

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价

徐亚岩¹, 宋金明^{2*}, 李学刚², 袁华茂², 李宁²

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所农业部海洋与河口渔业重点开放实验室, 上海 200090; 2. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘要: 根据 2008 年春对渤海湾的调查, 通过分级萃取的实验方法以及总量和分形态风险评价的手段, 重点研究了渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征、影响因素和潜在生态风险。结果表明, 重金属在渤海湾中央的泥质区富集, 自然来源是控制 V、Ni、Cu、Pb、Co 和 Cd 分布的主要因素, 而 Zn 和 Cr 较易受环境变化或人为输入等影响, 其中 Pb 作为大气沉降和陆源输入都存在的重金属, 其受控因素与其他重金属有一定差异。形态分析表明, V、Zn 和 Cr 以残渣态为主, Co、Ni 和 Cu 则是可浸取态占优势。其中 Co 的可浸取态质量分数在 A 断面先增加后降低, Ni 的可浸取态质量分数在海河口附近 A3 站达最大值 (98.86%), Cu 和 Pb 的可浸取态高值区出现在 A 断面的中央区域, 优势形态是铁锰氧化物结合态, Cu 在湾口的 A10 站降到最小值 (43.83%), 在黄河口的 D1 站达最大值 (73.89%)。风险评价表明, 重金属总量富集因子由大到小: Pb > Cd > Zn > Cr > V > Co > Cu > Ni, 其中 Pb、Cd 和 Zn 的富集因子均大于 1, 但渤海湾沉积物总体质量良好, 潜在生态风险较低。从形态角度评价, V 和 Cr 基本无污染, Zn 局部轻微污染, Co 大部分轻度污染, Cu 由无污染到中度污染, Ni 由轻度污染到重度污染, Pb 则属重度污染, 其中 Pb 在渤海湾口 A11 站的 $P\%$ (次生相与原生相分布比值) 达 1329%。综合评价得出, Pb 是渤海湾沉积物污染最严重的重金属, Cu 和 Zn 有潜在污染, V、Cr 和 Co 基本清洁。

关键词: 重金属; 形态; 影响因素; 沉积物; 渤海湾

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0732-09

Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay

XU Ya-yan¹, SONG Jin-ming², LI Xue-gang², YUAN Hua-mao², LI Ning²

(1. Key Laboratory of Marine and Estuary Fisheries, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Shanghai 200090, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: The geochemical characteristics of eight heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V and Zn) in two sediment cores from Bohai Bay, North China, were studied. Sediment samples were collected from 27 stations in spring 2008. A sequential extractions procedure was used to gain their fractionation information. Five operationally defined fractions were obtained by this protocol, i. e. exchangeable (L1), bound to carbonates (L2), bound to Fe/Mn-oxides (L3), bound to organic matter and sulphides (L4), and residual fraction (R5). Combined with ecological risk in total contents and fraction, a series of results and viewpoints with regard to distribution characteristics of heavy metals were presented, as well as ecological risk and controlling factors. Heavy metals in sediments were mainly concentrated in the middle region with fine particle. The distributions of V, Ni, Cu, Pb, Co, Cd were mainly controlled by nature source, while Zn and Cr can be easily impacted by environment or human input. Coming from atmospheric deposition and riverine, Pb was different with other heavy metals. Sequential extractions suggested that V, Zn, Cr were mainly composed with residual fractions, while Co, Ni, Cu were dominated by labile fractions. The percentage of labile Co increased from inner to outside, labile Ni reached maximum at station A3, labile Cu and Pb concentrated in the middle of Bohai Bay, while Cu achieved maximum at station D1 near Yellow River. Labile heavy metals were enriched near the estuary of Haihe River. The order of enrichment factors (EF) of heavy metals was Pb > Cd > Zn > Cr > V > Co > Cu > Ni. And the EF of Pb, Cd and Zn were above 1, suggesting that they could be polluted by exterior input, while the sediment quality was relatively good in general. The ratios of labile and residual fraction showed that V and Cr were clean, Zn was partly in slightly polluted, Co was mostly slightly polluted, Cu was from clean to moderately polluted, Ni was polluted from slightly to heavy, and Pb was polluted heaviest in all heavy metal. In conclusion, V, Cr and Co were clean, Cu and Zn may be polluted, while Pb was polluted heaviest.

Key words: heavy metal; fraction; controlling factors; sediment; Bohai Bay

收稿日期: 2011-04-17; 修订日期: 2011-09-22

基金项目: 国家重点基础研究发展项目(2007CB407305); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2011T07)

作者简介: 徐亚岩(1982~), 女, 博士, 主要研究方向为海洋环境化学, E-mail: hz_xyy@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jmsong@ms.qdio.ac.cn

全球经济的快速发展,使得重金属越来越多地被应用到各行各业,重金属的污染现状也越来越严峻,尤其是入海口及近海沿岸附近尤为严重^[1~7]. 重金属大多具有较强的地球化学活性,容易在水体、悬浮颗粒物及沉积物中迁移,同时还有很强的生物活性,能够在生物链内逐级富集^[8~13]. 作为保守的非降解元素型污染物,重金属对海洋生物具有致畸、致癌、致死的危害,造成生态系统的破坏,甚至危害人类的健康生存^[14~18].

重金属通过河流、大气、倾废等许多途径进入海洋后经历的主要生物地球化学行为是悬浮颗粒物的吸附沉降和脱附溶解以及生物摄取重金属并在生物链中传递. 沉积物作为污染物的载体,比水体稳定,能够更准确地记录长期的环境变化过程. 国际及国内对海洋沉积物中的重金属的污染从含量分布特征、来源、评价等方面进行了大量的研究^[19~25],但在重金属的生物地球化学循环中,不同的存在形态会产生不同的生态风险和生物毒性,而在形态的研究中 pH、碱度、氧化还原性等环境因子以及粒度等沉积物本身的特性都会对重金属各形态的分布产生较大影响^[26~29]. 本研究选择易受污染的半封闭海湾——渤海湾,重点分析了重金属各结合形态的环境学特征,并据此进行环境评价,阐述了该区域重金属的潜在生态风险,以为海洋沉积环境质量评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2008 年 4 月利用“中国海监 11 号”科学调查船在渤海湾(117.5°~119.5°E, 37.5°~39.5°N)设站考察,沉积物采样站位见图 1,设 A1-12、B1-4、C1-7、D1-4 共 4 个断面 27 个站位. 断面 A 沿海河径流方向,断面 B 沿南北排河径流方向,断面 C 位于湾中间,断面 D 位于靠近黄河入海口的位置.

1.2 样品分析

1.2.1 总量分析

准确称取 40.00 mg 烘干的样品于 Teflon 罐,用 1 mL 高纯 HNO₃ 和 3 mL 高纯 HF 密封加热,充分溶解样品,冷却后用高纯 HClO₄ 开盖加热至白烟冒尽,用 1 mL 高纯 HNO₃ 和 1 mL 二次去离子水加热回溶,冷却,用二次去离子水稀释至 40.00 mL,低温保存待分析. 根据多年来对不同形态重金属的研究,本研究不同形态重金属的萃取参考文献^[27]的五步萃取法.

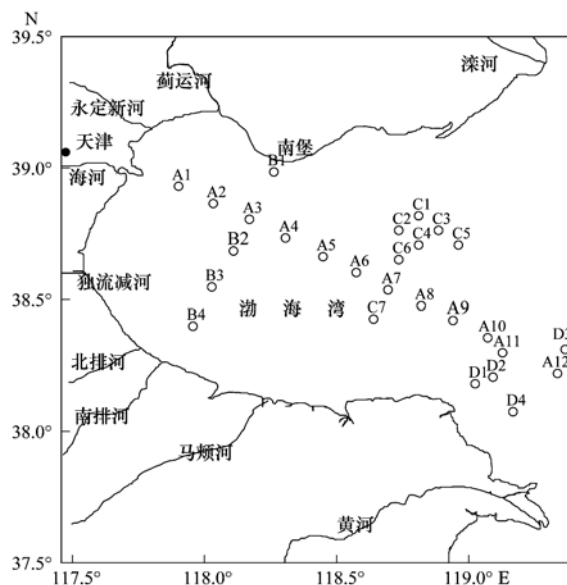


图 1 渤海湾采样站位示意

Fig. 1 Locations of sampling stations in Bohai Bay

1.2.2 形态分析

可交换态(L1):准确称取 0.100 g 烘干的样品于 Teflon 罐中,二次去离子水室温下浸取 16 h,离心分离,上清液低温保存待分析.

碳酸盐结合态(L2):L1 残渣中加入 8.00 mL 0.1 mol·L⁻¹的醋酸室温浸取 16 h,离心分离. 上清液和洗涤液用 1 mL 高纯硝酸提纯,再加入 0.5 mL 高纯硝酸和 2 mL 二次去离子水,回溶 12 h,冷却后用二次去离子水稀释至 20.00 mL,低温保存待分析.

铁锰氧化物结合态(L3):L2 残渣中加入 10.00 mL 0.04 mol·L⁻¹的盐酸羟氨,96℃水浴 6 h,离心分离. 上清液和洗涤液处理方法与 L2 同.

有机结合态(L4):L3 残渣中加入 1.50 mL 0.02 mol·L⁻¹硝酸和 4.00 mL 30% 的双氧水,85℃水浴 2 h,如上重复操作一次,冷却后加入 5.00 mL 3.2 mol·L⁻¹醋酸铵(20% 硝酸作溶剂)浸取 0.5 h,离心分离. 上清液和洗涤液处理方法与 L2 同.

残渣态(R5):总量减去各浸取相的含量.

重金属测定用美国 PerkinElmer 公司电感耦合等离子质谱(ICP-MS),型号 Elan DRCII,样品测定相对标准偏差(RSD) <3%. 本实验所用试剂均为优级纯.

1.3 数据处理

1.3.1 富集因子评价法

选用国家海洋沉积物质量标准(GB 18668-2002),使用单因子污染标准指数评价法,计算方法

如下:

$$PI_i = \frac{c_i}{S_{oi}} \quad (1)$$

式中, PI_i 是某站位重金属 i 的污染指数; c_i 是某站位重金属 i 的实测浓度; S_{oi} 是重金属 i 的评价标准.

为了进一步反映沉积物中重金属元素的区域富集和变化特征,本研究通过富集因子的计算对沉积物中重金属元素的富集程度进行定量描述. 富集因子定义如下:

$$EF = \frac{(M/Al)_s}{(M/Al)_B} \quad (2)$$

式中, $(M/Al)_s$ 是样品中重金属元素与 Al 的比值; $(M/Al)_B$ 是重金属元素与 Al 的背景比值, 这里大陆地壳中重金属元素与 Al 的比值作为背景比值, $EF < 1$ 为不富集, $1 < EF < 3$ 为轻度富集, $5 < EF < 10$ 为中度富集, $10 < EF < 25$ 为高度富集, $25 < EF < 50$ 为极高度富集, $EF > 50$ 为超高度富集.

1.3.2 次生相与原生相分布比值法

传统地球化学观念, 颗粒物中的原生矿物称为原生地球化学相 (primary phase), 原生矿物的风化产物 (如碳酸盐和铁锰氧化物等) 和外来次生物质 (如有机质等) 统称为次生地球化学相 (secondary phase)^[30]. 由此衍生出沉积物中重金属污染的评价方法 (次生相与原生相分布比值法)^[31]:

$$P\% = \frac{M_{sec}}{M_{prim}} \times 100 \quad (3)$$

式中, M_{sec} 是沉积物次生相中的重金属含量, M_{prim} 是沉积物原生相 (此时即形态分析中的残渣态) 中的重金属含量, $P\% < 100$ 为无污染, $100 < P\% < 200$ 为轻度污染, $200 < P\% < 300$ 为中度污染, $300 < P\%$ 为重度污染.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属的分布特征

渤海湾沉积物重金属的平面分布如图 2 所示. 总体来说, 表层沉积物重金属含量为北高南低, 从海河口向外海方向先升后降, 在湾中央泥质区富集. V 在渤海湾口 C 断面出现高值区, 最小值位于黄河口附近的 D1 站位 ($70.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 平均为 $100.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Zn 和 V 的分布非常相似, 在 C 断面出现高值区, 最小值位于黄河口附近的 D1 站位 ($56.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 平均为 $97.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Co、Ni 和 Cu 的高值区也位于渤海湾口的 C 断面, 在黄河入海口附近的 D 断面含量较低, 平均含量分别为 15.55、39.99

和 $35.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Pb 和 Cr 在 A2 站出现极大值, 分别为 $48.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $91.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而其他重金属元素均在此出现极小值, 除此之外 Pb 和 Cr 的分布规律都与其他重金属相同, 平均含量分别为 $30.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $83.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Cd 的分布与其他重金属元素不同, 在 A8 站位达到最大值 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, B 断面 B1 ~ B4 先增加后降低, 平均含量为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与历史研究数据相比, 该时期重金属的含量并没有明显升高, 且重金属的含量水平明显低于沿岸城市排污河中的重金属含量^[6,7], 说明流入渤海湾的重金属受到明显的吸附或者络合作用, 使得表观重金属含量有所降低.

2.2 控制重金属分布的因素

2.2.1 粒度

渤海湾表层沉积物粒度如表 1 所示, 由河口附近到湾中央泥质沉积区, 砂粒级含量逐渐减少, 粉砂粒级含量逐渐增多; 由南部沿岸沉积区到北部沿岸沉积区砂粒级含量逐渐减少, 粉砂粒级含量逐渐增多. V、Cr、Zn、Co、Ni、Cu、Pb 和 Cd 的高值区都与渤海湾中央区域的粉砂及黏土分布基本一致, 与砂的分布相反. 此规律性变化符合“元素的粒度控制律”^[32], 合理地解释了重金属含量分布泥质区高、沙质区低的特征. 来源及细颗粒的吸附絮凝作用是影响重金属富集的主要因素, 而 Pb 的大气来源却导致其最高值出现在 A2 站而不是离岸最近的 A1 站位.

表 1 渤海湾表层沉积物 (不同) 粒度组分所占质量分数/%

Table 1 Percents of different particles in the surface sediments of Bohai Bay/%

站位	<4 μm	4 ~ 16 μm	16 ~ 63 μm	>63 μm
A1	47.6	30.4	20.2	1.8
A2	50.6	18.6	28.1	2.7
A3	53.4	23.6	21.3	1.7
A4	53.3	19.2	20.3	7.2
A5	31.7	37.0	26.4	4.9
A6	31.2	40.0	28.3	0.5
A7	55.4	22.9	21.4	0.3
A8	64.3	18.4	15.0	2.3
A9	61.8	17.8	14.3	6.1
A10	31.9	36.8	30.8	0.5
A12	52.5	21.8	23.7	2.0
B1	51.7	17.2	25.6	5.5
B2	39.7	32.1	26.1	2.1
B3	42.9	24.5	31.4	1.3
B4	44.5	28.9	22.0	4.6
C1	62.7	16.3	19.0	2.0
C6	38.9	33.9	26.0	1.2
C7	42.9	27.2	23.4	6.5
D1	25.5	44.8	23.3	3.9
D4	42.4	31.1	23.8	2.7

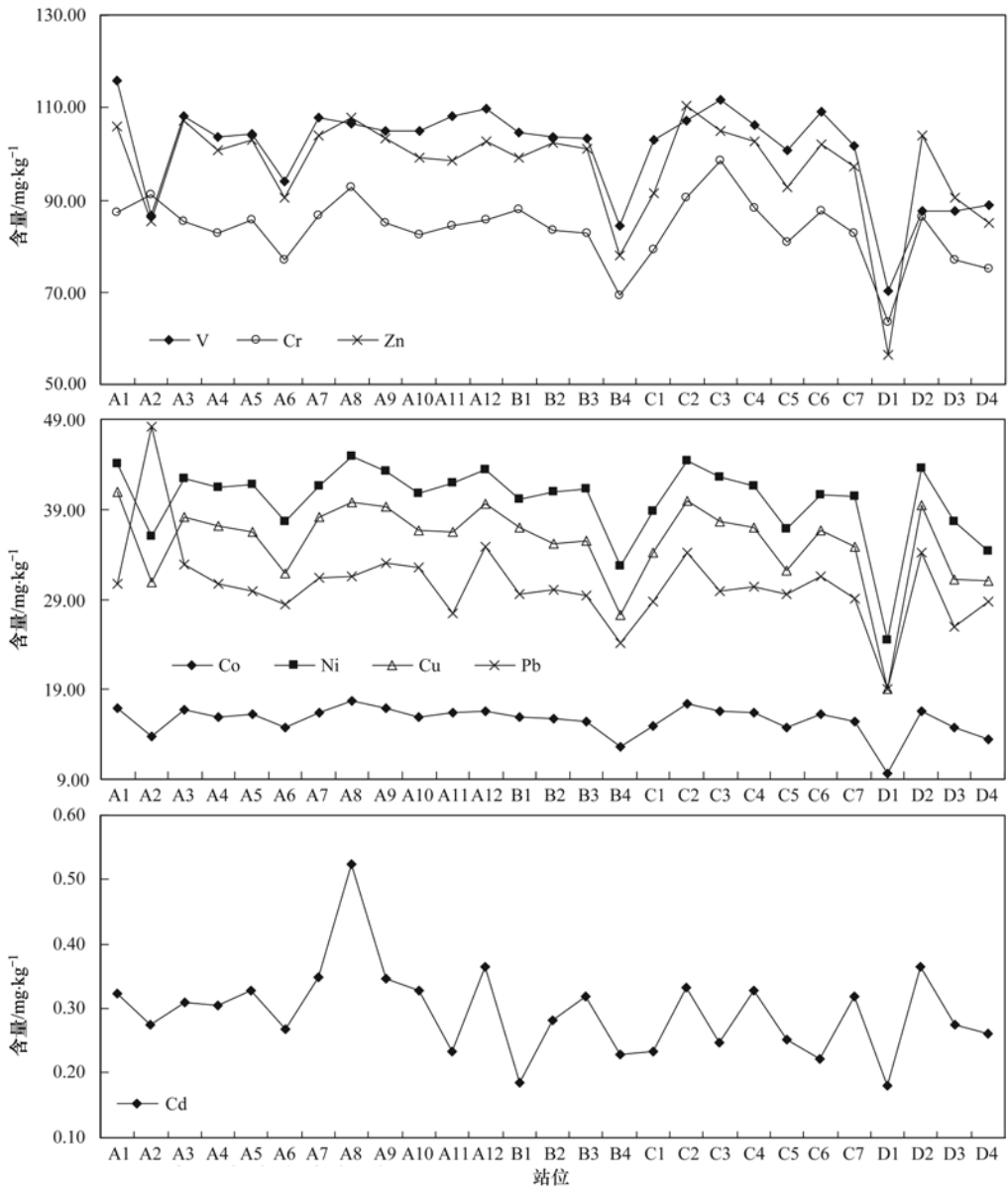


图 2 渤海湾表层沉积物重金属分布

Fig. 2 Distributions of heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay

来源是控制沉积物中重金属分布的主要因素。但是,沉积物中的重金属既有自然来源,也有人类活动的输入。为了消除粒度的影响,有必要对重金属浓度归一化校正,常使用地球化学性质稳定的元素作为标准^[33]。本研究选择 Al 作为归一化的标准元素。渤海湾表层沉积物重金属被 Al 归一化后如图 3 所示。

所有重金属归一化值的波动范围均较之前有明显减小,进一步确认渤海湾沉积物中大部分重金属元素主要受物源和沉积环境等自然因素控制。V、Ni、Cu、Pb 和 Cd 归一化后的分布趋势基本没变,说明自然来源是控制上述重金属分布的主要因素。Co

归一化后的变化曲线几乎平直,说明 Co 与 Al 在渤海湾沉积物中具有共生性,分布受粒度控制。而 Zn 与 Cr 在归一化后的分布趋势发生了明显改变,说明相对其他重金属,Zn 和 Cr 较容易受环境变化或人为输入等影响。

2.2.2 金属之间的相互作用

从重金属之间的相关关系看(表 2),它们之间的相关性好(Cd-V、Cd-Cr、Pb-V、Pb-Cd 除外),其中 Co、Ni、Cu 和 Zn 两两之间均呈现很好的正相关(相关系数都大于 0.95),Co、Ni、Cu 和 Zn 在元素周期表中位置相邻、性质相似、来源相同,造成影响它们分布的因素也相似,这从它们在各站位的分布图

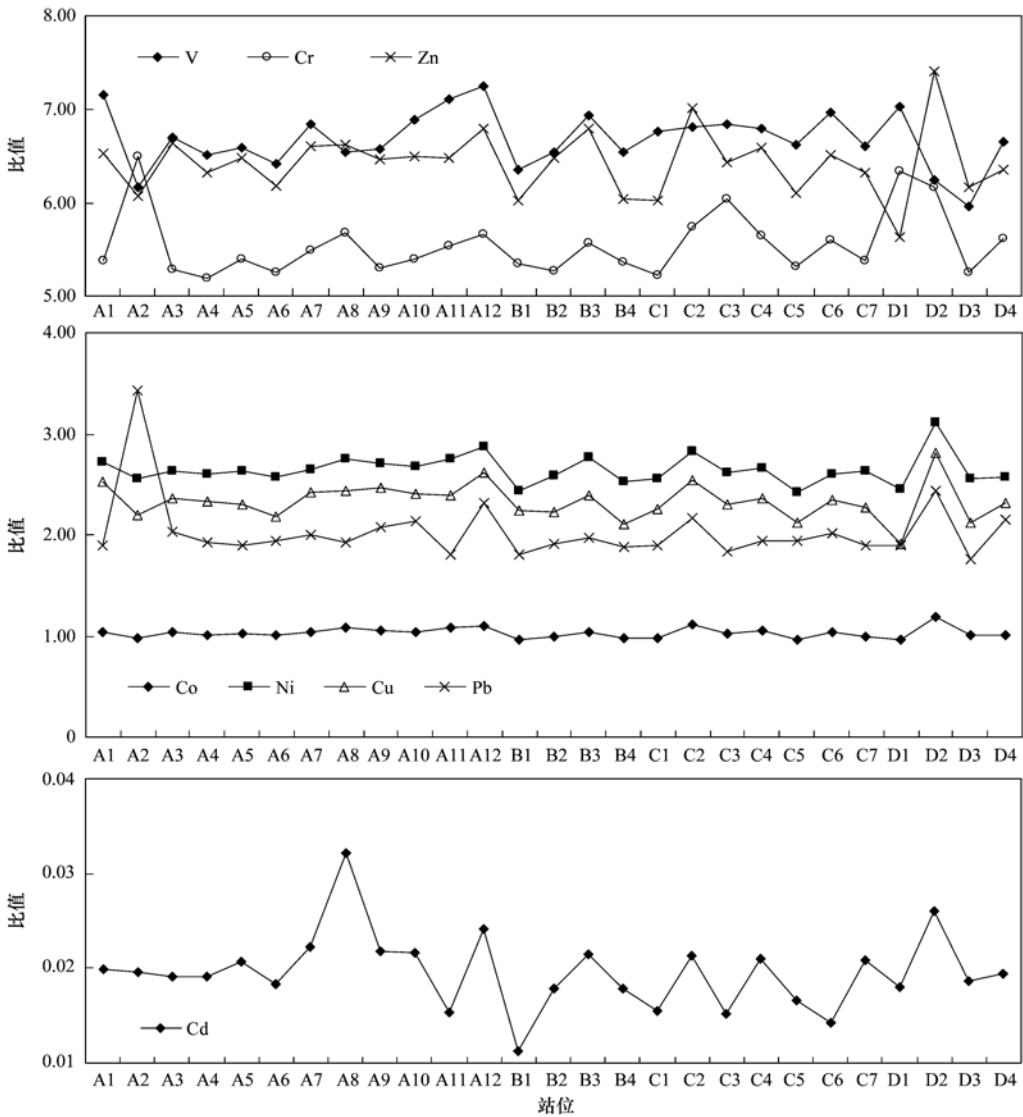


图 3 渤海湾表层沉积物重金属元素被 Al 归一化后的分布

Fig. 3 Distributions of standard heavy metals by Al in the surface sediments of Bohai Bay

表 2 渤海湾表层沉积物各重金属之间的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients among heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay

	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
V	1.00							
Cr	0.72 **	1.00						
Co	0.86 **	0.83 **	1.00					
Ni	0.84 **	0.81 **	0.99 **	1.00				
Cu	0.85 **	0.80 **	0.98 **	0.98 **	1.00			
Zn	0.86 **	0.82 **	0.98 **	0.98 **	0.97 **	1.00		
Cd	0.35	0.44	0.61 **	0.63 **	0.60 **	0.58 **	1.00	
Pb	0.26	0.65 **	0.43 *	0.45 *	0.47 *	0.43 *	0.35	1.00

1) * 表示双边检验 $P < 0.05$; ** 表示双边检验 $P < 0.01$

(图 2) 可以看出, Pb-Co、Pb-Ni、Pb-Cu、Pb-Zn 也有一定的相关性,但相关系数较低,显示 Pb 作为大气沉降和陆源输入都存在的重金属,其受控因素与其他

重金属有一定差异. Cd 与其他重金属的相关性最差,作为最容易发生迁移的重金属,Cd 性质最活泼,也最容易对生物产生毒性.

2.3 沉积物中重金属的不同形态

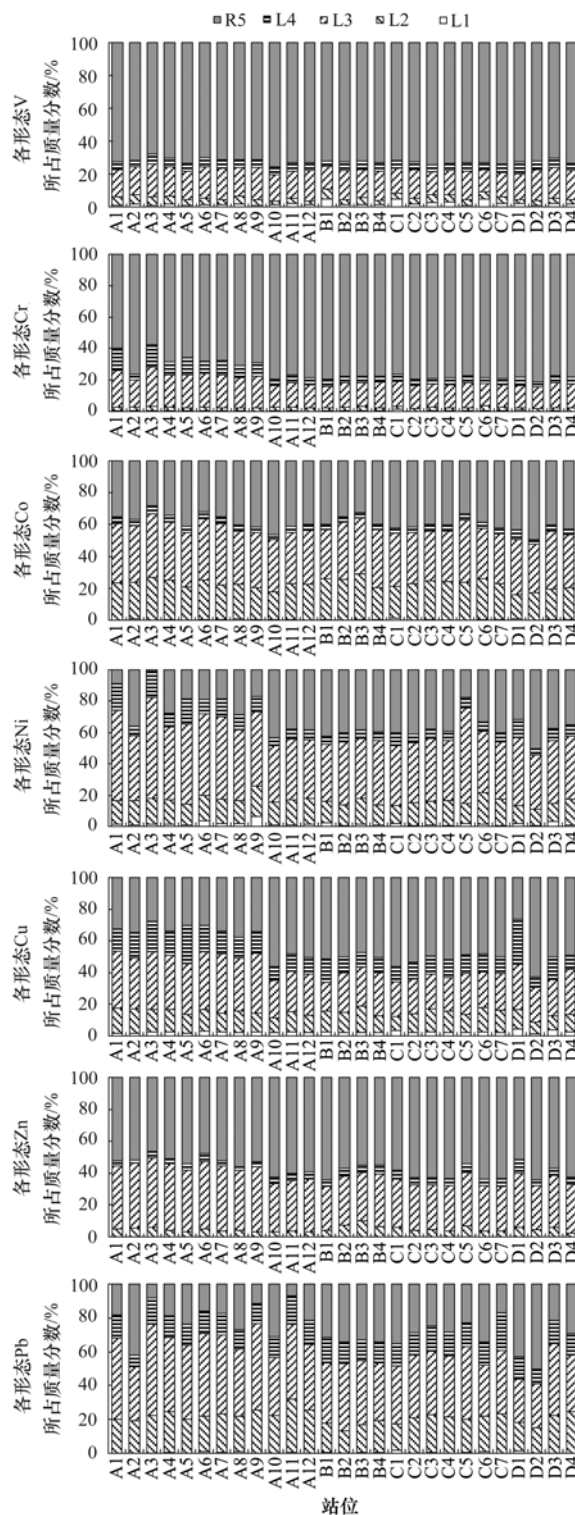
渤海湾表层沉积物重金属的形态分布如图4所示,对于V和Cr,其残渣态远大于其他形态,且残渣态对总量起决定作用;Cu和Zn的铁锰氧化物结合态所占质量分数相对V和Cr有很大提升,不过仍低于残渣态,其中Cu的有机物结合态所占质量分数较高(平均为13.17%),这是由于铜与有机物和硫化物有高度亲和性;Co的铁锰氧化物结合与残渣态所占质量分数相当,且Co的碳酸盐结合态所占质量分数高于其它重金属(与Pb相当);对于Ni和Pb,铁锰氧化物结合态是优势形态,可浸取态所占质量分数大于残渣态。

V以残渣态为主,残渣态质量分数平均为72.34%;Zn以残渣态为主,其同一形态含量在不同站位间差别不大;Cr以残渣态为主,其铁锰氧化物结合态和有机结合态的质量分数在A断面高于其他断面,且随着离岸距离的增加,铁锰氧化物结合态和有机结合态含量逐渐降低(A2站除外);Co的可浸取态总量大于残渣态,平均为71.04%,随离岸距离的增加,可浸取态Co在A断面先增加后降低,在B断面B1~B3逐渐增加,B3~B4迅速降低,在C断面含量保持稳定,Co可浸取态质量分数在D2站出现最小值(49.26%);Ni的可浸取态质量分数大于残渣态,其优势形态铁锰氧化物结合态的平均质量分数为43.55%,尤其在海河口附近站位,Ni的可浸取态质量分数要高于其他站位,在A3站达最大值(98.86%);Cu可浸取态质量分数大于残渣态,在A断面的A1~A9站是可浸取态含量的高值区,并在A10站降到最小值(43.83%),在B、C断面各形态的质量分数保持稳定,在D1站可浸取态质量分数达最大值(73.89%);Pb的优势形态是铁锰氧化物结合态,且Pb各形态在不同站位间差别较大,可浸取态高值区出现在A断面的中央区域。

综合不同形态重金属的变化规律,Cu、Co、Pb和Ni可浸取态质量分数大于其残渣态质量分数,Zn可浸取态与残渣态质量分数差别不大,V和Cr则明显表现为残渣态是优势形态。另外,重金属在海河口附近站位的可浸取态质量分数都较高,结合重金属总量的变化,印证了海河的径流排放是渤海湾重金属主要的源,且海河在一定程度上受到人类活动的影响,致使活性重金属含量偏高。

2.4 渤海湾沉积物重金属的生态环境评估

沉积物中大部分重金属的浓度比水体中高出几个数量级。在一定条件下,底泥中的污染物会重新释



图中 L1、L2、L3、L4 和 R5 分别表示可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态

图4 渤海湾表层沉积物中重金属各形态所占质量分数

Fig. 4 Percent of heavy metals in different fraction in the surface sediments of Bohai Bay

放引起水体的二次污染。因此,选择恰当的评价方法对重金属进行评价能正确反映重金属的污染状况。

2.4.1 富集因子评价法

选用国家海洋沉积物质量标准 (GB 18668-2002) 进行单因子污染指数评价, 结果表明 Cd、Pb 和 Zn 的平均含量均属于一类沉积物, Cu 和 Cr 含量在一类沉积物标准的边缘。

为了进一步表征沉积物中重金属的富集特征, 本研究通过富集因子 (EF) 的计算对沉积物中重金属的富集程度进行定量描述。渤海湾沉积物各重金属元素富集因子的大小为: $Pb > Cd > Zn > Cr > V > Co > Cu > Ni$, 大部分富集因子在 1 附近或 < 1 , 表现出强烈的陆源属性。其中 Pb、Cd 和 Zn 的富集因子 > 1 , 说明了其除受到陆源物质的影响外, 也受到人为污染的影响。与珠江口、胶州湾等国内其他河口近岸相比, 渤海湾各元素富集因子差别较大, 说明对各

不同海域其重金属会有不同的污染。

渤海湾表层沉积物 Pb、Cd 和 Zn 的富集因子变化如图 5 所示, Zn 在不同站位富集因子保持稳定, 接近于 1, 属于轻度污染; 而 Cd 和 Pb 的富集程度相对较高, 变化较大, 是受人为污染影响相对较大的重金属。Cd 的富集因子在 A 断面上随着离岸距离的增加先增大后减小, 在 A8 站达最大值 ($EF = 3.59$); 在 B 断面由南向北方向, Cd 的富集因子先增大后减小, 在 B1 站出现最小值 ($EF = 1.26$); Cd 的富集因子在 C、D 断面相对比较稳定。Pb 的富集因子除在 A2 站出现最大值 ($EF = 4.13$) 外, 在其他站位变化不大, 说明在 A2 站, 可能受到某些点源的污染或者可能是在样品采集或者分析过程中发生了污染。

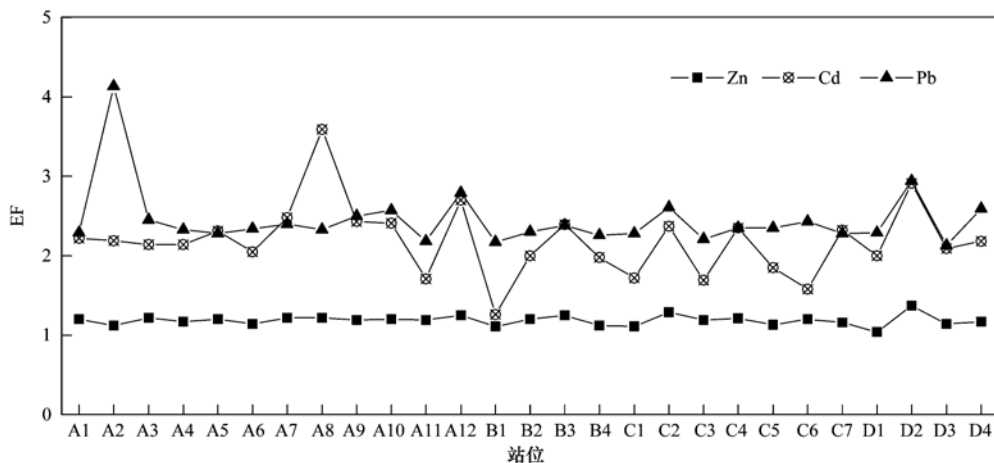


图 5 渤海湾表层沉积物中 Zn、Cd 和 Pb 的富集因子变化

Fig. 5 EF changes of Zn, Cd and Pb in the surface sediments of Bohai Bay

根据富集情况, 重金属元素可分为 2 类: ①无富集类, V、Cr、Co、Ni 和 Cu。其富集因子 < 1 , 在各站位变化不大。其中, Co 和 Ni 等重金属元素含量比较稳定, 不易受外界影响; ②轻度富集类, Pb 和 Cd。由于渤海湾沿岸工农业的发展, 废水、废气、废渣及农药的排放, 造成 Pb 和 Cd 等重金属对海河流域的污染。这些重金属易于被细颗粒物吸附, 经河水携带进入海洋, 沉入海底, 造成了沉积物中重金属含量的升高。

2.4.2 次生相与原生相分布比值法

根据重金属的总量进行富集情况的评价可以了解不同重金属的污染程度, 为了更好地反映沉积物中重金属的活性, 本研究还以次生相与原生相分布比值法对渤海湾沉积物中重金属污染进行评价, 作为评价重金属污染的重要补充, 结果如图 6 所示。渤海湾表层沉积物中, V 和 Cr 无污染; Zn 大部分无污

染, 仅在个别站位 A3 和 A6 站有轻度污染; Co 大部分轻度污染, 仅在 A3、A6 和 B3 站有中度污染; Cu 的污染程度介于轻度和中度污染之间, 沿 A 断面自西向东污染程度逐渐减轻, 在湾口区域基本无污染; Ni 在 A 断面基本属于重度污染, 沿 A 断面自西向东方向污染程度变动较大, 但湾口区域基本属于轻度污染, 在湾中央的 C5 站出现重度污染; Pb 是所有重金属中污染最严重的, 在 A 断面基本都是重度污染, 且污染程度变化特别大, 这可能与其大气沉降的来源有一定关系, 在 B、C、D 断面 Pb 基本属于重度污染, 但污染程度的变动相对 A 断面较小, 唯一的洁净站位 D1 站 ($P\% = 99.89$) 位于黄河口附近。根据形态含量分析得到的重金属污染水平与根据总量分析得到的污染水平都体现出污染最严重的是 Pb, 但形态分析的污染评判更多地考虑到重金属可以被利用的活性态。

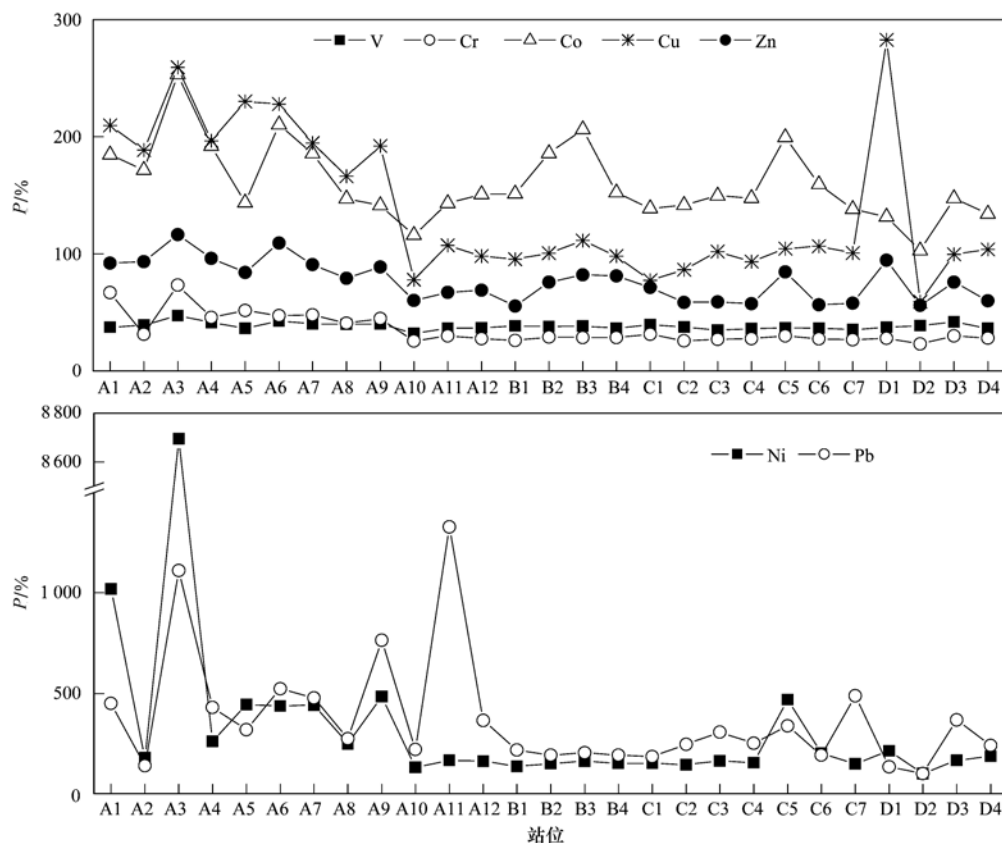


图6 渤海湾表层沉积物 $P\%$ (次生相与原生相分布比值) 的变化

Fig. 6 The $P\%$ (the ratio of secondary phase and primary phase) changes in the surface sediments of Bohai Bay

3 结论

(1) 渤海湾表层沉积物中重金属元素含量分布为北高南低, 河口向外海含量先升后降, 高值区主要集中在海河口区域和渤海湾中央泥质区, 最小值出现在黄河口附近的站点。形态分析研究表明, 重金属在海河口附近可浸取态含量较高, 其中 Cu、Co、Pb 和 Ni 的可浸取态质量分数大于残渣态, 印证了海河来源的径流排放是渤海湾重金属的源, 而海河在一定程度上也遭受到人类活动的影响。

(2) 富集因子分析表明, 渤海湾沉积物重金属可分为 2 类: ① V、Cr、Co、Ni 和 Cu 无富集; ② Pb 和 Cd 轻度富集。次生相与原生相分布比值法表明, V 和 Cr 无污染, Zn 轻微污染, Co 大部分轻度污染, Cu 和 Ni 的污染程度变化较大, Pb 污染最严重。综合 2 种评价方法, Pb 是渤海湾污染最严重的重金属, Cu 和 Zn 有潜在的污染, V、Cr 和 Co 基本清洁。

参考文献:

[1] Nemati K, Abu Bakar N K, Abas M R, et al. Speciation of heavy metals by modified BCR sequential extraction procedure in

different depths of sediments from Sungai Buloh, Selangor, Malaysia[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(1): 402-410.

- [2] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1153-1162.
- [3] 毕春娟, 陈振楼, 许世远, 等. 河口近岸水体中颗粒态重金属的潮周期变化[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 132-136.
- [4] 张乃星, 曹丛华, 任荣珠, 等. 胶州湾外海洋倾倒区表层沉积物中的重金属及其潜在生态风险[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1315-1320.
- [5] 王爱军, 叶翔, 李团结, 等. 近百年来珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物重金属累积及生态危害评价[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1306-1314.
- [6] 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.
- [7] 吴光红, 朱兆洲, 刘二保, 等. 天津城市排污河道沉积物中重金属含量及分布特征[J]. 环境科学, 2008, 29(2): 413-420.
- [8] Rainbow P S. 海洋生物对重金属的积累及意义[J]. 海洋环境科学, 1992, 11(1): 44-52.
- [9] 吴丰昌, 万国江, 蔡玉蓉. 沉积物-水界面的生物地球化学作用[J]. 地球科学进展, 1996, 11(2): 191-197.
- [10] Van Alsenoy V, Bernard P, Van Grieken R. Elemental

- concentrations and heavy metal pollution in sediments and suspended matter from the Belgian North Sea and the Scheldt estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 1993, **133**(1-2): 153-181.
- [11] Sar I E, Çağatay M N. Distributions of heavy metals in the surface sediments of the Gulf of Saros, NE Aegean Sea[J]. *Environment International*, 2001, **26**(3): 169-173.
- [12] 刘文新, 邱伟珣, 陈江麟. 近年渤海与黄海北部沿岸底栖贝类体内微污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 445-451.
- [13] 吴星, 贾永锋, 朱慧杰, 等. 沉积物中颗粒态镉的赋存形态对文蛤富集效性的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 179-184.
- [14] Ahumada I, Ascar L, Pedraza C, *et al.* Determination of the bioavailable fraction of Cu and Zn in soils amended with biosolids as determined by diffusive gradients in thin films (DGT), BCR sequential extraction, and ryegrass plant[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2011, **219**(1-4): 225-237.
- [15] González I, Águila E, Galán E. Partitioning, bioavailability and origin of heavy metals from the Nador Lagoon sediments (Morocco) as a basis for their management[J]. *Environmental Geology*, 2007, **52**(8): 1581-1593.
- [16] 郭明新, 林玉环. 利用微生态系统研究底泥重金属的生物有效性[J]. *环境科学学报*, 1998, **18**(3): 325-330.
- [17] 王文雄, 潘进芬. 重金属在海洋食物链中的传递[J]. *生态学报*, 2004, **24**(3): 600-605.
- [18] 刘宗平. 环境重金属污染物的生物有效性[J]. *生态学报*, 2005, **25**(2): 243-248.
- [19] Mannand A W, Lintern M. Heavy metal dispersion patterns from tailings dumps, Northampton district, Western Australia [J]. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 1983, **6**(1): 33-49.
- [20] Ruler J H. Assessment of trace element geochemistry of Hampton Roads Harbor and lower Chesapeake Bay area sediments [J]. *Environmental Geology*, 1986, **8**(4): 209-219.
- [21] Devesa-Rey R, Díaz-Fierros F, Barral M T. Assessment of enrichment factors and grain size influence on the metal distribution in riverbed sediments (Anllóns River, NW Spain) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **179**(1-4): 371-388.
- [22] Murray K S. Statistical comparisons of heavy-metal concentrations in river sediments[J]. *Environmental Geology*, 1996, **27**(1): 54-58.
- [23] Ma H R, Li H, Ji J F. Speciation and phytoavailability of heavy metals in sediments in Nanjing section of Changjiang River[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **64**(1): 185-192.
- [24] Taylor M P. Distribution and storage of sediment-associated heavy metals downstream of the remediated Rum Jungle Mine on the East Branch of the Finniss River, Northern Territory, Australia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2007, **92**(1): 55-72.
- [25] Chatterjee M, Silva Filho E V, Sarkar S K, *et al.* Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance [J]. *Environment International*, 2007, **33**(3): 346-356.
- [26] 郭明新, 林玉环. 几种化学浸提剂对底泥重金属生物有效部分浸提效果的比较[J]. *环境科学*, 1998, **19**(1): 9-12.
- [27] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [28] 刘清, 王子键, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. *环境科学*, 1996, **17**(1): 89-92.
- [29] 梁涛, 陈岩, 张朝生, 等. 利用网格采样法比较潮间带沉积物不同粒度区域重金属含量特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 421-427.
- [30] 陈静生, 董林, 邓宝山, 等. 铜在沉积物各相中分配的实验模拟与数值模拟研究—以鄱阳湖为例[J]. *环境科学学报*, 1987, **7**(2): 140-145.
- [31] 李桂海. 厦门海域现代沉积环境及重金属元素的环境地球化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [32] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 1994.
- [33] 刘素美, 张经. 沉积物中重金属的归一化问题——以 Al 为例[J]. *东海海洋*, 1998, **16**(3): 48-55.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electroless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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

国内外公开发行人