

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 ..... 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子浓度特征分析 ..... 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 ..... 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM<sub>2.5</sub> 化学组成与时空分布特征 ..... 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 ..... 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 ..... 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 ..... 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 ..... 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 ..... 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 ..... 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 ..... 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 ..... 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 ..... 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 ..... 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 ..... 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 ..... 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 ..... 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 ..... 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 ..... 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 ..... 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 ..... 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 ..... 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 ..... 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 ..... 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 ..... 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 ..... 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 ..... 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的  $\gamma$  辐照还原降解研究 ..... 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 ..... 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 ..... 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 ..... 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 ..... 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 ..... 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 ..... 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪助(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 ..... 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 ..... 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 ..... 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 ..... 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 ..... 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 ..... 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 ..... 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 ..... 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 ..... 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 ..... 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 ..... 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 ..... 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 ..... 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 ..... 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 ..... 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 ..... 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 ..... 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 ..... 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 ..... 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 ..... 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 的脱除性能 ..... 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 ..... 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 ..... 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 ..... 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 ..... 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

# 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征

吴斌<sup>1,2</sup>, 宋金明<sup>1\*</sup>, 李学刚<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为了探讨多重环境因素变化下黄河口沉积物中重金属的环境地球化学行为, 研究了 2011 年 7~8 月黄河口 14 个表层沉积物样品中 Cu、Pb、Zn、Cr、As 和 Hg 等 6 种重金属的分布特征、环境影响因素及其生态风险。结果表明, 黄河口表层沉积物中 6 种重金属平均含量分别为 Cu:  $(16.5 \pm 2.7) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Pb:  $(16.0 \pm 3.4) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Zn:  $(21.0 \pm 3.3) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Cr:  $(17.4 \pm 3.1) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , As:  $(6.5 \pm 1.2) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , Hg:  $(0.0444 \pm 0.0307) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与我国近海其它区域比较, 研究区域重金属含量均处于较低水平。表层沉积物中河口南侧沉积物中重金属含量比北侧高, 并随河口向外沉积物中重金属含量逐渐降低, 此分布趋势在莱州湾西南部尤为明显。重金属间无显著相关关系, 重金属含量与细颗粒物、总有机碳(total organic carbon, TOC)之间亦无显著相关关系, 表明黄河口表层沉积物中重金属受到汛期黄河上游复杂来源的影响, 且粒度、TOC 皆非主控因素; TOC 与黏土的相关系数达 0.724 ( $P < 0.05$ ), 显示 TOC 更易富集于黏土中。与多种背景值及一致性沉积物质量基准比较, 黄河口部分站位 Pb 含量超出背景值, 但该含量水平引发有害生物效应的可能性不大, 尽管重金属含量偏低, 生态风险较小, 但近年来 Hg、Pb 的风险有升高的趋势。

**关键词:** 重金属; 背景值; 沉积物质量基准; 黄河汛期; 黄河口; 表层沉积物

中图分类号: X142; X820.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1324-09

## Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary

WU Bin<sup>1,2</sup>, SONG Jin-ming<sup>1</sup>, LI Xue-gang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The contents of Cu, Pb, Zn, Cr, As and Hg in surface sediment from 14 sampling sites in the Huanghe estuary during July-August, 2011 were measured to investigate environmental geochemical characteristics of heavy metals related to multiple factors. The distribution, relationship with fine fraction and TOC, and sediment quality assessment concerning heavy metals were analyzed. The results showed that average concentrations of Cu, Pb, Zn, Cr, As and Hg in the Huanghe estuary were  $(16.5 \pm 2.7)$ ,  $(16.0 \pm 3.4)$ ,  $(21.0 \pm 3.3)$ ,  $(17.4 \pm 3.1)$ ,  $(6.5 \pm 1.2)$ ,  $(0.0444 \pm 0.0307) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, which were lower than those in other typical areas along the coast of China. The distribution of metals displayed higher profiles in south than that in north of the Huanghe estuary, with a trend of increase seaward, especially for stations in southwest of the Laizhou bay. The insignificant correlation among metals indicated the complex sources of heavy metals in flood season. Pearson correlation was also conducted between metal contents and percentage of fine particulates and TOC, which was also insignificant, suggesting heavy metal concentration and distribution in the study region were also controlled by other factors except grain size and TOC. There was a good correlation between clay fraction and TOC ( $r = 0.724$ ,  $P < 0.05$ ), indicating TOC tends to accumulate in clay. Compared with variety of background values and an internationally used consensus-based sediment quality guidelines (CBSQGs) for saltwater ecosystem, heavy metals in surface sediments from the Huanghe estuary implied a low probability of toxic effect, despite a sharp contamination trend pertaining to Hg and Pb since 1980s.

**Key words:** heavy metal; background value; sediment quality guidelines (SQGs); flooding season; the Huanghe estuary; surface sediment

重金属具有不可降解和生物富集两大特征, 是水生生态系统中重点关注的污染物, 重金属污染是环境科学研究的主要热点之一<sup>[1,2]</sup>。当前重点研究的重金属包括 V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Ag、Cd、Hg、Pb、As、Sn, 其中又以 Hg、Pb、Cd 和 As 等具有显著毒性特征的重金属研究居多<sup>[3,4]</sup>。沉积物是水生生态系统中的重要组成部分, 重金属经由颗粒物这一主要载体被吸附, 最终沉降于沉积物

中<sup>[5]</sup>。沉积物中累积的重金属还可通过物理-化学-生物等途径引起二次污染, 经由解吸、再悬浮等过程重新进入水体<sup>[6,7]</sup>; 或通过生物摄食的方式在高营养级生物体内富集, 因此作为重金属集散场所的

收稿日期: 2012-06-28; 修订日期: 2012-09-17

基金项目: 国家海洋局环境评价项目(DOMEP(MEA)-01-01); 国家自然科学基金创新研究群体项目(41121064)

作者简介: 吴斌(1987~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境海洋学, E-mail: arthurwuio@hotmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: jmsong@ms.qdio.ac.cn

沉积物不断为世人所关注<sup>[8]</sup>. 在人为活动的强烈干扰下, 很多重金属在海洋生态系统中的自然循环过程被打破, 尤其是在工业较聚集、城市化程度较高的陆架边缘海, 工业废水和生活污水大量排入, 导致海水、生物体、沉积物等环境介质受重金属严重污染, 近海环境质量急剧下降, 引发各种海洋生态灾害<sup>[9]</sup>. 因此, 研究近海典型区域, 尤其是受陆源污染影响显著的河口地区沉积物中重金属的含量、分布及污染水平不仅有助于了解水生生态系统的污染情况, 对重金属的环境行为研究更具重要意义.

黄河口位于渤海湾与莱州湾之间, 是典型的近岸河口生态系统. 黄河每年携带大量淡水、颗粒物、营养盐、有机物质、以及重金属等污染物入海. 一方面在黄河口及其邻近海域形成了适宜于海洋生物生长和发育的良好生境; 另一方面, 也造成大量的颗粒物及其吸附污染物在此聚集、富集, 而沉积物的比表面积较大, 多数带有有机配体, 能强烈吸附重金属离子, 是水体生态系统中重金属的重要归趋地. 因此, 沉积物是渤海污染最严重的环境介质之一. 大量污染物从黄河及莱州湾南岸排入渤海<sup>[10,11]</sup>, 使得黄河口及其邻近海域成为重点关注的区域; 黄河口及莱州湾海域的沉积物质主要来自黄河, 黄河口输出的泥沙对渤海西南部沉积作用产生极大影响<sup>[12,13]</sup>, 自 2002 年至今已连续实施逾 10 年的黄河上游调水调沙, 对黄河口及毗邻海域生态系统产生重大影响. 年内尺度上, 从径流量在各月份分配看, 黄河利津输水时期主要集中在汛期(7~10月), 此间径流量占全年的 40.7%~83.8%; 从输沙量在各月份分配看, 黄河利津输沙时期也集中于此期, 期间输沙量占全年的 39.8%~69.0%, 因此, 汛期前后是研究海域水、沙变动最明显的时期. 年际尺度上, 在河区, 黄河、小清河等区域内河流的入海泥沙从 20 世纪中后期就开始明显下降, 与之相反, 入海污染物种类和数量却逐年增加; 在海区, 泥沙的波动引发海流的变化, 加之渤海海峡流入的高盐场的影响, 黄河口及其邻近海域沉积环境和物源状况发生了明显的变化. 因此, 本研究通过对黄河口 14 个表层沉积物样品分析和综合调查, 分析了重金属的空间分布特征及其影响因素, 以区域内多种背景值和一致性沉积物质量基准(CBSQGs)作为评价方法, 评估研究区域内沉积物的环境质量, 探讨了多重环境变化综合影响下, 重金属的环境地球化学特征, 以期为黄河乃至渤海的重金属污染控制提供科学依据, 为生态系统的保护与管理提供数据支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

于 2010 年 7 月~8 月在黄河口采集了 14 个表层沉积物样品(图 1), 其中渤海湾内站位 3 个(A1~A3)、莱州湾西南部站位 4 个(A8~A10)、为了更准确监测黄河对海区环境的影响, 在正对河口两个断面密集设站, 其中靠西断面站位 4 个(A4~A7); 靠东断面站位 3 个(A12~A14). 用抓斗采泥器采集表层沉积物样品, 取其中未受扰动的部分, 采样厚度约 2 cm, 样品采集后置于聚乙烯自封袋中, 于 -20℃ 冰箱中冷冻保存.

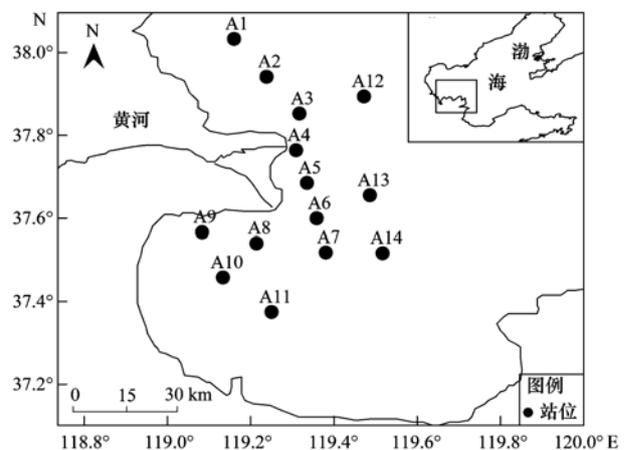


图 1 黄河口沉积物采样站位分布

Fig. 1 Location of sampling stations in the Huanghe estuary

取部分冷冻样品经自然风干后, 去除杂质, 轻轻破碎, 于玛瑙研钵中研磨, 过 160 目塑料筛, 充分混匀后密封储存于干燥器中备用. ①重金属分析: 称取 0.2 g 左右过筛样品, 用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  消解, 以火焰原子吸收分光光度法(日本岛津 AA-6800)测定沉积物中 Cu、Pb、Zn; 用石墨炉原子系统测定 Cr; Hg 和 As 则经  $\text{HCl-HNO}_3$  水浴消解后采用冷原子吸收仪(吉天 AFS-930)测定. ②有机碳测定: 取 0.1 g 左右过筛样品, 经 10% HCl 浸泡去除有机碳后, 离心洗净, 于 105℃ 烘箱中干燥后, 用元素分析仪(德国 Elementar Vario EL 型)测定有机碳含量. ③粒度分析: 取未过筛的湿样约 0.25 g, 先加入 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  于 60℃ 水浴中加热以去除有机物, 后加入 10% 醋酸于 60℃ 水浴中加热溶解碳酸盐, 接着将处理的样品离心清洗, 用超声波分散样品后在激光粒度仪(法国 CILAS-940L)上测定.

上述沉积物样品的采集、预处理、保存和分析均按海洋沉积物监测规范(GB 17378.5-2007)<sup>[14]</sup>中

有关规程操作。

## 1.2 数据处理与分析

数据分析和制图分别采用 SPSS 16.0 和 Origin 8.0 软件。为了分析重金属的来源特征和确定影响沉积物中重金属的含量及地球化学分布的因素及其主次,对沉积物中 6 种重金属,及其与细颗粒组分(砂、粉砂、黏土)以及 TOC 等地球化学参数分别作 Pearson 相关性分析,以上统计分析中,均以  $P < 0.05$  表示显著性差异水平。

## 1.3 评价方法

沉积物质量评价采用背景值和沉积物质量基准两种方法,以分别反映研究区域相对于未受人为污染的沉积物的化学组成以及在现有浓度水平下的生物有害效应发生的可能性。本研究中采用 8 种不同区域尺度或常用的背景值,以期通过多标准比较,确定研究海域沉积物与上述背景值的偏离程度;经验型沉积物质量基准是基于生物毒性效应排序确定的沉积物是否发生生物效应的毒性阈值,它以可靠程度表征其效用(即毒性发生概率),本研究采用一致性沉积物质量基准,它是一种基于多种具有相似评价目的的聚合基准,在阈值计算上,取各基准的几何均值作为新基准的相应阈值。该基准在更科学的理论基础之上,评估研究海域沉积物中重金属的毒性发生概率。

## 2 结果

### 2.1 沉积物粒度组成和有机质含量特征

粒度组成特征和有机碳(total organic carbon, TOC)含量是沉积物的重要地球化学特征参数,分析结果如图 2 所示:①粒度特征,所有站位的沉积物均以黏土和粉砂为主,砂的含量除河口附近的 A4、A6、A8 外,均低于 2%。黏土、粉砂的含量分别为 34.8%~65.4% 和 33.7%~63.8%,平均值为

46.5% 和 49.1%。黄河口邻近 3 个站位(A4、A6、A8)的砂含量分别为 14.2%、24.0% 和 16.0%,相对于其他 11 个站位沉积物,其细粒沉积物(黏土+粉砂)含量显著较低。②有机碳含量特征,黄河口沉积物中有机碳含量范围为 0.08%~0.36%,平均值为 0.21%。以黄河口南侧的 A7、A9、A10、A11 以及河口北外侧的 A12 的含量较高,而渤海湾中 A1、A2、A3 以及河口外侧的 A13、A14 的含量较低。

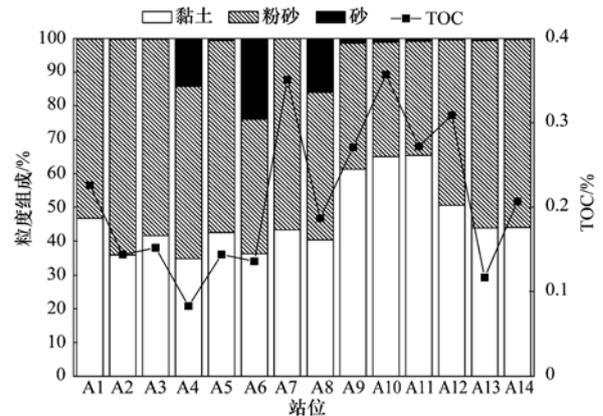


图 2 黄河口表层沉积物中粒度组成和有机质含量

Fig. 2 Grain size composition and TOC of surface sediments in the Huanghe estuary

### 2.2 表层沉积物中重金属含量水平

黄河口 14 个沉积物中共测定 Cu、Pb、Zn、Cr、As 和 Hg 等 6 种重金属,对其含量进行正态检验(显著性水平  $P = 0.05$ ),其中 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg 的浓度服从正态分布,而 As 服从对数正态分布。由表 1 所示的全部站位沉积物中重金属的含量水平可知,黄河口 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg 含量的平均值分别为  $(16.5 \pm 2.7)$ 、 $(16.0 \pm 3.4)$ 、 $(21.0 \pm 3.3)$ 、 $(17.4 \pm 3.1)$ 、 $(0.0444 \pm 0.0307) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (算术均值  $\pm$  标准差),As 含量的平均值为  $6.5 \pm 1.2$  (几何均值  $\pm$  几何标准差)。

表 1 黄河口表层沉积物中重金属含量

Table 1 Concentrations of heavy metals in surface sediments from the Huanghe estuary

重金属	统计值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$				变异系数 /%	百分位数/%		
	最小值	最大值	算术均值	标准差		25	50	75
Cu	12.2	22.6	16.5	2.7	16.4	14.3	16.9	18.4
Pb	11.7	24.7	16.0	3.4	21.3	14.1	14.3	18.1
Zn	14.8	25.4	21.0	3.3	15.7	17.9	21.8	23.4
Cr	13.0	24.1	17.4	3.1	17.8	14.9	16.5	18.9
As	5.1	7.6	6.5	0.9	13.8	5.6	7.0	7.4
Hg	0.009 4	0.092 3	0.044 4	0.030 7	69.1	0.025 6	0.055 1	0.084 2

与国内其它海区相比(表 2),黄河口表层沉积物中重金属的含量水平属于偏低水平。相较于主要

河口,黄河口沉积物中重金属的含量与长江口春季表层沉积物中的含量相近,而比后者夏季含量显著

偏低,这也间接反映沉积物中重金属含量的季节性变化. 长江口入海径流量远超黄河口,夏季剧烈的水动力环境变化,导致结合在沉积物中的重金属通过再悬浮等方式从沉积物中释放<sup>[2]</sup>. 与珠江口、九龙江口相比,黄河口表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr 的含量低,变化范围小,而 As、Hg 的情况则有一定差异. 黄河口表层沉积物中重金属含量比珠江口要低,而与九龙江口大体相近. 从渤海、北黄海等邻近海域的比较来看,黄河口沉积物重金属污染情况基本上属于较清洁水平,尤其相对于辽东湾、锦州湾等渤海沉积物的重金属污染等区域,辽东湾 Cr 的污染突出,而锦州湾的 6 种重金属均属于较严重的污染水平<sup>[15]</sup>; 相对于渤海湾,黄河口沉积物中重金属含量较低,尽管渤海湾没有明显的金属污染情况<sup>[16]</sup>,但渤海湾湾外附近海域受到 Cr、Cu 的污染<sup>[17]</sup>,渤海湾的 Zn 也一定水平上存在污染<sup>[18]</sup>. 本研究的多数采样站位位于莱州湾内,与 2007 年 8 月的重金属调查<sup>[19]</sup>相比,两次相邻年份、同一季节调查结果基本相同,但 Zn、Cr、As 的含量是黄河口的 2 倍以上,这种差别可能来自于采样站位设置和覆盖区域的差异. 与北黄海相比,黄河口除 Cu 含量略高外,其它测定的重金属的含量均偏低. 相对于更大空间尺度的我国其他近岸海域,黄河口除 Cu、Hg

外,其它重金属均较东海低;而南海重金属均较黄河口高.

沉积物中重金属的来源分析对控制、降低污染等环境管理决策具有重要意义,同时还有助于解释重金属的迁移行为. 相关研究表明渤海重金属污染主要来源于陆源污染源,如工业废水、冶金等<sup>[20]</sup>. 本研究通过对 6 种重金属的相关性检验发现,彼此之间相关性不显著( $P < 0.05$ ),表明 Cu、Pb、Zn、Cr、Hg 和 As 的来源较复杂,这可能与黄河汛期有关,此时降雨量大,各种来源的污染物都输入到河流. 据 2010 年黄河泥沙公报中利津水文站的记录,在本研究采样期间,2010 年 7、8 月的径流量分别为 39.10、49.55 亿  $m^3$ ,两月总和占黄河年输水量的 45.9%; 输沙量分别为 5 570、7 310 万 t,两月总和占黄河年输沙量的 77.1%,其中 8 月的径流量、输沙量均为年度最大<sup>[21]</sup>. 尽管黄河携带了整个流域的重金属入海,是黄河口的主要污染源,但黄河口表层沉积物中并未检测到较高含量的重金属,可能原因包括:①黄河河水中悬浮颗粒多,大部分重金属就近沉积于上游河床,导致河口地区重金属含量低<sup>[22]</sup>;②采样季节处于黄河丰水期,所携带泥沙多为降雨侵蚀流域而来,颗粒物粒径较大.

表 2 我国近海沉积物中重金属含量比较<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of heavy metal concentrations in surface sediments along the coast of China

海域	时间(年-月)	样品数 (采样深度)	重金属/ $mg \cdot kg^{-1}$					
			Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg
黄河口 <sup>2)</sup>	2010-08	14 (5~15 cm)	12.2~22.6 (16.5)	11.7~24.7 (16.0)	14.8~25.4 (21.0)	13.0~24.1 (17.4)	5.1~7.6 (6.5)	0~0.092 (0.048)
长江口 <sup>[23]</sup>	2009-05	20 (2 cm)	1.12~53.88 (20.58)	7.38~42.18 (19.42)	17.49~93.34 (53.49)	n. d.	7.42~15.38 (11.84)	0.013~0.045 (0.029)
	2009-08	20 (2 cm)	4.86~34.23 (18.31)	3.01~25.16 (9.79)	12.49~61.16 (36.24)	n. d.	4.55~9.61 (6.46)	0.005~0.123 (0.055)
珠江口 <sup>[24]</sup>	2003~2005	23~30 (20 cm)	8.8~54.6 (38.6)	22.7~77.0 (44.0)	27.2~187.0 (100.7)	53.7~111.0 (81.1)	11.19~74.30 (22.9)	0.014~0.050 (0.170)
九龙江口 <sup>[25]</sup>	2005-12	8 (2 cm)	3.31~34.2 (20.32)	13.2~99.4 (49.15)	n. d.	1.31~33.7 (17.7)	1.2~13.3 (6.83)	0.003~0.078 (0.04)
辽东湾 <sup>[26]</sup>	2003-03	22 (20 cm)	5.2~49.3 (17.6)	6.7~130.6 (23.9)	47.9~322.3 (105.3)	n. d.	n. d.	n. d.
锦州湾 <sup>[27]</sup>	2006-09	14	9.3~1 227.3 (416.9)	218~1 828.3 (753.2)	89.2~13 933.4 (6 419.0)	44.0~72.4 (66.6)	20.4~819.9 (396.5)	n. d.
渤海湾 <sup>[18]</sup>	2003-07	8	24.7~32.04 (27.21)	15.21~19.41 (17.34)	74.26~147.6 (98.92)	n. d.	5.46~7.52 (6.66)	0.25~0.97 (0.57)
莱州湾 <sup>[19]</sup>	2007-08	29	2.9~26.4 (13.3)	11.6~33.1 (20.2)	34.3~93.4 (59.4)	34.0~91.1 (57.1)	9.6~17.9 (13.1)	0.02~0.115 (0.053)
北黄海 <sup>[28]</sup>	2007-10	38	0.79~26.4 (11.6)	11.6~44.3 (25.2)	26.6~91.2 (52.7)	n. d.	5.2~26.4 (13.3)	0.03~0.10 (0.07)
东海 <sup>[29]</sup>	2008	66 (20 cm)	1.86~35.91 (13.01)	9.67~44.34 (22.21)	33.50~105.10 (68.72)	96.55~167.30 (146.2)	n. d.	0.026~0.394 (0.116)
南海 <sup>[30]</sup>	1998	53 (30 cm)	0.072~87.1 (34.0)	3.65~47.3 (24.1)	16.4~207.0 (108.0)	4.45~104.0 (57.9)	0.82~19.0 (6.58)	0.005~0.148 (0.061)

1) n. d. 表示未测; 2) 本研究

### 2.3 表层沉积物中重金属空间分布

黄河口沉积物中重金属的含量空间分布差异不大,14个站位中Cu、Pb、Zn、Cr、As等5种重金属的变异系数在13.8%~21.3%范围内,Hg的变异系数也仅为69.1%,由于Hg的含量水平较其它重金属含量低2个数量级以上,除Hg外的5种重金属含量分布如图3所示.研究区域重金属含量的空间变化小,具有如下两个显著特征.

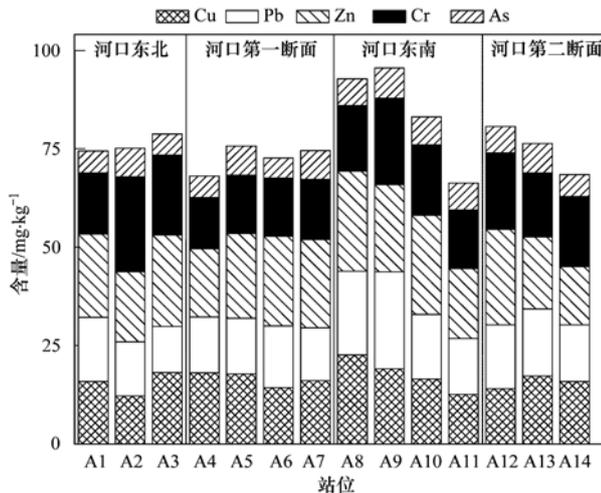


图3 黄河口表层沉积物中重金属的含量分布

Fig. 3 Distribution of heavy metals in surface sediments from the Huanghe estuary

(1)黄河口南侧沉积物中重金属含量,除Cu、Zn外,较北侧高,A8~A11所代表的南侧沉积物中重金属的平均含量比A1~A3代表的北侧高,该分布特征与上述有机碳的分布趋势一致.但由于黄河口两侧的采样站位中沉积物类型均以粉砂和黏土为主,重金属在两侧分布趋势与沉积物类型分布无显著关系,这说明沉积物中的有机质含量可能是影响重金属分布的重要因素,而粒度的影响则不明显.其次,黄河及小清河的泥沙、水量和携带的污染物对莱州湾西南部的沉积物中重金属含量影响极大<sup>[12]</sup>.受莱州湾南部近岸养殖和工业生产的影响,污染程度较高<sup>[11]</sup>,这也是导致黄河口南侧重金属比北侧高的主要原因.此外,Cu、Zn在黄河口南北两侧分布趋势可能受水动力环境与颗粒物的结合能力有关,黄河口南侧的水动力较复杂,而采样时间(8月)是2010年黄河月均径流量最大的月份,据黄河利津水文站的统计高达 $49.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[21]</sup>,可能引发了南侧相对于北侧沉降更多的粗颗粒物,而细颗粒物被迁移的更远,而Cu、Zn与细颗粒的结合能力较强<sup>[31]</sup>.所以,水动力环境和重金属与颗粒物的

结合能力共同影响了Cu、Zn在黄河口两侧沉积物中的分布趋势.

(2)沉积物中重金属含量随着河口向外逐渐降低,并在河口附近达到最大值.A8、A10、A11沉积物中重金属含量大体上显示随离河口距离增加而降低的趋势,尽管A10中的Cr、As的含量比A8高,但仍比A11高;A11中的Hg比A8高;A8、A10、A11中的Cu、Pb、Zn的含量依次降低,;而第一断面(A4~A7)及第二断面(A12~A14)除Cu外,也基本体现该分布规律.

综上,黄河口沉积物中重金属含量及空间分布同时受到来源、水动力环境、以及沉积物类型和有机碳含量等地球化学因素的综合影响.

### 3 讨论

#### 3.1 表层沉积物中重金属与细颗粒物、TOC关系

相关研究表明,自然状态下,重金属的含量与沉积物类型密切相关<sup>[32]</sup>.这种关系的主要原因包括:一是由不同粒度所反映出的矿物组成以及颗粒表面物理化学性质的差别;二是由不同粒度决定的颗粒比表面积、表面自由能的差别<sup>[33]</sup>.有机碳是重金属的重要络合体,它能强烈结合铜、锌等金属离子,对重金属存在形式、迁移及积累等过程起着控制作用.许多研究指出近岸海域沉积物中金属含量和有机物质具有一定的相关关系.此外,有机碳与粒度密切相关,TOC在很大程度上受粒度控制.然而,始于2002的黄河上游调水调沙,改变了以往黄河水沙和污染物的入海格局,影响了入海过程中悬浮颗粒物、污染物的浓度、分布及淡咸水格局等环境条件,最终也将影响到沉积物中重金属的含量与分布.本研究通过各参数之间的Pearson相关分析,揭示了多重环境变化下的重金属环境地球化学特征.

黄河口沉积物中重金属与细颗粒物、TOC的关系见表3,结果显示,黄河口重金属与细颗粒物、TOC之间均不存在显著相关关系,一方面表明在汛期,尤其是径流量最大的8月份,由于黄河口重金属的多种复杂来源以及水、沙变化的影响,沉积物粒度和TOC并非影响重金属含量的主控因素;另一方面表明,在人为活动影响明显的区域,沉积物中重金属受多重因素的控制,包括粒度、TOC、水动力以及区域污染状况等.从TOC与细颗粒物的相关关系(表4)来看,TOC百分含量与黏土百分含量的相关系数达到0.724( $P < 0.05$ ),但TOC与粉砂无显著相关关系,这表明,黄河口表层沉积物在TOC含

量偏低( $<1\%$ )的情况下,TOC 在更易富集于黏土 颗粒物.

表 3 重金属与细颗粒物、TOC 的关系<sup>1)</sup>

Table 3 Pearson correlation result for sediment components

分析参数	统计量	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg
黏土	<i>r</i>	-0.329	-0.104	-0.473	0.225	0.046	0.116
	<i>P</i>	0.251	0.724	0.118	0.440	0.875	0.692
粉砂	<i>r</i>	0.110	-0.143	0.199	-0.133	-0.707	-0.221
	<i>P</i>	0.708	0.626	0.494	0.651	0.448	0.109
砂	<i>r</i>	0.302	0.320	0.333	-0.134	0.218	0.411
	<i>P</i>	0.294	0.265	0.244	0.649	0.455	0.144
TOC	<i>r</i>	-0.448	-0.248	-0.386	0.110	0.126	-0.071
	<i>P</i>	0.108	0.392	0.173	0.707	0.668	0.810

1)  $P < 0.05$  (双尾检验)

黄河口沉积物中 TOC 受黄河泥沙的化学组成影响,含量偏低. 河口地区水体交换强烈,细粒物质迁移距离增加,而相对较粗的颗粒物则在河口沉降,导致该区沉积物以含粗颗粒为主. 此外,悬浮泥沙含量高,导致水体透明度很低,因而初级生产力较低,再加上黄河流域植被稀疏等原因,使得黄河口沉积物中有机碳含量较低. 这进一步显示在汛期径流量和泥沙量加大的情况下,受黄河粗颗粒物的影响,研究海域 TOC 含量相对较低.

表 4 TOC 与细颗粒物的关系<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation between TOC and fine particulates

分析参数	统计量	砂	粉砂	黏土
TOC	<i>r</i>	-0.413	-0.440	0.724*
	<i>P</i>	0.142	0.115	0.03

1)  $P < 0.05$  (双尾检验)

### 3.2 沉积物环境质量评价

#### 3.2.1 背景值法

常用的污染评价方法中,以参照沉积物背景值作为比较前提的方法包括富集因子( EF<sub>s</sub> )、地累积指数(  $I_{geo}$  )及污染因子(  $C_f^i$  )等<sup>[34]</sup>,但上述 3 种方法在人为源污染的判定上,常易引起误导性结果. 研究环境介质是否受到人为源的污染,最好的办法是运用高质量的原始数据与背景值进行有效比较<sup>[35]</sup>. 在实际研究中,由于腐蚀作用、岩石、灰尘、火山活动等地质成因自然源的影响,难以确定人为活动引起的输入,但重金属背景值对正确评价该地区元素的累积以及人为污染强度具有十分重要的意义. 背景值被定义为相对于不受污染情况下,环境介质中环境要素的基本化学组成. 其中以深层岩芯样品的相对稳定段含量作为背景含量的方法最为有效,本研究结合以该方法确定的渤海不同海域沉积物的背

景值以及部分常用背景值,反映黄河口区域表层沉积物相对于未受人为污染的沉积物重金属的化学组成.

与多种背景值(表 5)比较,黄河口重金属中的 Cu、Zn 均未超出渤海湾的背景值,但 Pb 在 7 个站位( A1、A4 ~ A6、A9、A10、A14 )超出此背景值,其中又以 A5、A6 站位 Pb 含量最高,为分别为背景值的 1.6 倍和 1.4 倍;与莱州湾的背景值相比较,除 A8、A9、A12、A14 外,其它站位 Cu 均超过背景值,而全部站位的 Pb 均超背景值,但 Zn 均低于背景值;与渤海中部背景值相比较,仅 7 个站位 Pb 含量超过了该背景值,而 Cu、Zn 含量均低于背景值;从渤海全区域的背景值比较来看,仅 A5、A6 站位的 Pb 超过了该阈值,Cu、Zn 未超出该背景值.

区域尺度上环境介质中某元素的平均值也常被粗略作为背景值,以渤海沉积物重金属平均值作为比较基础,黄河口 A6 站位表层沉积物中的 Cu、A5、A6 站位的 Pb 以及 A4 ~ A6、A8、A10 ~ A12、A14 共 8 个站位的 Hg 超出背景值,其中 A4、A5、A11 的 Hg 含量超过阈值的 2 倍以上;相较于地壳元素均值,黄河口表层沉积物中的 Pb、As、Hg 含量偏高;而当全球页岩均值作为标准时则 Cr 偏高.

综上,选择不同的背景值,沉积物环境质量评价的结果不尽相同,但上述不同的比较却均明确显示黄河口表层沉积物中 Pb 的含量超出背景值,而 Cu、Hg、As 也存在一定的异常. 此结果与 20 世纪 80 年代的几项研究结果相似,认为黄河口及其邻近海域沉积物较清洁,仅部分站位的 Hg、Pb 污染<sup>[36,37]</sup>. 但也显示,受人为活动的影响,黄河口 Hg、Pb 污染有加剧的趋势,本研究中多数站位 Pb、Hg 超过背景值,这与近期相关研究<sup>[16]</sup>指出黄河口附近呈现中度 Hg 污染这一结论相吻合.

表 5 不同地域尺度的沉积物重金属背景值

背景值	重金属(干重)/mg·kg <sup>-1</sup>					
	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg
渤海湾 <sup>[38]</sup>	24.20	15.52	55.30	—	—	—
莱州湾 <sup>[39]</sup>	15.68	8.41	46.73	—	—	—
渤海中部 <sup>[40]</sup>	25.33	14.26	69.99	—	—	—
渤海 <sup>[40]</sup>	26.26	17.31	75.00	—	—	—
渤海沉积物 <sup>[41]</sup>	22	20	64	57	9.0	0.036
中国浅海沉积物 <sup>[41]</sup>	15	20	65	60	7.7	0.025
黄河沉积物 <sup>[41]</sup>	13	15	40	60	7.5	0.015
地壳元素丰度 <sup>[42]</sup>	55	10	79	140	2.1	0.067

### 3.2.2 毒性效应预测

以背景值为基础的评价不能全面反映沉积物的环境质量好坏,缺乏了生物效应表征.沉积物质量基准从生物效应出发,以效应排序确定毒性阈值,是近海沉积物评价的常用工具.尽管不同的基准评价

的结果相似,但不同方法确定的基准的目的、适用性、包含的致污物及其基准值均不同<sup>[43]</sup>.以证据权重的思想,结合多种单个沉积物质量基准的一致性沉积物质量基准(CBSQGs)以毒性效应预测准确度高、普适性强等优点近几年来逐渐发展成为主要的沉积物质量评价工具之一<sup>[44,45]</sup>.Apitz<sup>[46]</sup>通过总结世界不同地区的海洋沉积物质量基准,确定了一种普适性的海洋 CBSQGs.如表 6,其中 TEC 为毒性阈值下限,当沉积物中污染物含量低于该值事,毒性效应发生的概率很低,通常低于 25%;而 PEC 为毒性阈值上限,当沉积物中污染物含量高于该值事,毒性效应发生的概率很高,通常大于 75%;TEC、PEC 之间的阈值范围称为灰色区域是基准不确定性的主要来源,本研究取 TEC、PEC 的平均值作为中等效应浓度 MEC 以降低灰色区域的不确定性.

表 6 沉积物中重金属的毒性效应预测

毒性阈值	重金属(干重)/mg·kg <sup>-1</sup>					
	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Hg
TEC	38.18	52.99	153.50	78.33	16.11	0.18
MEC <sup>1)</sup>	126.41	174.515	274.85	173.405	35.215	0.42
PEC	214.64	296.04	396.20	268.48	54.32	0.66
黄河口表层沉积物平均	16.5 ± 2.7	16.0 ± 3.4	21.0 ± 3.3	17.4 ± 3.1	6.5 ± 1.2	0.044 4 ± 0.030 7

1) MEC = (TEC + PEC)/2

将黄河口表层沉积物中重金属的含量与上述阈值进行比较,结果显示,所检测的 6 种重金属含量均远低于毒性阈值下限 TEC,表明研究区域表层沉积物中重金属引发生物毒性效应的概率很小,基本不存在显著的生物毒性.结合背景值评价的结果,尽管部分站位 Pb、Hg 含量超出背景值,但毒性效应预测评价结果显示有害生物效应发生的可能性较低.因此,在黄河口重金属含量处于较低水平,由其引发的生物毒性效应的可能性较低.尽管如此,由于本研究中仅采集 14 个样品,上述结论存在一定的局限性.

## 4 结论

(1)黄河口表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 等 6 种重金属,以干重计的平均浓度分别为 (16.5 ± 2.7)、(16.0 ± 3.4)、(21.0 ± 3.3)、(17.4 ± 3.1)、(6.5 ± 1.2) 和 (0.044 4 ± 0.030 7) mg·kg<sup>-1</sup>;与我国近海的其他区域比较,该含量处于较低水平;受河口径流输入、泥沙携带等因素的影响,表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 等 6 种重金属在黄河口南侧含量高于北侧,随距河口距离的增加含量逐渐降低.

(2)Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 等 6 种重金属之间无显著相关性,显示汛期,黄河口表层沉积物中重金属具有多种复杂来源;重金属与细颗粒物、TOC 之间亦均无显著相关关系,说明在黄河径流量最大的 8 月,伴随着剧烈的人为干扰,研究海域沉积物中重金属环境地球化学特征受多重因素的控制,且沉积物粒度和 TOC 非主控因素;进一步研究发现,TOC 百分含量与黏土百分含量的相关系数高达 0.724 ( $P < 0.05$ ),但 TOC 与粉砂却无显著相关关系,说明在 TOC 含量偏低 (<1%) 的情况下,研究海域沉积物中的 TOC 更易富集于黏土.

(3)与多种背景值比较,黄河口表层沉积物中 Pb 的含量超出背景值,而 Cu、Hg、As 也存在一定的异常,但毒性效应预测分析显示,6 种重金属含量均低于一致性基准值的阈值下限,显示黄河口重金属引发有害生物效应的可能性很低;尽管如此,对比研究海域上世纪 80 年代的情况,黄河口 Hg、Pb 污染有加剧的趋势,应特别关注.当然,由于研究中样品量偏少,该结论存在一定的局限性.

### 参考文献:

[1] Pan K, Wang W X. Trace metal contamination in estuarine and

- coastal environments in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 3-16.
- [ 2 ] 徐亚岩, 宋金明, 李学刚, 等. 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[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 732-740.
- [ 3 ] Batley G E. "Heavy metal"—a useful term [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2012, **8**(2): 215-215.
- [ 4 ] Duan L Q, Song J M, Xu Y Y, *et al.* The distribution, enrichment and source of potential harmful elements in surface sediments of Bohai Bay, North China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **183**(1-3): 155-164.
- [ 5 ] Burton G A Jr. Metal bioavailability and toxicity in sediments [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(9-10): 852-907.
- [ 6 ] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学[M]. 北京: 海洋出版, 1997. 1-222.
- [ 7 ] 宋金明. 中国近海生物地球化学[M]. 济南: 山东科技出版社, 2004. 1-591.
- [ 8 ] Chapman P M, Wang F Y. Assessing sediment contamination in estuaries[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2001, **20**(1): 3-22.
- [ 9 ] Gao X L, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay [J]. *Water Research*, 2012, **46**(6): 1901-1911.
- [ 10 ] 马绍赛, 幸福言, 崔毅, 等. 黄河和小清河主要污染物入海量的估算[J]. *海洋水产研究*, 2004, **25**(5): 47-51.
- [ 11 ] 国家海洋局北海分局. 2010 年北海区海洋环境公报[EB/OL]. <http://www.ncsb.gov.cn/gggb/ncsb/2011121901.pdf>.
- [ 12 ] 薛敏, 史致丽, 吕小乔, 等. 黄河口及邻近海域表层沉积物中有机物锌、铜、铁、锰的分布特征[J]. *海洋湖沼通报*, 1988, (3): 44-49.
- [ 13 ] 宋金明. 黄河口邻近海域沉积物中可转化的磷[J]. *海洋科学*, 2000, **24**(7): 42-45.
- [ 14 ] GB 17378.5-2007, 海洋监测规范 第 5 部分: 沉积物分析[S].
- [ 15 ] 李淑媛, 苗丰民. 渤海底质重金属环境背景值初步研究[J]. *海洋学报*, 1995, **17**(2): 78-85.
- [ 16 ] 陈江麟, 刘文新, 刘书臻, 等. 渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. *海洋科学*, 2004, **28**(12): 16-21.
- [ 17 ] 李淑媛, 苗丰民, 赵全民, 等. 辽东半岛西南及渤海中部海域表层沉积物的地球化学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, **30**(4): 123-130.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 胡宁静, 石学法, 刘季花, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响[J]. *海洋科学进展*, 2011, **29**(1): 63-72.
- [ 20 ] 黄华瑞, 庞学忠. 渤海西南部潮间带沉积物中的重金属[J]. *海洋科学*, 1992, (5): 44-46.
- [ 21 ] 水利部黄河水利委员会. 2010 年黄河泥沙公报[EB/OL]. <http://www.yellowriver.gov.cn/nishagonggao/2010/index.html>.
- [ 22 ] 吴晓燕, 刘汝海, 秦洁, 等. 黄河口沉积物重金属含量变化特征研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2007, (S1): 69-74.
- [ 23 ] 黄厚见, 平仙隐, 李磊, 等. 春、夏季长江口海水、沉积物及生物体中重金属含量及其评价[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(5): 898-903.
- [ 24 ] 甘华阳, 梁开, 郑志昌. 珠江口沉积物的重金属背景值及污染评价分区[J]. *地球与环境*, 2010, **38**(3): 344-350.
- [ 25 ] 王伟力, 耿安朝, 刘花台, 等. 九龙江口表层沉积物重金属分布及潜在生态风险评价[J]. *海洋科学进展*, 2009, **27**(4): 502-508.
- [ 26 ] 周秀艳, 王恩德, 朱恩静. 辽东湾河口底泥中重金属的污染评价[J]. *环境化学*, 2004, **23**(3): 321-325.
- [ 27 ] 张玉凤, 王立军, 霍传林, 等. 锦州湾表层沉积物重金属污染状况评价[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(2): 178-181.
- [ 28 ] 杜俊涛, 陈洪涛, 田琳. 北黄海表层沉积物中重金属含量及其污染评价[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, **40**(S1): 167-172.
- [ 29 ] 赵宝刚, 邵秘华, 鲍永恩, 等. 东海表层沉积物中重金属集散特征及变化规律[J]. *大连海事大学学报*, 2008, **34**(3): 13-16.
- [ 30 ] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. *海洋学报*, 2005, **27**(4): 161-167.
- [ 31 ] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Trace metal speciation in the Yamaska and St. François rivers (Quebec) [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1980, **17**(1): 90-105.
- [ 32 ] Horowitz A J, Elrick K A. The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry[J]. *Applied Geochemistry*, 1987, **2**(4): 437-451.
- [ 33 ] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J]. *地质科学*, 1983, (4): 307-314.
- [ 34 ] Reimann C, De Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment; regional geochemical surveys versus enrichment factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **337**(1-3): 91-107.
- [ 35 ] Reimann C, De Caritat P. Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(24): 5084-5091.
- [ 36 ] 黄薇文, 张经, 陆贤崑. 黄河口地区底质中重金属的分布特征、污染评价及其与泥沙运动的关系[J]. *环境科学*, 1985, **6**(4): 29-34.
- [ 37 ] 赵其渊, 李家丰, 丁红, 等. 黄河口沉积物微量元素的多元统计分析[J]. *山东海洋学院学报*, 1985, **15**(1): 169-178.
- [ 38 ] 李淑媛, 郝静. 渤海湾及其附近海域沉积物中 Cu, Pb, Zn, Cd 环境背景值的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1992, **23**(1): 39-48.
- [ 39 ] 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.
- [ 40 ] 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.
- [ 41 ] 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. 175-178.
- [ 42 ] Winter M. Abundance of elements in earth's crust [EB/OL].

- http://www. webelements. com/contents. html.
- [43] Apitz S E, Barbanti A, Giulio Bernstein A, *et al.* The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(5): 326-341.
- [44] MacDonald D D, Dipinto L M, Field J, *et al.* Development and evaluation of consensus-based sediment effect concentrations for polychlorinated biphenyls [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, 19(5): 1403-1413.
- [45] 吴斌, 宋金明, 李学刚, 等. 一致性沉积物质量基准 (CBSQGs) 及其在近海沉积物环境质量评价中的应用 [J]. *环境化学*, 2011, 30(11): 1949-1956.
- [46] Apitz S E. Analysis of the internationally used sediment quality guidelines (SQGs) for use in Venice Lagoon sediment assessment and management [R]. Herts: SEA Environmental Decisions, 2003. 111-112.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www. hjcx. ac. cn](http://www.hjcx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

**期刊:**作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

**图书:**作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

**会议文集:**作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

**学位论文:**作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

**报告:**作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

**专利:**专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;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

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM <sub>2.5</sub> at Dinghu Mount .....	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing .....	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> Species in Shenzhen .....	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou .....	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China .....	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City .....	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors .....	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method .....	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changlu River .....	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City .....	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed .....	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter .....	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan .....	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary .....	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland .....	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai .....	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas .....	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province .....	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes .....	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk ( <i>Rapana venosa</i> ) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China .....	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System .....	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm .....	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process .....	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon .....	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon .....	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation .....	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process .....	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon .....	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter .....	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX .....	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process .....	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System .....	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes .....	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method .....	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules .....	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery .....	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picoplankton of Lakes .....	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i> .....	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay .....	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment .....	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .....	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 .....	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities .....	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation .....	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media .....	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil .....	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot .....	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density .....	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils .....	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils .....	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant .....	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils .....	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills .....	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide .....	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC .....	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon .....	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application .....	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China .....	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

# 《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行