重力采泥器采集表层沉积物样品, 用木勺取顶部  $0 \sim 5 \text{ cm}$  表层沉积物, 将样品装入聚乙烯袋中密封, 在实验室中于  $-20^\circ\text{C}$  条件下冷冻保存, 经 FD-1A-50 型冷冻干燥机(西安德派生物仪器有限公司)冷冻干燥处理, 用重物捣碎研磨, 过 100 目( $0.149 \text{ mm}$ )筛, 保存于封口袋中, 置于干燥器中备用.

### 1.3 测试项目与方法

(1) 重金属总量分析方法: Cu、Zn、Cd、Pb、Fe、

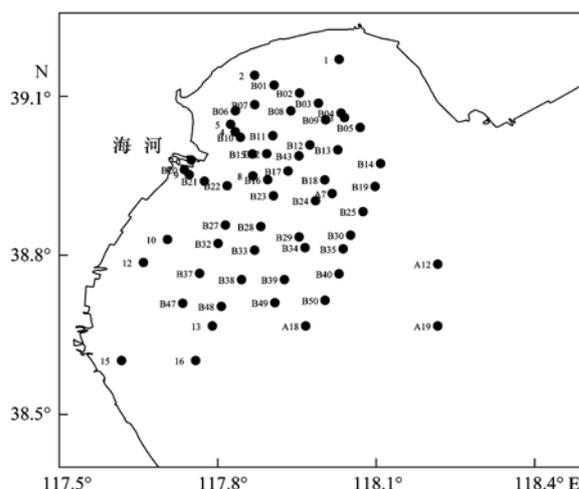


图 1 2011 年渤海湾采样示意

Fig. 1 Locations of sampling sites in Bohai Bay in 2011

Mn、Al 总量分析采用  $\text{HNO}_3 + \text{HF}$  微波消解, 利用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS, 美国 Agilent 7500cx 型) 测定; 分析过程中所用聚四氟乙烯容器均在 1:1 硝酸中浸泡 48 h 以上, 玻璃容器浸泡 24 h, 高纯水冲洗后晾干. 分析所用酸均为优级纯, 水为高纯水. 实验过程中每批样品均做全程空白, 以消除在样品处理及测定过程中可能带入的污染. 实验过程中同步分析了由地球物理地球化学勘查研究所生产的水系沉积物成分分析标准 (GBW 07309), 分别控制样品分析的精密度和准确度. 重金属元素平行样的相对误差  $< 5\%$ , 标准物的回收率在  $80\% \sim 120\%$  之间; Fe、Mn、Al 这 3 种常量元素平行样的相对误差  $< 5\%$ , 标准物的回收率在  $95\% \sim 120\%$  之间. 其中 2003 年沉积物重金属测定方法参见文献<sup>[9]</sup>.

(2) 沉积物重金属形态分析采用 BCR 形态分析法. BCR 法将沉积物重金属赋存形态分为 4 类, 分别是弱酸溶解态 (B1 态)、可还原态 (B2 态)、可氧化态 (B3 态) 和残渣态 (B4 态)<sup>[12]</sup>. 各形态提取液中重金属元素含量利用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS, 美国 Agilent 7500cx 型) 测定, 为保证分析的准确性, 同步分析了由国家地质实验测试中心及中国计量科学研究院生产的湖底沉积物顺序提取微量元素标准物质 (GBW 07436), 各重金属元素不同形态回收率在  $80\% \sim 120\%$  之间范围内, 符合美国 EPA 标准要求.

(3) 沉积物有机质含量 (TOC) 采用重铬酸钾容量法测定; 沉积物粒度使用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪进行测定.

(4) 渤海湾海岸带余流场采用沿水深积分的二维水动力数学模型, 分别对渤海湾 2003 年和 2010 年的流场进行模拟, 在模拟所得流场的基础上, 通过对流场进行长周期统计平均, 获得渤海湾 2003 年和 2010 年对应的余流场。

(5) 沉积物重金属污染评价采用富集系数法和潜在生态危害指数法这 2 种方法来评价渤海湾表层沉积物重金属污染程度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 岸线变迁导致的海岸带流场的变化

由图 2 中 2003 年渤海湾欧拉余流场<sup>[13]</sup>可知: 渤海湾内部主要是以天津港为分水岭的南北 2 个不同方向的沿岸余流。其中, 渤海湾北部至曹妃甸的海域存在一顺时针沿岸余流, 大小在  $2 \sim 6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  之间; 天津港南部至黄骅港北部海域, 存在一逆时针的沿岸余流, 大小在  $2 \sim 4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  之间; 天津港北部存在  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  左右的逆时针环流。黄骅港南部浅滩和曹妃甸浅滩处的余流大小在  $5 \sim 10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。

渤海湾中部余流较小, 在  $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  以下。由此说明, 在 2003 年地形下, 渤海湾的污染物主要是通过扩散和沿岸余流运输出去。

由图 2 中 2010 年的渤海湾欧拉余流场<sup>[13]</sup>可知: 天津港北部新增了泰达围海造地、大神堂围海造地、天津港东疆围海造地等工程, 这使得天津港北部存在的逆时针余流消失, 但其对渤海湾北部至曹妃甸的顺时针沿岸余流影响不大。天津港北部环流的消失, 可能使得天津港北部的污染物逗留时间变短, 同时转而北上到达渤海湾北部, 并通过渤海湾北部的沿岸余流流出<sup>[6]</sup>。天津港南部围海造地工程和黄骅港北部的扩建, 导致天津港南部至黄骅港北部间的逆时针沿岸余流有所减小, 大小在  $1 \sim 3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。这将可能使得这一区域的污染物流出渤海湾需要更长的时间。黄骅港防波堤的建设, 导致黄骅港南下区域余流减小, 同时在港区南部附近形成一逆时针环流, 大小在  $1 \sim 3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  之间, 这可能导致污染物在此区域的逗留。曹妃甸围海造地工程使得曹妃甸的浅滩余流基本消失。

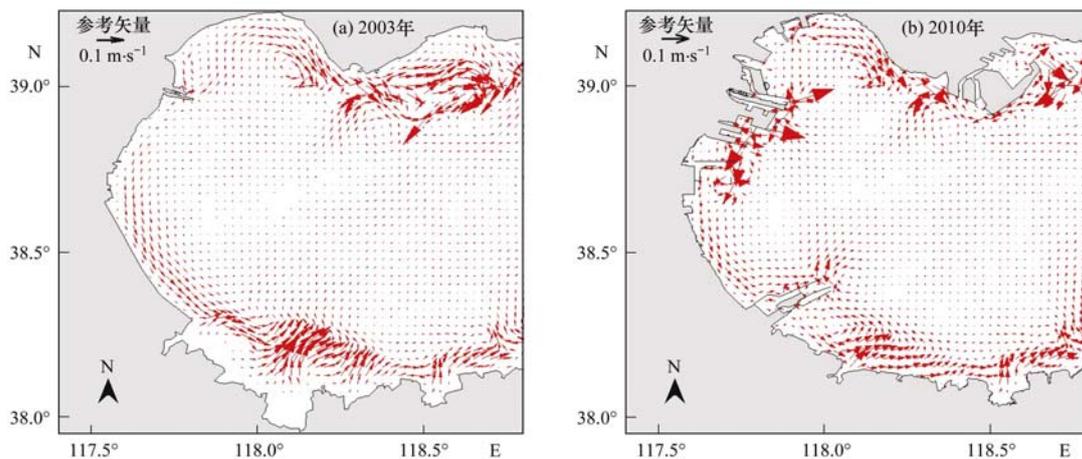


图 2 2003 和 2010 年渤海湾海岸带流场变化

Fig. 2 Tidal current field in coastal waters of Bohai Bay in 2003 and 2010

### 2.2 渤海湾沉积物生境基本理化性质演变特征

#### 2.2.1 粒度

2011 年渤海湾表层沉积物类型主要以黏土质粉砂为主, 黏土质粉砂在所监测的 60 个站位中占 66.67%。渤海湾表层沉积物中粉砂所占百分比为 28.59% ~ 81.26%, 平均为 64.23%; 黏土所占百分比为 8.48% ~ 68.21%, 平均为 23.49%; 砂所占百分比为 0.77% ~ 77.98%, 平均为 12.18%。中值粒径在  $1.45 \sim 53.48 \mu\text{m}$  范围内, 平均值为  $14.98 \mu\text{m}$ 。由图 3 可见, 粒径高值区主要集中在渤海湾北部及东部, 海河入海口处也出现一定的高粒径区域。这可

能是由于天津港北部环流消失, 使得天津港北部大量污染物北上到达渤海湾北部, 通过渤海湾北部的沿岸余流流出。渤海湾北部水动力活跃, 海流较强烈, 使得较粗的沉积物沉积下来。海河入海携带的污染物质也可能引起河口附近粒径发生变化。另外在 北纬  $117.87^\circ \sim 118.11^\circ$ 、东经  $38.94^\circ \sim 39.17^\circ$  之间的区域主要以砂质粉砂为主, 这可能主要受到临港工业区建设的影响, 使得该区域的底质环境发生了一定改变。

#### 2.2.2 有机质

2003 年渤海湾表层沉积物有机质含量为

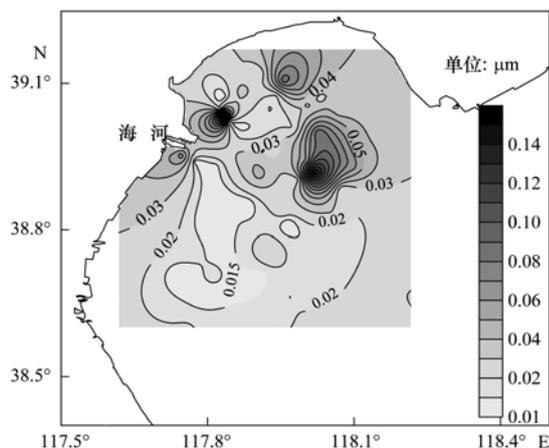


图3 2011年渤海湾沉积物粒度分布示意

Fig. 3 Particle size distribution of surface sediments in Bohai Bay in 2011

1.41% ~ 3.05%, 平均值为 2.08%, 其中以靠近大沽口海域的 A5 站含量最高<sup>[9]</sup>. 大沽口不仅是海河的入海口, 还是天津市南排污河的入海口. 南排污河接纳工农业废水和生活污水, 是大沽口及其邻近海域的主要污染源<sup>[14]</sup>. 2011 年渤海湾表层沉积物的有机质含量为 0.46% ~ 2.83%, 平均值为 0.85%, 较 2003 年有机质含量稍有下降. 其中, 以靠近驴驹河口的 B27 站含量最高. 渤海环境污染主要来自于河流径流污染<sup>[15]</sup>, 受入海河流等陆源污染影响, 其有机质含量较高.

### 2.2.3 Fe/Al/Mn

2003 年渤海湾表层沉积物中 Fe 的含量为 0.609 ~ 0.885  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 0.75  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . Al 的含量为 0.52 ~ 0.73  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 0.62  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . Mn 的含量为 0.52 ~ 0.73  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 0.62  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ <sup>[9]</sup>. 2011 年渤海湾表层沉积物中 Fe、Al、Mn 的含量均比 2003 年高. 其中 Fe 的含量为 20.49 ~ 48.41  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 34.37  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其含量是

2003 年均值的 45.83 倍. Al 的含量为 19.66 ~ 59.29  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 40.38  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 其含量是 2003 年均值的 65.13 倍. Mn 的含量与 2003 年相差不大, 其含量为 0.39 ~ 1.10  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 平均值为 0.71  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . 由表 2 可知, Fe、Al、Mn 三者之间有显著的正相关性, 同时三者与粒度之间也均具有良好的正相关性. 可见, 2011 年 Fe、Al、Mn 的含量较高可能是受到粒度变化的影响, 已有研究表明渤海湾沉积物中 Fe、Al、Mn 的含量随着粒径的变小逐渐增加<sup>[16]</sup>. 3 种元素中以 Al 含量最高, 其次是 Fe, Mn 最少. 结合粒度分析的结果可知, 在表层沉积物中黏土含量与中值粒径数值较高的站点, 颗粒物的粒径较细, 与这些站点较高的 Fe、Al、Mn 的含量相对应. 这是因为颗粒越细的沉积物中水合 Fe、Mn 氧化物及黏土矿物的含量也越高<sup>[14]</sup>.

## 2.3 渤海湾沉积物生境重金属污染演变趋势分析

### 2.3.1 重金属污染演变趋势分析

由表 1 可知, 2003 年渤海湾表层沉积物中 Cu、Zn、Pb 的平均含量均超过了渤海湾重金属背景值<sup>[9,17,18]</sup>. 2011 年 4 种重金属元素的平均含量均高于渤海湾沉积物重金属背景值. 2003 年渤海湾沉积物中 Zn 的富集程度最严重, 其含量为渤海湾沉积物重金属背景值的 1.32 倍<sup>[9]</sup>. 2011 年渤海湾沉积物中 Cd 的富集程度最严重, 其含量为渤海湾沉积物重金属背景值的 1.71 倍. 总体而言, 从 2003 ~ 2011 年渤海湾表层沉积物中虽然 Zn 的含量稍有下降, 但富集程度仍较严重, Cu、Cd、Pb 的含量均比 2003 年偏高, 渤海湾表层沉积物中重金属污染形势趋于严峻. 由图 2 可知, 从 2003 ~ 2010 年, 由于围海造地工程的扩展和周边经济的发展使得渤海湾海岸带流场发生了巨大变化, 入海河口增多, 陆源污染增加, 引起重金属含量增加.

表 1 渤海湾表层沉积物重金属元素含量统计/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Parameters of heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

年份	数据类型	Cu	Zn	Cd	Pb
2003 <sup>[9]</sup>	最大值	32.04	147.60	0.20	19.41
	最小值	24.70	74.26	0.07	15.21
	平均值	27.21	98.92	0.12	17.34
2011	最大值	75.94	246.59	0.57	28.90
	最小值	9.85	23.49	0.11	12.43
	平均值	30.67	79.67	0.24	23.31
渤海湾沉积物中重金属背景值 <sup>[17,18]</sup>		17.54 ~ 25.86	55.30 ~ 75.00	0.04 ~ 0.14	11.29 ~ 16.63

图 4 为 2011 年渤海湾表层沉积物 4 种重金属的空间分布. 可以看出, Pb 的高值区分布较分散, 主要集中在渤海湾近岸子牙新河和独流减河等入海口

处, 说明沉积物中 Pb 的污染可能大部分是由河流输入造成. 独流减河是海河以南的一条主要入海河流, 以有机污染和咸污染为主<sup>[19]</sup>. 独流减河口海域是天

天津市海水养殖区,受养殖废水排放等影响,其重金属含量较高.在渤海湾中部以及南部也形成了 Pb 的高值区,这说明除了径流输入之外, Pb 污染还可能来自大气沉降等非点源.天津港南部沿岸余流的减小,也可能使得这一区域的 Pb 污染物在此逗留. Cu、Zn、Cd 的空间分布趋势基本相似,其高值区主要集中在渤海湾的中部海域,并由中部向外逐渐递减.这种分布特点可能是由于渤海湾中部水动力状况相对稳定,海水稀释作用较弱,有利于污染物的累积,因

而重金属的含量较高.另外, Cd 在天津港北部也形成了 2 个集中的高值区,这可能是由于天津港北部的围海造地工程,使得北部存在的余流消失,从而造成污染物在此积累.4 种重金属的最高值依次出现在从海河入海口直到渤海湾东南部区域,这种空间分布特点可能是受到沉积物粒度从海河入海口到渤海湾东南部由粗变细分布特征的影响,说明受海河等入海污染源的影响,渤海湾重金属元素易附着在细颗粒沉积物上.

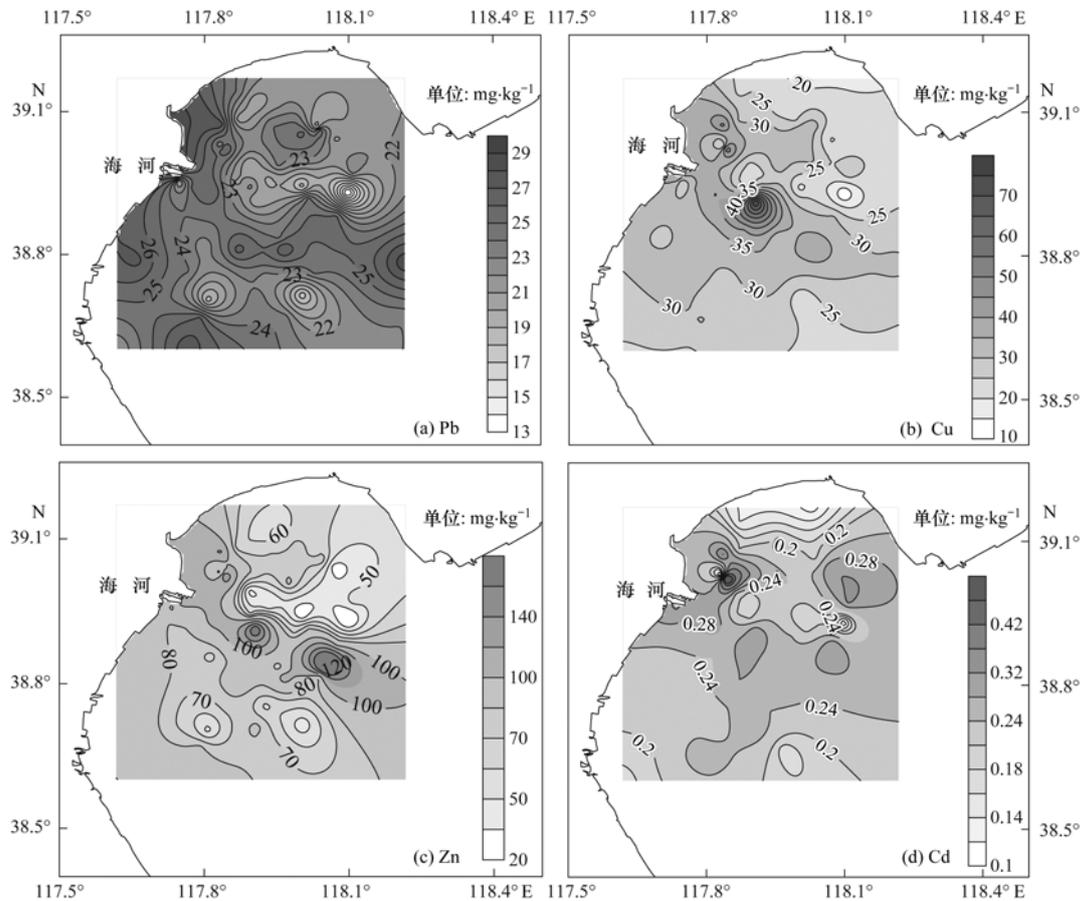


图 4 2011 年渤海湾沉积物 Cu、Zn、Cd、Pb 含量分布示意

Fig. 4 Spatial distribution of Cu, Zn, Cd and Pb in the surface sediments of Bohai Bay

### 2.3.2 表层沉积物重金属含量与其地化指标的关系

由表 2 可知,渤海湾表层沉积物的粒度与 Pb 含量呈显著性正相关,与其他 3 种重金属相关性较低.说明沉积物粒度对于该海域表层沉积物中 Pb 的含量分布具有一定的影响.有机质与 Cd 之间呈现显著性正相关,说明有机质含量与 Cd 在水环境中的行为存在密切关系. Fe 与除 Zn 之外的其它各重金属元素都呈显著性正相关, Al 只与 Pb 呈显著性正相关, Mn 与除 Cd 之外的其它重金属均呈显著性正

相关.说明 Fe、Mn 相可能是该海域重金属元素的主要吸附相.4 种重金属 (Cd、Pb、Cu、Zn) 相互之间的相关性非常明显,说明了它们可能受沉积作用影响呈现较为相似分布特征.

### 2.4 渤海湾主要污染重金属元素的形态分析

渤海湾重金属形态分布特征如图 5 所示.将各重金属的 B1、B2、B3 态含量相加,即得到各种重金属的可提取态总量<sup>[4]</sup>.根据可提取态重金属含量在总量中所占比例,可知渤海湾表层沉积物中各金属的生物有效性大小.

表 2 2011 年渤海湾沉积物地化性质与重金属总量间的相关分析<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation matrix of geochemical characteristics in the sediments and heavy metal contents in 2011

	粉砂	黏土	Cu	Pb	Zn	Cd	有机质	Fe	Al	Mn
粉砂	1									
黏土	-0.145	1								
Cu	0.087	0.253	1							
Pb	0.105	0.405 **	0.411 **	1						
Zn	0.044	0.250	0.642 **	0.512 **	1					
Cd	0.156	0.198	0.616 **	0.458 **	0.473 **	1				
有机质	0.275 *	-0.083	0.247	-0.119	-0.109	0.355 **	1			
Fe	0.407 **	0.268 *	0.497 **	0.321 *	0.196	0.486 **	0.692 **	1		
Al	0.100	0.302 *	0.189	0.408 *	0.191	0.223	-0.033	0.324 *	1	
Mn	0.089	0.597 **	0.268 *	0.624 **	0.462 **	0.173	-0.283 *	0.259 *	0.533 **	1

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

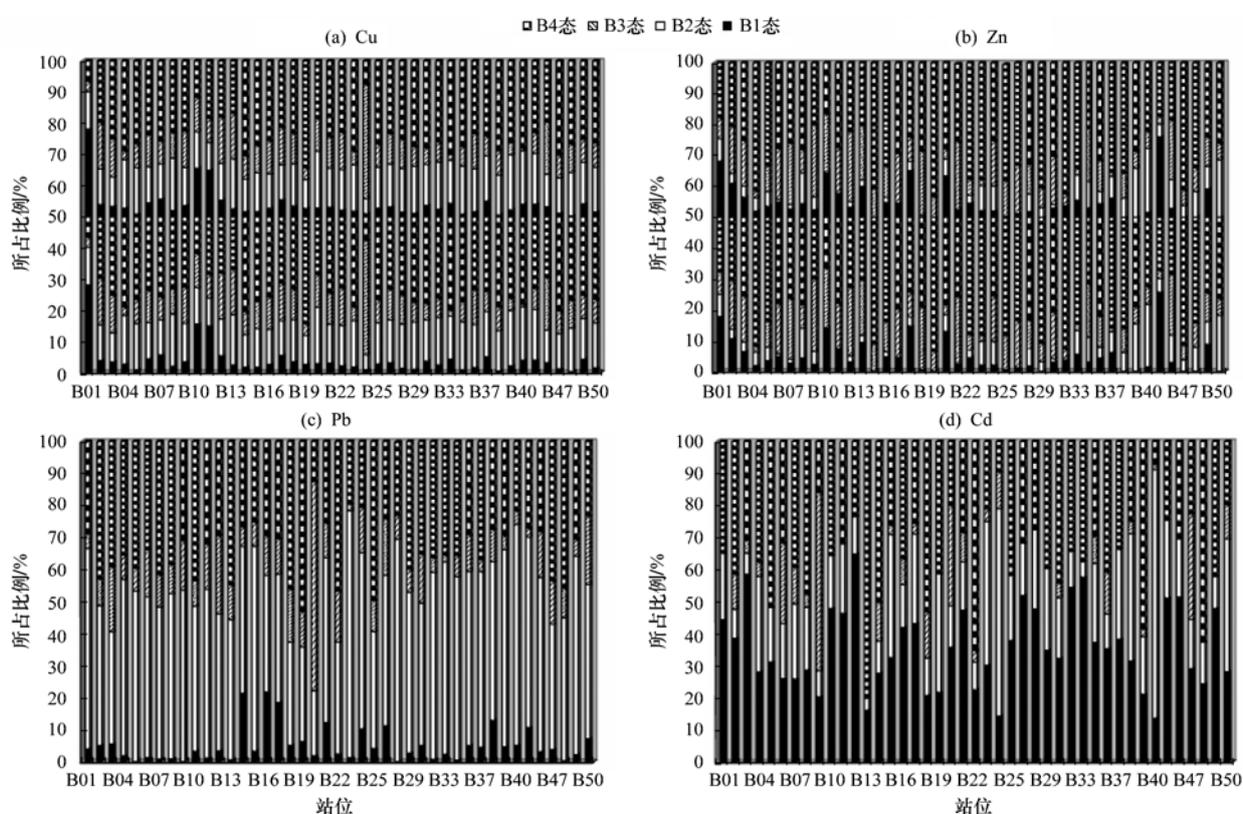


图 5 2011 年渤海湾重金属元素形态分布特征

Fig. 5 Speciation of Cu, Zn, Pb and Cd in the surface sediments of Bohai Bay in 2011

Cu:以残渣态为主,其所占比例为 48.43%,结合在该部分的 Cu 可认为在环境中是惰性的,对生物的毒性较弱<sup>[20]</sup>,这与姚藩照等<sup>[21]</sup>对厦门西海域沉积物中 Cu 的提取结果相似.在空间分布上,渤海湾北部及海河入海口处 Cu 可提取态含量所占百分比为 57.06%,而在中部海域 Cu 可提取态含量平均百分比为 56.16%.说明人为污染的重金属在沉积物中多以可提取态金属存在.渤海湾沉积物中 Cu 在其可提取态中以 B2 态为主,说明 Cu 的潜在生态危害较强,但迁移性不强.

Zn:以残渣态为主,其所占比例为 76.00%.在空间分布上,在渤海湾中部较远的海域 Zn 可提取态含量平均百分比为 48.89%,低于渤海湾北部及海河入海口的 74.20%.Zn 在其可提取态中主要以 B3 态存在,说明 Zn 有较强的迁移性与生物有效性.

Pb:以 B2 态为主,其所占比例为 62.50%.Pb 的 B2 态含量较高且比较稳定,这与姚藩照<sup>[21]</sup>、Galán<sup>[22]</sup>等提取结果相似.从空间分布看,Pb 的赋存特征比较明显,渤海湾北部及海河入海口 Pb 可提取态含量平均百分比为 78.15%,而在渤海湾中部较

远的海域 Pb 可提取态含量平均百分比为 85.37%。说明 Pb 除了陆源径流输入之外,还可能来自大气沉降等非点源。Pb 在其可提取态中主要以 B2 态存在,说明 Pb 具有较强的潜在危害。

Cd:以残渣态为主,其所占比例为 52.73%。Cd 赋存特征极为明显,在渤海湾北部及海河入海口和中部海域其可提取态含量均处于极高的水平,平均达到 96.99%,说明 Cd 具有极强的迁移性与生态危害。相比其它 3 种重金属,可以看出,Cd 为本次渤海湾调查区域最主要的污染元素。

渤海湾表层沉积物中各金属潜在危害程度顺序为 Cd(96.30%) > Pb(85.74%) > Cu(56.63%) > Zn(54.12%),4 种重金属元素都具有非常高的二次释放能力。

## 2.5 渤海湾表层沉积物重金属污染评价

### 2.5.1 表层沉积物重金属富集系数法评价

沉积物富集系数法是 Buat-Menard 等<sup>[23]</sup>于 1979 年提出的,用于评价沉积物重金属污染程度的方法,其计算式为:

$$K_{\text{SEF}} = (S_n/S_{\text{ref}})/(a_n/a_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中, $K_{\text{SEF}}$ 为沉积物中重金属富集系数; $S_n$ 为沉积物中重金属含量; $S_{\text{ref}}$ 为沉积物中参比元素的含量; $a_n$ 为未受污染沉积物中重金属含量,即重金属的背景值; $a_{\text{ref}}$ 为未受污染沉积物中参比元素的含量,即参比元素的背景值。参比元素一般选择在迁移过程中性质比较稳定的元素,如 Al。沉积物中重金属富集系数越大,表示沉积物被重金属污染程度越高<sup>[24]</sup>。按富集系数的大小,可相应地把污染程度分成 5 个等级(表 3)。

表 3 富集系数与污染程度

$K_{\text{SEF}}$	<2	2~5	5~20	20~40	>40
污染程度	无-轻	中等	较强	强	极强

将渤海湾各重金属元素的实测浓度带入公式(1), $S_{\text{ref}}$ 选用渤海湾沉积物中重金属的背景值(Cu、Pb、Zn、Cd 分别取值 25.86、16.63、75、0.136  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[17,18]</sup>,计算得本次渤海湾沉积物中重金属富集系数(表 4)。

表 4 渤海湾沉积物中重金属富集系数

Table 4  $K_{\text{SEF}}$  of the heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay

渤海湾	$K_{\text{SEF}}$			
	Cu	Cd	Pb	Zn
总平均值	1.30	2.41	1.72	1.04

由表 4 可知渤海湾表层沉积物中富集系数最大的重金属元素为 Cd,其污染程度为中等,Cd 的富集系数最大为 5.77,位于 B10 站位,其污染程度为较强。其次在北塘口到渤海湾北部区域 Cd 的富集系数也超过了 4,达到中等污染。Cu、Zn、Pb 的富集系数均小于 2,其污染程度为无到轻微污染。4 种重金属  $K_{\text{SEF}}$ 由大到小排序为: Cd > Pb > Cu > Zn。

### 2.5.2 表层沉积物重金属潜在生态危害评价

Hakanson<sup>[25]</sup>提出的潜在生态危害指数法是目前应用较多的评价沉积物中重金属生态危害的方法,该方法从沉积学角度对沉积物中重金属污染进行评价,利用沉积物中重金属相对于工业化以前沉积物的最高背景值的比值及重金属的生态效应、环境效应和生物毒性系数联系在一起,得到生态危害指数。潜在生态危害指数法的计算公式如下:

$$f_i = c_i/B_i \quad (2)$$

$$E_i = T_i \times f_i \quad (3)$$

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i \times f_i = \sum_{i=1}^n T_i \times c_i/B_i \quad (4)$$

式中, $f_i$ 为第  $i$  种重金属的污染系数; $c_i$ 为沉积物中第  $i$  种重金属的实测含量; $B_i$ 为重金属  $i$  的评价参比值; $E_i$ 为单个重金属的潜在生态危害系数; $T_i$ 为单个污染物的毒性响应参数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度;RI 为多种重金属潜在生态风险危害指数,等于所有重金属潜在生态危害系数的总和。重金属污染程度及潜在生态危害分级划分标准见表 5。

表 5 重金属污染程度及潜在生态危害等级划分标准

Table 5 Dividing standards of heavy metal pollution and the potential ecological risk levels

$E_i$ 范围	单个污染物生态危害程度	RI 范围	总潜在生态危害程度
$E_i < 40$	轻微	$\text{RI} < 150$	轻微
$40 \leq E_i < 80$	中等	$150 \leq \text{RI} < 300$	中等
$80 \leq E_i < 160$	强	$300 \leq \text{RI} < 600$	强
$160 \leq E_i < 320$	很强	$\text{RI} \geq 600$	很强
$E_i \geq 320$	极强		

将渤海湾各重金属元素的实测浓度带入公式(2)~(4), $B_i$ 选用渤海湾沉积物中重金属的背景值(Cu、Pb、Zn、Cd 分别取值 25.86、16.63、75、0.136  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[17,18]</sup>;重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd 的毒性响应参数  $T_i$  分别为 5、5、1、30<sup>[26]</sup>,计算得本次渤海湾沉积物中重金属潜在生态危害系数  $E_i$  及重金属潜在生态危害指数 RI 值(表 6)。

表 6 渤海湾沉积物中重金属污染系数及潜在生态危害指数

Table 6  $E_i$  and RI of heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay

项目	$E_i$				RI
	Cu	Cd	Pb	Zn	
总平均值	5.93	52.87	7.01	1.06	69.06

由单个重金属潜在生态危害系数  $E_i$  可以得出,渤海湾表层沉积物中潜在生态危害最大的重金属为 Cd,其潜在生态危害为中等. Cd 的污染系数最大值出现在靠近大沽河口处的 B10 站,为 125.74. 其次,从北塘口到渤海湾北部区域, Cd 的污染系数也较大. 元素 Cu、Zn、Pb 在所有站位  $E_i$  均小于 40,潜在生态危害为轻微. 4 种重金属潜在生态危害由大到小排序为: Cd > Pb > Cu > Zn. 由多种重金属潜在生态危害指数 RI 评价结果可知, RI < 150,其潜在生态危害为轻微. 各站位 RI 值中 Cd 的贡献率最大,主要原因是渤海湾表层沉积物中 Cd 的含量高于背景值,且 Cd 毒性水平较高. 因此,对渤海湾表层沉积物中的 Cd 应予以重视.

### 3 结论

(1) 2011 年渤海湾表层沉积物的优势粒级为黏土质粉砂,中值粒径的平均值为 14.98  $\mu\text{m}$ . 有机质平均含量为 0.85%,较 2003 年稍有下降. 2011 年表层沉积物中 Fe、Al、Mn 的含量均较 2003 年普遍有所升高,其平均含量分别为 34.37、40.38、0.71  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . 粒度与有机质可能对重金属的分布有着重要的影响.

(2) 2011 年渤海湾表层沉积物中 4 种重金属的平均含量均高于渤海湾沉积物重金属背景值, Cd 的富集程度最严重. 同 2003 年相比, 2011 年 Zn 的含量有所下降,但富集程度仍较严重, Cu、Cd、Pb 的含量均比 2003 年高.

(3) 2011 年渤海湾表层沉积物中 Cu、Zn、Cd 的空间分布规律相似,其高值区均集中在渤海湾的中部. Pb 的高值区主要集中在渤海湾近岸入海口处及中部和南部.

(4) 渤海湾表层沉积物中重金属 Cu、Zn、Cd 主要以残渣态存在, Pb 主要以可还原态形式存在,其中 Cd 可提取态的含量所占比重最高. 各重金属潜在危害程度大小的顺序为 Cd (96.30%) > Pb (85.74%) > Cu (56.63%) > Zn (54.12%), 4 种重金属元素都具有非常高的二次释放能力.

(5) 2 种沉积物重金属污染评价方法的结果具

有一定的一致性. 结果表明,渤海湾表层沉积物中 Cd 为最主要的污染元素,且具有较强的生态危害. Cu、Zn、Pb 基本处于轻度污染. 各重金属元素的污染程度排序为: Cd > Pb > Cu > Zn.

### 参考文献:

- [1] Rai U N, Tripathi R D, Vajpayee P, et al. Bioaccumulation of toxic metals (Cr, Cd, Pb and Cu) by seeds of *Euryale ferox* Salisb. (Makhana) [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(2): 267-272.
- [2] 李仁英, 杨浩, 王丽, 等. 滇池沉积物中重金属的形态分布特征[J]. *土壤*, 2008, **40**(2): 264-268.
- [3] Kot A, Namiesnik J. The role of speciation in analytical chemistry[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2000, **19**(2-3): 69-79.
- [4] 王海, 王春霞, 王子健. 太湖表层沉积物中重金属的形态分析[J]. *环境化学*, 2002, **21**(5): 430-435.
- [5] 李淑媛, 苗丰民, 刘国贤, 等. 渤海底质重金属环境背景值初步研究[J]. *海洋学报*, 1995, **17**(2): 80-85.
- [6] 聂红涛, 陶建华. 渤海湾海岸带开发对近海水环境影响分析[J]. *海洋工程*, 2008, **26**(3): 44-50.
- [7] 天津市海洋局. 天津海洋环境质量公报[R]. 天津: 天津市海洋局, 2010. 1-8.
- [8] 李淑媛, 苗丰民, 刘国贤, 等. 渤海重金属污染历史研究[J]. *海洋环境科学*, 1996, **15**(4): 28-31.
- [9] 秦延文, 苏一兵, 郑丙辉, 等. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价[J]. *海洋科学*, 2007, **31**(12): 28-33.
- [10] 彭士涛, 胡焱弟, 白志鹏. 渤海湾底质重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *水道港口*, 2009, **30**(1): 57-60.
- [11] 刘俐, 宋存义, 熊代群, 等. 渤海湾表层沉积物重金属在不同粒级有机-矿质复合体中的分布[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(1): 75-79.
- [12] Quevauviller P H, Rauret G, López-Sánchez J F, et al. Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **205**(2-3): 223-234.
- [13] 王泽良, 王日新, 陶建华. 渤海湾流场以及污染物分布的数值模拟研究[J]. *海洋与湖沼*, 1999, **30**(2): 224-229.
- [14] 秦延文, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾天津段潮间带沉积物柱状样重金属污染特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 268-273.
- [15] 赵章元, 孔令辉. 渤海海域环境现状及保护对策[J]. *环境科学研究*, 2000, **13**(2): 23-27.
- [16] 郭津年, 李健博, 吴景阳, 等. 渤海沉积物中 Fe、Al、Mn 的分布及某些地球化学特征的研究[J]. *海洋科学*, 1983, (4): 22-25.
- [17] 李淑媛, 刘国贤, 苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境背景值[J]. *中国环境科学*, 1994, **14**(5): 370-376.
- [18] 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 1992. 189-192.
- [19] 渤海碧海行动计划编写组. 渤海碧海行动计划[R]. 北京:

- 国家环境保护总局, 2000. 36-39.
- [20] 徐圣友, 叶琳琳, 朱燕, 等. 巢湖沉积物中重金属的 BCR 形态分析[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(9): 20-28.
- [21] 姚藩照, 张宇峰, 胡忻, 等. 厦门西海域沉积物中重金属的赋存状态及潜在迁移性[J]. 台湾海峡, 2010, **29**(4): 532-538.
- [22] Galán E, Gómez-Ariza J L, González I, *et al.* Heavy metal partitioning in river sediments severely polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt [J]. Applied Geochemistry, 2003, **18**(3): 409-421.
- [23] Buat-Menard P, Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, **42**(3): 399-411.
- [24] 霍文毅, 黄风茹, 陈静生, 等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, **17**(1): 81-86.
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [26] 范文宏, 张博, 张融, 等. 锦州湾沉积物中重金属形态特征及其潜在生态风险[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(1): 54-58.

---

## 《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:[hjcx@rcees.ac.cn](mailto:hjcx@rcees.ac.cn)

网 址:[www.hjcx.ac.cn](http://www.hjcx.ac.cn)

## CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China .....	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring .....	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements .....	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai .....	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China .....	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao .....	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant .....	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model .....	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i> .....	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years .....	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes .....	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling .....	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake .....	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jiashan .....	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing .....	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China .....	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake .....	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales .....	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-Dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment .....	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau .....	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau .....	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering .....	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu .....	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate .....	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake .....	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing .....	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants .....	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing .....	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area .....	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study .....	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay .....	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming .....	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake .....	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors .....	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal in Drinking Water Biofilter .....	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane .....	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation .....	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration .....	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater .....	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN .....	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body .....	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process .....	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System .....	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1 .....	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production .....	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i> .....	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields .....	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary .....	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province .....	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition .....	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils .....	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial .....	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops .....	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid .....	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China .....	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

# 《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7月15日 33卷 第7期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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