

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

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

北京不同污染事件期间气溶胶光学特性 施禅臻,于兴娜,周斌,项磊,聂皓浩 (4139)

秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析 张岩,张洪海,杨桂朋 (4146)

中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征 杨毅红,陶俊,高健,李雄,施展,韩保新,谢文彰,曹军骥 (4152)

改进的大气 CO₂、CH₄、N₂O、CO 在线观测 FTIR 系统 夏玲君,刘立新,周凌晔,方双喜,王红阳,张振波 (4159)

长沙市郊大气 CH₄ 浓度变化特征 刘鲁宁,王迎红,徐小娟,王卫东,王跃思 (4165)

麦草及其烟尘中正构烷烃的组成 刘刚,李久海,徐慧,吴丹 (4171)

过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭 杨世迎,王雷雷,冯琳玉,赵腊娟,石超 (4178)

污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征 钟佳,魏源送,赵振凤,应梅娟,周国胜,熊建军,刘培财,葛振,丁刚强 (4186)

长江口滨岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究 顾丽军,杨毅,刘敏,聂明华,李涛,侯立军 (4195)

海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价 吕书丛,张洪,单保庆,李立青 (4204)

汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征 东口朋宽,史江红,张晖,刘晓薇 (4211)

基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析 李凯,曾凡棠,房怀阳,林澍 (4218)

合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析 戴梅红,李田,张伟 (4226)

微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究 随伟伟,丁海兵,杨桂朋,陆小兰,李文娟,孙立群 (4231)

太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响 马久远,王国祥,李振国,许宽,周锋,张佳 (4240)

表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究 秦晶,高甫威,谢慧君 (4251)

带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究 王亚,张春华,王淑,申连玉,葛滢 (4257)

镧改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究 李佳,林建伟,詹艳慧 (4266)

底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究 任朝亮,宋进喜,杨小刚,薛健 (4275)

铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成:氯化化和溴化比较 田川,郭婷婷,刘锐平,William Jefferson,刘会娟,曲久辉 (4282)

天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析 徐磊,俞文正,梁亮,王彤 (4290)

DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响 丰桂珍,董秉直 (4295)

零价铁去除废水中的汞 周欣,张进忠,邱昕凯,王定勇 (4304)

Fe₃O₄ 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究 周红艺,梁思,雷思思,雷双健 (4311)

不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究 李政剑,石宝友,王东升 (4319)

氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,方巧,杨孟娟,王虹 (4325)

改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究 吴艳,罗汉金,王侯,张子龙,王灿,王雨微 (4333)

经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题 朱健,吴庆定,王平,李科林,雷明婧,张伟丽 (4341)

硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响 刘妍妍,龙焰,尹华,叶锦韶,何宝燕,张娜 (4349)

硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究 张丽,黄勇,袁怡,李祥,刘福鑫 (4356)

硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究 袁怡,黄勇,李祥,张春蕾,张丽,潘杨,刘福鑫 (4362)

UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析 赵健慧,张百惠,李宁,王兵,李永峰 (4370)

响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价 李华楠,徐冰冰,齐飞,孙德智 (4376)

高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应 刘炎,石小荣,崔益斌,李梅 (4386)

NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究 李慧颖,杜晓明,杨宾,伍斌,徐竹,史怡,房吉敦,李发生 (4392)

近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征 章明奎,常跃畅 (4399)

浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨 黄春雷,宋明义,魏迎春 (4405)

黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征 孙文广,甘卓亭,孙志高,李丽丽,孙景宽,孙万龙,牟晓杰,王玲玲 (4411)

崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究 孙阳昭,王学彤,张媛,孙延枫,李梅,马中 (4420)

福建戴云山山脉土壤有机氯农药残留及空间分布特征 瞿程凯,祁士华,张莉,黄焕芳,张家泉,张原,杨丹,刘红霞,陈伟 (4427)

电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平 邵科,尹文华,朱国华,巩宏平,周欣,王玲,刘劲松 (4434)

外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性 蔡荟梅,彭传燧,陈静,侯如燕,宛晓春 (4440)

丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用 赵仁鑫,郭伟,付瑞英,赵文静,郭江源,毕娜,张君 (4447)

丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果 李少朋,毕银丽,孔维平,王瑾,余海洋 (4455)

超积累植物垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.) 吸收锰机制的初步探讨 徐向华,李仁英,刘翠英,施积炎,林佳 (4460)

Shewanella oneidensis MR-1 对硫化汞的生物利用性研究 陈艳,王卉,司友斌 (4466)

基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究 蒋宝,崔晓勇 (4473)

不同结构有机磷在(氢)氧化铝表面的吸附与解吸特征 柳飞,张延一,严玉鹏,刘凡,谭文峰,刘名茗,冯雄汉 (4482)

煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究 熊金钰,李寒旭,董众兵,张颂,钱宁波,武成利 (4490)

植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 杨新萍,赵方杰 (4495)

《环境科学》征订启事 (4239) 《环境科学》征稿简则 (4369) 信息 (4225, 4265, 4303, 4375)

海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价

吕书丛^{1,2}, 张洪^{1*}, 单保庆¹, 李立青²

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074)

摘要: 针对海河流域河流污染严重, 河口区域污染状况以及陆源河流污染对河口区域影响不明确的问题, 选取海河流域 10 个主要入海河口为研究对象, 对其表层沉积物中 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Ni 进行总量及空间分异性研究, 采用潜在生态危害指数法进行重金属生态风险评价。结果表明, 沉积物中 6 种重金属元素均有较明显的积累, 含量高于海河流域主要土壤类型环境背景值, 其中 Cu、Ni、Pb 达到环境背景值的 2.3~2.6 倍。重金属污染具有一定的空间分异性, Cu、Zn、Cr、Ni 在永定新河、子牙新河、北排河 3 处的含量较高, 4 种元素相关系数为 $R_{Cu-Zn} = 0.891$ 、 $R_{Cu-Cr} = 0.927$ 、 $R_{Cu-Ni} = 0.964$ 、 $R_{Zn-Cr} = 0.842$ 、 $R_{Zn-Ni} = 0.939$ 、 $R_{Cr-Ni} = 0.879$ ($P < 0.01$), 具有一定的同源性, 并与流域内总人口显著相关, 相关系数 R 分别为 0.855、0.806、0.867 和 0.855 ($P < 0.01$)。Pb、Cd 的空间差异较小, 含量范围分别为 $23.3 \sim 95.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.051 \sim 0.200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与其它元素及流域内总人口相关性不强, 反映出河口区域的 Cd 和 Pb 与陆源污染关系不大。潜在生态危害指数评价显示, 海河流域河口区域整体为轻微生态风险等级 (RI 为 33.7~116), Cd 为主要污染元素, 在多数河口 Cd 均达到中等风险等级 (E_r^i 为 18.0~48.9)。

关键词: 海河流域; 河口; 表层沉积物; 重金属; 空间分异性; 生态风险

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4204-07

Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin

LÜ Shu-cong^{1,2}, ZHANG Hong¹, SHAN Bao-qing¹, LI Li-qing²

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is well known that the rivers in the Haihe River Basin have been seriously polluted. However, what is the present condition of the estuary pollution and how the polluted inland rivers affect the estuary areas are not clear. 10 main estuaries of the Haihe River Basin were selected to measure the contents of typical heavy metals (Pb, Cu, Zn, Cd, Cr and Ni) in the surface sediments and to analyze the spatial distribution of these heavy metals. The potential ecological risk index was used to assess the ecological risk of the six heavy metals in the estuaries. The results showed that the contents of Pb, Cu, Zn, Cd, Cr and Ni in the surface sediments of the 10 estuaries were all higher than their background values in the main local soil types and the contents of Cu, Ni and Pb were 2.3-2.6 times as high as their background values, which indicated that the estuaries were contaminated by the six heavy metals. The results also indicated that the contents of the six heavy metals in surface sediment varied from one estuary to another. The four heavy metals of Cr, Cu, Ni and Zn had bigger spatial differences than Pb and Cd in the contents in sediment from different estuaries. The contents of Cr, Cu, Ni and Zn in sediment were higher in the estuaries of the Yongdingxin River, Ziyaxin River and Beipai River than those in the other estuaries, and there were significant correlations between each other ($R_{Cu-Zn} = 0.891$, $R_{Cu-Cr} = 0.927$, $R_{Cu-Ni} = 0.964$, $R_{Zn-Cr} = 0.842$, $R_{Zn-Ni} = 0.939$, and $R_{Cr-Ni} = 0.879$, $P < 0.01$), which indicated that they possibly came from the same sources. Moreover, the contents of Cr, Cu, Ni and Zn in sediment also had significant correlations with the populations of sub-river basins with correlation coefficients of 0.855, 0.806, 0.867 and 0.855 ($P < 0.01$), respectively. The contents of Cd and Pb had smaller spatial differences in sediment from different estuaries than the other heavy metals, with the values ranged $23.3 \sim 95.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.051 \sim 0.200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Contents of the two heavy metals had no significant correlation with the other heavy metals or with the populations of sub-river basins, indicating that Cd and Pb had little connection with the in-land polluted sources. The results of ecological risk assessment showed that estuaries of the Haihe River Basin had the potential ecological risk at lower levels (RI were 33.7-116) and the most important contaminating element was Cd with a middle-level potential ecological risk (E_r^i were 18.0-48.9).

Key words: Haihe River Basin; estuary; surface sediment; heavy metal; spatial differentiation; ecological risk

河口是自然河流的重要组成部分, 陆源污染物质经过河流长距离的输送, 广泛存在于河口区域的水、悬浮物和底部沉积物之中^[1], 在陆源污染物向海洋输送过程中扮演着重要角色^[2,3]。人类在河流

收稿日期: 2013-03-22; 修订日期: 2013-06-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07203-006)

作者简介: 吕书丛(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境污染控制, E-mail: lvsc2010@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hongzhang@cees.ac.cn

上游及中游地区的开发对河流环境的影响也可以在河口区域沉积物中有所体现^[4~6]。而沉积物是水体污染物最主要的载体,是重金属的蓄积库与二次污染源^[7]。同时沉积物作为河流生态系统最重要的生物栖息场所,其中的重金属容易进入食物链逐步富集和放大^[8,9],对生物甚至人类产生更大危害。沉积物重金属研究一直是河流污染研究的热点。

海河流域人口密度大、工业化程度高、发展速度快,由于水资源禀赋不足,河流大多呈现非常规水源补给的特点,河流平均污径比为 0.14,部分河流甚至超过 2.0^[10],这种补给方式造成了严重的河流污染问题。对河流水质^[11,12]和沉积物中有机物^[13]、重金属污染等方面^[14,15]调查结果显示,流域河流整体以耗氧型污染为主,营养盐污染和毒害污染并存^[16]。考虑到重金属易在沉积物中累积,其在近岸河口的分布特点对于研究陆源重金属对于渤海湾近岸海域生态环境影响至关重要^[17],而目前在这方面仅进行了针对于一条或某几条河流^[18~22]的沉积物重金属调查,缺少流域尺度的河口沉积物重金属的空间分布对比分析^[23]。有鉴于此,本研究在对海河流域各入海河口分类的基础上,筛选了海河流域的 10 个典型河口,从流域尺度研究各河口沉积物中 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Ni 的空间分异性,分析海河流

域内社会经济发展水平以及陆源污染物对河口区域重金属含量的影响,并进一步评价其沉积物重金属潜在生态风险,以期为海河流域河口区域及近岸带的环境保护和决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

海河流域位于 112°E ~ 120°E、35°N ~ 43°N 之间,东、南、西、北四面分别以渤海、黄河、山西高原、蒙古高原为界,总面积约 31.4 万 km²,众多河流均汇入渤海湾,流域海岸线长度为 920 km。海河流域众多河流由北向南可分为滦河水系、海河水系和徒骇马颊水系。同时这三大水系由于所处社会发展程度以及区域功能不同也对应了三类不同的河流补给类型。滦河水系位于流域东北部,以山区河流为主,水量充沛,主要为自然水源补给。海河水系位于流域中部,是城市最为集中的区域,以污水处理厂出水 and 工业废水等非常规水源补给为主。而徒骇马颊水系则是自然水源和非常规水源共同补给。近年来渤海湾沿岸形成了环渤海经济圈,是我国北方最重要的经济产业区。人类活动的加剧对环渤海湾诸河口的生态环境产生了重大影响。海河流域主要河口所对应流域内的城市、人口和经济生产总值如表 1。

表 1 海河流域主要城市社会经济状况

Table 1 Social & economic indicators of major cities in the Haihe River Basin

河口	流域内主要城市	总人口(2010 年)/万	经济生产总值(2011 年)/亿元
洋河口	秦皇岛	298.76	1 064.03
滦河口	承德、唐山	1 105.05	6 543.21
永定新河口	朔州、大同、张家口、北京	4 399.41	20 989.56
海河口	天津	1 293.82	11 190.99
独流减河口	保定、沧州	1 832.84	5 049.90
子牙新河口	忻州、阳泉、石家庄、衡水、邢台、邯郸	3 791.74	12 907.90
北排河口	沧州、邢台、衡水	1 857.89	4 955.30
漳卫新河口	长治、新乡、安阳、德州	2 353.19	8 045.93
马颊河口	濮阳、聊城、德州	1 495.66	4 785.44
徒骇河口	聊城、滨州	953.84	3 722.77

1.2 采样点设置及采样方法

在对各水系社会经济状况分析基础上,选择表 1 中 10 个典型河口,在其河口区域共设置了 32 个采样点,每个河口设置 2~4 个采样点,如图 1 所示。样品采集于 2012 年 7~8 月完成。采用自重力采样器(Corer 60, Uwitec, Austria)采集沉积物柱状样,每个采样点采集 3 个平行柱样,将表层 0~5 cm 段按照每 1 cm 分层,样品经冷冻干燥后研磨过 100 目尼龙筛备用。

1.3 分析方法

沉积物样品采用王水-HF-HClO₄ 微波消解法,测定 Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Ni 这 6 种元素。根据各元素含量选择 ICP-OES (OPTIMA 2000DV, Perkin Elmer, USA) 或 ICP-MS (7500a, Agilent Technologies, USA) 进行定量测定。实验同步分析水系沉积物成分(GBW07302a),各元素回收率在 80%~120% 之间,符合质量控制标准。将每个沉积物柱状样 0~5 cm 的重金属含量均值作为该柱样的重金属含量,

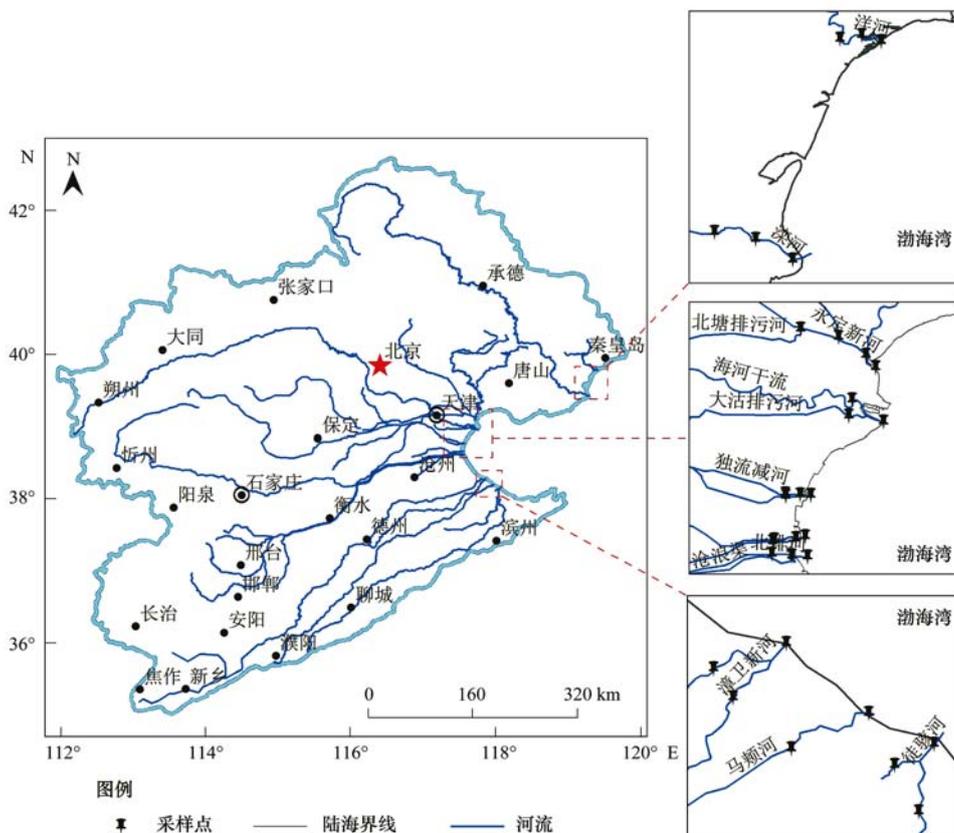


图1 研究区域及采样点设置示意

Fig. 1 Location of study area and sampling stations

3个平行柱状样的均值作为样点的重金属含量. 相关分析与绘图分别采用软件 SPSS 21 及 ArcGIS 10.

1.4 生态风险评价方法

采用 Hakanson^[24]于1980年提出的潜在生态危害指数法进行重金属生态风险评价. 其计算公式为:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i$$

$$E_r^i = T_s^i \cdot C_f^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, C_f^i 、 C_s^i 、 C_n^i 、 T_s^i 、 E_r^i 分别为第 i 种重金属的污染系数、实测含量、背景值、毒性响应系数、潜在生态风险系数, RI 为综合生态风险指数. 毒性响应因子 T_s^i 分别为: Cd(30) > Cu(5) = Pb(5) = Ni(5) > Cr(2) > Zn(1). 重金属潜在生态风险等级根据表2进行评判^[23]. 背景值采用在海河流域中所占

比例最大的土壤类型褐土^[10]中的重金属含量值, 环境背景值见表3.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属含量的空间分布

与环境背景值相比, 绝大多数采样点均不同程度高于各元素背景值(表3). Pb、Cu、Zn、Cd、Cr、Ni 分别有 100%、75.0%、71.9%、78.1%、65.6%、84.4% 的采样点超过相应的环境背景值, 平均含量分别为 52.7、72.0、131、0.127、89.8、78.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

海河流域河口区域表层沉积物重金属分布在不同河口的空间分布差异明显. 整体来看, 海河水系河流的沉积物重金属含量普遍高于滦河水系和徒骇马颊水系, 尤以汇入永定新河口、子牙新河口、北排河口的一些河流最为突出. 各重金属的峰值分布

表2 潜在生态风险指数和等级划分

Table 2 Index of potential ecological risk and the grading

生态风险等级	轻微	中等	强	很强	极强
单元素潜在生态风险系数(E_r^i)	<40	40~80	80~160	160~320	≥320
综合生态风险指数(RI)	<150	150~300	300~600	≥600	

表 3 表层沉积物重金属的空间差异

Table 3 Spatial distribution of heavy metals in surface sediments

河口	采样点编号	重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$					
		Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni
洋河口	YH-1	31.9 ± 1.6	18.6 ± 6.9	66.6 ± 32.6	0.055 ± 0.006	57.8 ± 5.8	31.9 ± 8.0
	YH-2	38.5 ± 2.6	18.9 ± 4.3	62.8 ± 9.0	0.100 ± 0.017	61.8 ± 11.3	31.5 ± 4.1
	YH-3	61.7 ± 23.2	61.0 ± 12.1	76.3 ± 16.8	0.115 ± 0.003	84.7 ± 22.1	65.9 ± 11.3
	均值	44.1	32.8	68.6	0.090	68.1	43.1
滦河口	LH-4	41.8 ± 6.1	14.7 ± 5.98	45.9 ± 16.6	0.051 ± 0.019	49.6 ± 15.9	24.9 ± 4.9
	LH-5	29.6 ± 3.4	6.75 ± 2.46	53.3 ± 24.4	0.068 ± 0.023	32.7 ± 2.6	13.7 ± 3.1
	均值	35.7	10.7	49.6	0.060	41.2	19.3
永定新河口	YDX-6	43.2 ± 3.8	46.4 ± 11.3	170 ± 53	0.200 ± 0.052	78.2 ± 12.4	62.3 ± 9.0
	YDX-7	58.5 ± 9.3	211 ± 48	236 ± 67	0.121 ± 0.002	125 ± 15.9	220 ± 41
	YDX-8	55.6 ± 24.6	173 ± 20	185 ± 52	0.117 ± 0.002	113 ± 19.1	195 ± 25
	YDX-9	24.2 ± 8.0	172 ± 32	256 ± 32	0.118 ± 0.004	94.5 ± 12.3	189 ± 28
均值	45.4	151	212	0.139	103	167	
海河口	HH-10	40.3 ± 3.9	29.5 ± 5.4	138 ± 34	0.090 ± 0.040	67.3 ± 9.0	51.5 ± 8.3
	HH-11	53.4 ± 4.1	46.1 ± 19.1	303 ± 16	0.159 ± 0.093	80.6 ± 26.8	53.1 ± 18.9
	HH-12	51.0 ± 2.8	33.8 ± 7.4	126 ± 16	0.200 ± 0.078	80.1 ± 14.0	41.4 ± 4.5
	均值	48.3	36.5	189	0.150	76.0	48.7
独流减河口	DLJ-13	67.9 ± 20.2	77.1 ± 30.4	141 ± 48	0.170 ± 0.008	117 ± 49	41.7 ± 17.6
	DLJ-14	92.9 ± 5.4	93.6 ± 4.7	106 ± 22	0.161 ± 0.005	107 ± 3	53.6 ± 2.1
	DLJ-15	80.2 ± 5.5	84.6 ± 6.5	104 ± 5	0.168 ± 0.001	99.1 ± 5.2	51.8 ± 6.5
	DLJ-16	91.8 ± 8.0	22.7 ± 4.2	52.7 ± 19.7	0.062 ± 0.024	63.7 ± 7.0	29.5 ± 3.0
	均值	83.2	69.5	101	0.140	96.9	44.2
子牙新河口	ZYX-17	56.6 ± 30.9	112 ± 12	273 ± 33	0.196 ± 0.013	117 ± 5	72.6 ± 1.3
	ZYX-18	49.3 ± 27.6	216 ± 28	321 ± 76	0.129 ± 0.007	165 ± 19	249 ± 38
	ZYX-19	46.6 ± 8.4	96.5 ± 28.0	158 ± 76	0.116 ± 0.003	71.2 ± 7.6	121 ± 21
	ZYX-20	36.5 ± 16.6	73.9 ± 19.1	131 ± 47	0.120 ± 0.015	63.1 ± 4.1	99.5 ± 19.8
均值	47.3	125	221	0.140	119	135	
北排河口	BPH-21	71.7 ± 9.5	99.1 ± 4.4	102 ± 8	0.125 ± 0.007	103 ± 24	112 ± 12
	BPH-22	46.4 ± 27.3	157.9 ± 38.8	162 ± 42	0.119 ± 0.005	108 ± 11	210 ± 52
	BPH-23	92.6 ± 4.1	56.2 ± 11.0	103 ± 21	0.143 ± 0.057	131 ± 24	63.7 ± 10.8
	BPH-24	37.6 ± 2.7	72.9 ± 4.5	152 ± 12	0.156 ± 0.007	128 ± 3	58.6 ± 2.5
	均值	62.1	96.5	129	0.136	118	111
漳卫新河口	ZWX-25	23.3 ± 6.1	68.0 ± 24.3	147 ± 19	0.174 ± 0.016	111 ± 5	45.9 ± 2.6
	ZWX-26	76.9 ± 13.7	15.7 ± 4.0	55.4 ± 28.0	0.061 ± 0.015	54.4 ± 6.1	22.4 ± 5.1
	ZWX-27	45.8 ± 5.1	107 ± 33.7	131 ± 34	0.126 ± 0.020	90.4 ± 15.3	131 ± 38
	均值	48.6	63.4	111	0.120	85.5	66.6
马颊河口	MJH-28	26.3 ± 1.9	28.6 ± 3.1	96.3 ± 5.9	0.163 ± 0.001	90.6 ± 5.3	37.3 ± 3.4
	MJH-29	24.1 ± 0.6	24.8 ± 0.7	90.3 ± 3.1	0.164 ± 0.004	77.5 ± 4.7	33.0 ± 1.3
	均值	25.2	26.7	93.3	0.163	84.1	35.1
徒骇河口	THH-30	56.6 ± 3.7	11.3 ± 1.0	37.6 ± 5.5	0.152 ± 0.002	27.0 ± 2.4	17.0 ± 1.2
	THH-31	78.9 ± 9.9	22.2 ± 10.7	61.8 ± 27.6	0.146 ± 0.084	68.8 ± 16.9	33.5 ± 8.7
	THH-32	95.8 ± 17.4	31.2 ± 10.5	50.1 ± 8.4	0.133 ± 0.057	92.7 ± 19.2	42.8 ± 8.5
	均值	77.1	21.6	49.8	0.144	62.8	31.1
褐土环境背景值 ^[25]		21.3	24.3	74.1	0.100	64.8	30.7

如下: Zn 的峰值主要位于子牙新河(ZYX-18)、大沽排污河(HH-11)、青静黄排水渠(ZYX-17)、永定新河(YDX-9)和潮白新河(YDX-7), 含量达到 236 ~ 322 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cu 和 Ni 的分布最为相似, 均在子牙新河(ZYX-18)、潮白新河(YDX-7)、蓟运河

(YDX-8)、永定新河口(YDX-9)、沧浪渠(BPH-22)达到较高含量, 达到 158 ~ 216 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 189 ~ 249 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于 Cr 而言, 青静黄排水渠的 ZYX-17 和子牙新河的 ZYX-18 两个采样点含量最高, 分别达到 177 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 165 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 另外在永定新

河、独流减河和北排河的个别采样点也相对较高。Pb 的空间差异相对较小,相对来讲 Pb 的高值区主要在海河干流以南的独流减河、北排河和徒骇河。Cd 具有相对更小的空间差异,在各河口的含量差别不大(0.060~0.163 mg·kg⁻¹)。所有这些峰值的位置均在以非常规水源补给为主要补给类型的海河水系河流。以各河口不同采样点的平均值作为该河口区域的重金属含量,可以看出海河流域 10 个河口之间的 Cr、Cu、Ni、Zn 有较明显的空间差异,其中永定新河口、子牙新河口、北排河口含量明显较高。Cd 含量差异相对较小,在海河水系以及徒骇马颊水系各河口含量比较接近,在滦河水系的绝对值相对较低,但相对于滦河水系的背景值也有一定程度的富集。Pb 的分布与其它元素有较明显的不同,主要

在徒骇河、北排河、独流减河 3 处达到较高水平,而其它河口的 Pb 含量比较接近。

与我国其它大河河口相比,整个海河流域环渤海湾河口区域的重金属含量也高于长江口和黄河口,与珠江口相当(表 4)。长江口和珠江口也是我国最典型的社会经济发达地区,河口区域受到人类生产生活影响剧烈。由表 4 可以看出,海河流域河口区域的 Cr、Zn、Pb 含量与珠江口含量相当,明显高于长江口和黄河口。而 Ni 与黄河口含量相当,明显高于珠江口和长江口,Cu 则是海河流域最高。这也反映出海河流域河口区域作为我国“环渤海经济圈”地带,是我国污染严重地区,河口区域较国内其它河口重金属污染程度高的现状。

表 4 国内其它河口重金属含量/mg·kg⁻¹

Table 4 Contents of studied metals in other estuaries of China/mg·kg⁻¹

河口	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	文献
海河流域河口均值	52.7	72.0	131	0.127	89.8	78.3	本研究
珠江口	59.3	46.2	150	—	89.0	41.7	[26]
长江口	27.3	30.7	94.3	0.260	78.9	31.8	[27]
黄河口	21.6	21.5	71.3	—	63.7	71.3	[28]

2.2 沉积物重金属含量与社会经济发展水平的关系

对各主要次级流域内总人口及经济生产总值与重金属含量进行 Spearman 相关性分析,如表 5 所示。海河流域河口区域的 Cu、Zn、Cr、Ni 这 4 种元素之间存在显著的相关性(R 为 0.842~0.964, $P < 0.01$),也与流域内的总人口显著相关(R 为 0.806~0.867, $P < 0.01$),这表明上述 4 种元素不仅具有一定的同源性,而且受到流域内陆源污染的影响较大。其中永定新河口汇集了多条河流,流域面积大,包括了朔州、大同、张家口、北京等大中城市,尤以北京的经济水平最高,污染物经过大面积的汇集,使得河口区域重金属含量最高。而子牙新河口是子牙河系的重要入海通道,子牙河系包括了山西和河北的多座城市,历来是海河流域污染的严重区

域,也使得子牙新河口的重金属明显高于其它河口。赵章元等^[29]也认为渤海环境污染主要来自于河流径流污染,重金属含量受入海河流等陆源污染影响较大。而滦河水系以自然水源补给为主,徒骇马颊水系流经的城市相对来讲发展水平较低,流域内人口相对较少,河流污染相对较轻,使得相应的河口区域重金属含量也相对较低。对 Cd 和 Pb 而言,与其它重金属元素之间以及社会经济指标之间的相关性不明显,说明其来源以及影响因素不同。这可能是由于环渤海湾近岸一带是我国工业化程度最高的地区之一,Cd 和 Pb 受到河口区域的社会经济发展水平的影响大于流域内对其的影响。这一点与在同为我国工业化程度较高的珠江口的研究有相似结论,河口区域的工业生产活动是 Pb 的重要来源^[30]。

表 5 重金属元素与社会经济指标的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficient matrix for heavy metals and social & economic indicators

	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni	总人口	总产值
Pb	1.000							
Cu	0.285	1.000						
Zn	0.152	0.891**	1.000					
Cd	0.146	0.018	0.255	1.000				
Cr	0.216	0.927**	0.842**	0.134	1.000			
Ni	0.200	0.964**	0.939**	0.006	0.879**	1.000		
总人口	0.127	0.855**	0.806**	0.049	0.867**	0.855**	1.000	
总产值	-0.030	0.612	0.745*	0.018	0.491	0.673*	0.758*	1.000

1) * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性是显著的; ** 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性是显著的

2.3 重金属生态风险评价

采用潜在生态危害指数对各河口沉积物重金属生态风险进行评价,其结果见表 6. 海河流域 10 主要河口的重金属综合生态风险均为轻微等级,但永

定新河口和子牙新河口的综合生态风险指数 (RI) 相对较高,分别为 116 和 107,接近轻微生态风险等级的上限(140),其它河口的综合生态风险指数为 33.7~98.7,重金属综合生态风险相对较低.

表 6 各河口重金属元素潜在生态风险系数和综合生态风险指数

Table 6 Potential ecological risk index of heavy metals in each estuary

河口	单元素潜在生态风险系数 (E_i^p)						综合生态风险指数 (RI)
	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	Ni	
洋河口	10.3	6.76	0.926	27.0	2.10	7.02	54.1
滦河口	8.39	2.20	0.670	18.0	1.27	3.15	33.7
永定新河口	10.6	31.0	2.86	41.7	3.17	27.1	116
海河口	11.3	7.50	2.55	45.0	2.35	7.93	76.7
独流减河口	19.5	14.3	1.37	42.0	2.99	7.19	87.4
子牙新河口	11.1	25.7	2.98	42.0	3.68	22.1	107
北排河口	14.6	19.9	1.75	40.8	3.63	18.1	98.7
漳卫新河口	11.4	13.1	1.50	36.0	2.64	10.8	75.5
马颊河口	5.91	5.50	1.26	48.9	2.60	5.72	69.9
徒骇河口	18.1	4.44	0.672	43.2	1.94	5.06	73.4

从各元素生态风险程度分析,Cd 是最主要的生态风险元素,其它元素则大体上均为轻微风险等级. Cd 除了在洋河口、滦河口和漳卫新河口的潜在生态风险系数尚处于轻微风险等级以外,在其它河口为 40.8~48.9,均达到了中等生态风险等级. Pb、Cu、Ni 这 3 种元素虽尚处于轻微风险等级,但其潜在生态风险系数仍相对高于 Zn 和 Cr. 其中永定新河口、子牙河口和北排河口的 Cu 和 Ni 的潜在生态风险系数分别达到 19.9~31.0 和 18.1~27.1,明显高于其它河口. Pb 在马颊河口风险较低(5.91),在独流减河口和徒骇河口相对较高(18.1~19.5),在其它河口差别不大,潜在生态风险系数范围为 8.39~14.6. Pb、Cu、Ni 这 3 种元素均具有上升为中等生态风险的潜在可能. Zn 和 Cr 在各河口的潜在生态风险系数范围分别为 0.670~2.98 和 1.27~3.68,潜在生态风险最低,不是海河流域河口区域的主要生态风险元素. 因此,对于整个海河流域河口区域而言,Cd 是最主要的生态风险元素,同时在对 Cd 的潜在生态风险给予足够的重视以外,也必须对 Pb、Cu、Ni 的污染状况给予关注,避免其污染上升为中等生态风险等级.

3 结论

(1)海河流域主要河口沉积物重金属均高于流域内主要土壤类型环境背景值. 在空间分布上,以非常规水源补给为主的海河水系中永定新河、子牙新河和北排河的河口区域重金属含量明显较高,而以自然水源补给的滦河水系和自然水源补给与非常

规水源补给相结合的徒骇马颊水系重金属含量相对较低.

(2)河口区域的重金属分布与所对应的流域内社会经济发展水平具有一定的相关性. Cr、Ni、Cu、Pb 与流域内总人口具有较显著的相关性,受到流域内陆源污染物影响较大. Cd 和 Pb 与流域内社会经济发展水平相关性不显著.

(3)海河流域主要河口的重金属综合生态风险指数属轻微风险等级. 但其中 Cd 是最主要的潜在风险元素,在多数河口均达到了中等风险等级. Cu、Ni、Pb 虽仍属轻微风险等级,但其潜在生态风险系数也相对较高,具有上升为中等风险的潜在可能.

参考文献:

- [1] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1324-1332.
- [2] 张连凯, 杨慧, 杨永亮, 等. 秦皇岛河口及附近水域沉积物砷分布特征及生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(1): 146-151.
- [3] 王萃, 孙野青, 贾宏亮, 等. 辽宁省大凌河口沉积物重金属污染及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(1): 28-32.
- [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] Attrill M J, Thomes R M. Heavy metal concentrations in sediment from the Thames Estuary, UK[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(11): 742-744.
- [6] Williams S C, Simpson H J, Olsen C R, et al. Sources of heavy metals in sediments of the Hudson river estuary [J]. Marine Chemistry, 1978, 6(3): 195-213.

- [7] 张伟, 张洪, 单保庆. 北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究 [J]. 环境科学, 2012, **33** (12): 4284-4290.
- [8] Farkas A, Erratico C, Viganò L. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po [J]. Chemosphere, 2007, **68** (4): 761-769.
- [9] Burton G A. Metal bioavailability and toxicity in sediments [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2010, **40** (9-10): 852-907.
- [10] 海河志编纂委员会. 海河志 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [11] 刘国华, 傅伯杰, 杨平. 海河水环境质量及污染物入海通量 [J]. 环境科学, 2007, **22** (4): 46-50.
- [12] 邢锴. 天津市海河水水质模拟及容量利用的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [13] 赵高峰, 周怀东, 杜苗, 等. 海河流域 14 条河流表层沉积物中多溴联苯醚的分布特征 [J]. 环境科学, 2011, **32** (7): 2069-2073.
- [14] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾主要入海河流入海口沉积物有机氯农药污染特征及其来源分析 [J]. 农业环境科学学报, 2010, **29** (10): 1900-1906.
- [15] 刘俐, 熊代群, 高新华, 等. 海河及邻近海域表层沉积物重金属污染及其分布特征 [J]. 海洋环境科学, 2006, **25** (2): 40-44.
- [16] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口水质现状的分析 [J]. 环境污染与防治, 2003, **25** (4): 222-225.
- [17] 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.
- [18] 彭淑龙, 李义晋, 刘俊新, 等. 天津北塘排污河沉积物的重金属污染及评价 [J]. 环境科学与技术, 2012, **35** (61): 342-346.
- [19] 干爱华, 于斌, 刘军, 等. 海河干流-大沽排污河沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 安全与环境学报, 2006, **6** (5): 39-41.
- [20] 郝红, 周怀东, 王剑影, 等. 漳卫南运河沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, **3** (2): 109-115.
- [21] 单保庆, 菅宇翔, 张洪. 北运河下游沉积物中重金属污染特征及评价 [J]. 安全与环境学报, 2011, **11** (6): 141-145.
- [22] 齐维晓, 刘会娟, 韩洪兵, 等. 北三河水系沉积物中金属的污染状况研究 [J]. 环境科学学报, 2013, **33** (1): 117-124.
- [23] 尚林源, 孙然好, 王赵明, 等. 海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价 [J]. 环境科学, 2012, **33** (2): 606-611.
- [24] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14** (8): 975-1001.
- [25] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 98-142.
- [26] Zhou H Y, Peng X T, Pan J M. Distribution, source and enrichment of some chemical elements in sediments of the Pearl River Estuary, China [J]. Continental Shelf Research, 2004, **24** (16): 1857-1875.
- [27] Zhang W G, Feng H, Chang J N, *et al.* Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: an assessment from different indexes [J]. Environment Pollution, 2009, **157** (5): 1533-1543.
- [28] 王贵, 张丽洁. 海湾河口沉积物重金属分布特征及形态研究 [J]. 海洋地质动态, 2002, **18** (12): 1-5.
- [29] 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.
- [30] Li X D, Wai O W H, Li Y S, *et al.* Heavy metal distribution in sediment profiles of the Pearl River estuary, South China [J]. Applied Geochemistry, 2000, **15** (5): 567-581.

CONTENTS

Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing	SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn	ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)
Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China	YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR	XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)
Distribution of CH ₄ in the Suburb of Changsha City, China	LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)
Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)
Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution	YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)
Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem	GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)
Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)
Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province	Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211)
Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model	LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)
Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method	DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)
Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area	SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)
Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)
Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland	QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)
Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i>	WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)
Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)
Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River	REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)
Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Floes Formed	XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)
DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes	FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)
Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron	ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)
Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe ₃ O ₄ -Stabilized Nanoscale Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)
Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes	LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)
Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)
Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater	WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)
Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems	ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)
Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse	LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)
Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions	ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)
Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction	YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)
Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH	ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)
Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation	LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)
Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i>	LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)
Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)
Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years	ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)
Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors	HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)
Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary	SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)
Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island	SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)
Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China	QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)
Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites	SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)
Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil	CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks	ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)
Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas	LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)
Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)
Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)
Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China	JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)
Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides	LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)
Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction	XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)
A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants	YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)

《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11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 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