

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氮氨异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价

王瑞霖^{1,2}, 程先^{1,3}, 孙然好^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029; 3. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715)

摘要: 针对海河流域中南部河流, 布设 80 个采样点, 对沉积物中 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb、Cd 进行含量及空间分布研究, 并采用潜在生态风险指数法和富集因子法进行重金属风险评价和污染来源判断。结果表明: ①除 Cr、Ni 外其余 4 种重金属元素均有较明显的积累, 其中 Cd 含量超出环境背景值 2.64 倍。基于单项重金属的潜在生态风险指数, Cd 在多数点位风险强度等级为强, 其余元素多数为轻微等级, 各重金属生态风险等级排序为 $Cd > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn$; ②重金属污染具有一定的空间差异性, 位于平原的子牙河、大清河重金属含量较高, 且综合生态风险指数平均值较高 (RI 为 155.64 和 111.84); 徒骇马颊河和黑龙港河由于工业化程度较低重金属含量相对较低, 且综合生态风险指数平均值也较低 (RI 为 69.54 和 84.50); ③同源分析表明 Cd、Pb、Zn、Cr 有相似的污染来源; 富集因子法评估显示人为影响依次为 $Ni < Cr < Cu < Zn < Pb < Cd$ 。区域上, 受人为影响较为强烈的河系为子牙河、大清河、永定河和漳卫河, 徒骇马颊河和黑龙港河受人为影响较轻。

关键词: 海河流域; 沉积物; 重金属; 生态风险; 污染来源

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3740-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.014

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin

WANG Rui-lin^{1,2}, CHENG Xian^{1,3}, SUN Ran-hao¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Several heavy metals, including Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, and Cd, were investigated at 80 sampling sites in the southern and central areas of Haihe River Basin. The spatial patterns and potential anthropogenic impacts of heavy metals were evaluated by several methods, such as the potential ecological risk index and enrichment factors (EFs). Results showed that, ①The concentrations of heavy metals in the sediments were higher than the background values in most sites except for Cr, Ni. The concentration of Cd was 2.64 times higher than its background value. Based on the potential ecological risk index for single heavy metal, Cd in river sediments showed a high potential ecological risk while the other elements showed a slight potential ecological risk at most sampling sites. Generally, the decreasing order of the heavy metals was $Cd > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn$. ②The concentration of heavy metals in surface sediment varied in different regions. The concentration of heavy metals and the potential ecological risks were higher in the Ziya river (RI = 155.64) and Daqing river (RI = 111.84) than those in the other rivers. For example, slight pollution of heavy metals was found in the Tuhai, Majia river (RI = 69.54) and Heilonggang river (RI = 84.50) due to a relatively low level of industrialization. ③Cd, Pb, Zn, Cr were positively correlated with each other and might be derived from similar sources. The increasing order of anthropogenic impacts on heavy metals was $Ni < Cr < Cu < Zn < Pb < Cd$ according to the calculated EFs. The anthropogenic impacts differed in different rivers. For example, strong impacts were found in the Ziya, Daqing, Yongding and Zhangwei rivers whereas weak impacts were showed in Tuhai, Majia and Heilonggang rivers.

Key words: Haihe River Basin; sediments; heavy metals; ecological risk; source of contamination

重金属是环境中普遍存在并具有潜在毒性的一种持久污染物, 并可以进入食物链逐步富集和放大^[1]。重金属在水中溶解性很低, 很容易在沉积物中吸附和累积^[2]。在特定条件下造成水体环境因子的扰动后, 沉积物中重金属会重新释放到上覆水中对生物产生毒性作用^[3], 因此河流沉积物是重金属的蓄积库与二次污染源^[4]。此外, 沉积物中的重金属污染还会引起水生生态系统退化^[5]。因此, 河流沉积物重金属污染研究一直是河流污染关注的热

点^[6-8]。

随着人口的快速增长和经济社会的快速发展, 工矿业通过大气和废水排放造成河流重金属污染的问题日益突出, 位于京津冀经济工业圈的

收稿日期: 2014-03-17; 修订日期: 2014-04-29

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07501002-002)

作者简介: 王瑞霖 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境污染控制, E-mail: zhuoye886@163.com

* 通讯联系人, E-mail: rhsun@cees.ac.cn

海河流域尤甚^[9]。由于海河流域重要的战略地位及污染现状,多数研究集中在流域水生态问题,如水环境质量^[10]、水质评价^[11]和水体有机复合污染的研究^[12]。目前,海河流域沉积物重金属的研究工作主要集中在一条或某几条河流^[13~16]和个别水库^[17]的沉积物重金属调查,缺少流域尺度的沉积物重金属调查和空间对比分析。而且,海河流域中南部工农业比较发达、城镇密集,人类活动对河流水生态系统的影响尤其严重^[18,19]。因此,本研究选取海河流域中南部地区,分析河流沉积物重金属含量的空间分布特征,辨识超出土壤背景值的程度,评估重金属生态风险和潜在来源,以期海河流域重金属污染防治提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海河流域位于 112°~120°E、35°~43°N 之间,流域面积 3.18 × 10⁵ km², 占国土面积的 3.3%, 是我国七大流域之一,在我国国民经济中拥有举足轻重的地位^[20]。研究区位于海河流域中南部,面积 2.25 × 10⁵ km², 占流域总面积的 70%, 涵盖城镇及人口密度集中的永定河、大清河、子牙河、黑龙港河、徒骇马颊河和漳卫河六大河系,涉及多个省区,包括北京、天津两市全部、河北省大部、山西省东部、河南与山东两省北部等。2013 年 5 月对研究区的 80 个点位使用抓斗式底泥采样器进

行表层沉积物采样(图 1),将泥样装入自封袋内,贴上标签带回实验室分析。

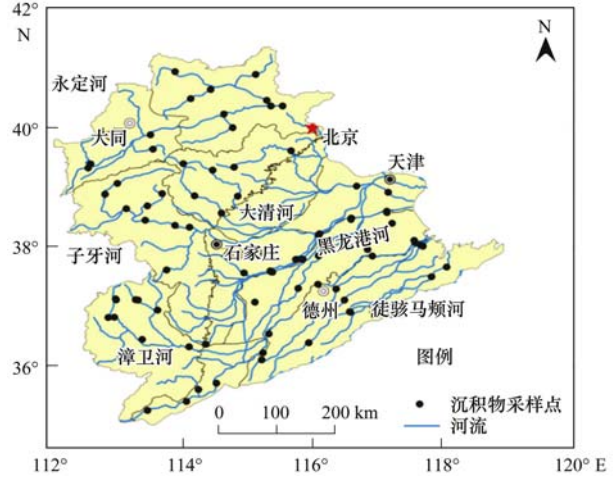


图 1 研究区采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in the Haihe River basin

1.2 样品分析测定

将采集的沉积物样品冷冻干燥,剔除砾石等,研磨过 100 目(0.15 mm)尼龙筛备用。沉积物样品采用 HCl-HNO₃-HF 进行微波消解,根据元素含量,Cu、Zn、Cr 采用 ICP-OES(OPTIMA 2000DV, Perkin Elmer, USA)测定,Pb、Ni、Cd 采用 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。各省市土壤背景值含量见表 1,相关分析与绘图分别采用软件 SPSS 19.0 及 ArcGIS 10.0。

表 1 海河流域重金属元素的背景参考值^[21]

Table 1 Background values of heavy metals in different regions

省市	重金属含量/mg·kg ⁻¹						Al 含量/g·kg ⁻¹
	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd	
河北	21.80	78.40	68.30	30.80	21.50	0.094	67.20
山东	24.00	63.50	66.00	25.80	25.80	0.084	66.20
山西	26.90	75.50	61.80	32.00	15.80	0.128	63.50
河南	19.70	60.10	63.80	26.70	19.60	0.074	63.40
北京	23.60	102.60	68.10	29.00	25.40	0.074	69.60
天津	28.80	79.30	84.20	33.30	21.00	0.090	72.70

1.3 沉积物重金属评价方法

1.3.1 沉积物重金属生态风险评价

采用 Hakanson^[22]1980 年提出的潜在生态风险评价方法定量计算重金属的潜在生态风险指数,根据表 2 评判重金属的风险等级。计算公式如下。

单种重金属潜在生态危害指数:

$$E_f^i = T_s^i \times C_f^i = T_s^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i}$$

沉积物中多种重金属潜在生态危害指数:

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

式中,C_fⁱ、C_sⁱ、C_nⁱ、T_sⁱ、E_fⁱ 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_sⁱ 分别为: Cd(30) > Cu(5) = Pb(5) = Ni(5) > Cr(2) > Zn(1)。

表 2 单个重金属潜在生态风险系数及生态风险指数
Table 2 Pollution grade for the single heavy metal (E_i^i)
and potential ecological risk index (RI)

E_i^i	RI	生态危害程度
< 40	< 150	轻微
40 ~ 80	150 ~ 300	中等
80 ~ 160	300 ~ 600	强
160 ~ 320	≥600	很强
≥320		极强

1.3.2 沉积物中重金属污染源判定

采用 Zoller 等^[23] 1974 年提出的富集因子法 (EF) 作为人为活动对沉积物重金属影响的指数, 判断河流沉积物重金属的污染来源.

$$EF = \frac{Cs(M)/Cs(Al)}{Cn(M)/Cn(Al)}$$

式中, $Cs(M)$ 、 $Cs(Al)$ 分别为沉积物所测定的某重金属含量 ($mg \cdot kg^{-1}$) 和 Al 含量 ($g \cdot kg^{-1}$), $Cn(M)$ 、

$Cn(Al)$ 分别为该重金属 ($mg \cdot kg^{-1}$) 和 Al 的所属地区背景值 ($g \cdot kg^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属含量的空间分布

针对 80 个沉积物采样统计分析 (表 3). Cu 、 Zn 、 Cr 、 Ni 、 Pb 、 Cd 含量平均值分别为 30.93、102.93、62.70、27.90、28.29、0.24 $mg \cdot kg^{-1}$, 除 Cr 、 Ni 平均值接近背景平均值外, 其它重金属 C_i^i 均有不同程度的升高, 各元素 C_i^i 次序依次为 Cd (2.64) > Zn (1.34) > Pb (1.31) > Cu (1.28) > Ni (0.94) > Cr (0.91). 在整个海河流域沉积物的调查过程中, Cd 污染一直是关注的重点, 对海河流域北部地区^[24]、几条重要的干流^[25] 及主要河口的沉积物重金属含量调查^[26] 均显示 Cd 污染最严重, 说明 Cd 含量超标已成为海河流域的主要环境问题.

表 3 海河流域沉积物重金属含量统计

Table 3 Statistics of heavy metal concentrations in sediments of Haihe River basin

项目	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd
样点位数	80	80	80	80	80	80
含量范围/ $mg \cdot kg^{-1}$	5.95 ~ 487.24	21.96 ~ 1 479.96	13.67 ~ 850.40	9.29 ~ 246.35	3.26 ~ 245.38	0.06 ~ 6.61
平均值/ $mg \cdot kg^{-1}$	30.93	102.93	62.70	27.90	28.29	0.24
标准差/ $mg \cdot kg^{-1}$	62.09	290.46	135.98	28.95	42.29	0.92
各省背景平均值/ $mg \cdot kg^{-1}$	24.13	76.57	68.70	29.60	21.52	0.091
超出背景值点位数	47	39	27	27	54	71

为进一步评价采样点沉积物的重金属空间分布区域特征, 对海河流域永定河、大清河、子牙河、黑龙港河、漳卫河、徒骇马颊河这六大河系进行区域分析, 各重金属元素含量在各河系的分布情况如图 2 所示. 异常点位分布于工业区集中的子牙新河和滏阳河段、大同矿区附近的桑干河和南洋河以及造纸企业集中的卫河段. 这些点位多数位于人类活动强烈的城镇区且矿产丰富, 死水区域偏多, 甚至出现断流情形, 同时发现多数区域河流沿岸有很多排污口, 河岸两边垃圾堆积较多造成污染严重, 高于区域整体含量. 为准确反映重金属的空间分布及生态风险的区域特征, 剔除 13 个极端异常点位.

整体上, 子牙河系的沉积物重金属含量普遍高于其他河系, 超出背景值约 2 ~ 5 倍, 这与其他相关调查的结果一致^[25]. 同时, 对子牙河口区沉积物调查显示, 该河口沉积物各重金属含量均偏高, 其中 Zn 、 Cu 、 Ni 、 Cr 含量出现了峰值^[27]. 长期以来, 河段承接来自各地级县市及高新技术开发区和经济技术开发区沿途生产生活污水, 子牙河系水质大部分呈劣 V 类且重金属污染和水污染较重, 是海河流域

水污染治理任务紧迫、水源保护艰巨的水系之一^[28~30], 必须进一步加强对子牙河系污染管控和治理.

Cu 含量峰值出现在大清河水系, 达 179.90 $mg \cdot kg^{-1}$, 同时该河系 Zn 、 Cd 含量较高, 平均含量分别为 170.73 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 0.25 $mg \cdot kg^{-1}$, 超出背景值约 3 倍. 大清河地处海河流域的中部, 包括河北省大部分地区, 北京、天津部分地区和山西省小部分地区, 区域内存在生物质燃烧、煤燃烧、交通燃油排放以及焦炭的生产和使用等不同排放源, 造成不同程度的重金属污染^[31]. 徒骇马颊河各重金属含量较其他河系都低, 其中 Cr 、 Ni 平均含量分别为 55.77 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 19.50 $mg \cdot kg^{-1}$, 均低于背景值. 对徒骇马颊河调查显示, 该区域以农业生产为主, 可能为沉积物重金属含量较低的主要原因^[32]. 除子牙河系外, 其他河系 Cr 含量在背景值附近, 具有相对较小的空间差异.

漳卫河系除平原区工矿和造纸企业集中的卫河段含量较高外, 整体含量较低. 永定河系由于地处山区, 人口密度较小, 除靠近山西矿区的点位 Cd 含

量过高外,其余重金属含量较低。同时,黑龙港河系由于是河北省的主要农业区,处河北区域经济发展的“洼地”^[33],可能是该区域河流沉积物重金属整体

含量较低的原因。这一点与前人的研究结果一致,徒骇马颊水系和黑龙港河系流经的城市相对发展水平较低,河流污染相对较轻^[27]。

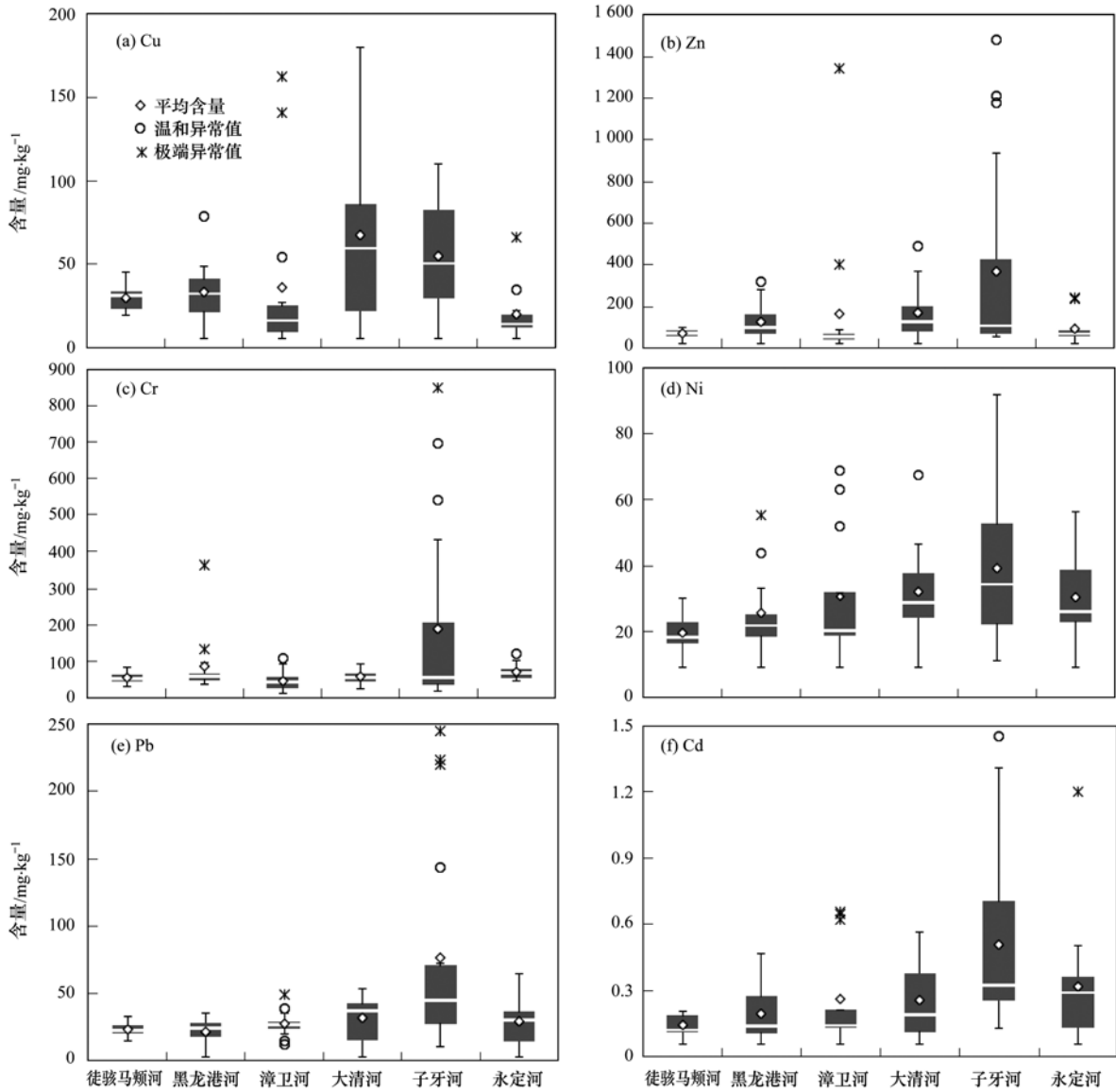


图2 海河流域河系沉积物重金属含量

Fig. 2 Concentrations of heavy metals in river sediments of the Haihe Basin

2.2 沉积物重金属生态风险评价

选取表1 重金属背景值作为参考值,剔除每个河系的极端异常点位,计算出每个河系6种重金属的潜在生态风险指数及范围(表4)。根据各元素生态风险得出,研究区域沉积物重金属的生态风险等级为 $Cd > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn$ 。Cd 仍是最主要的生态风险元素,多数点位风险等级为强;个别人类活动强度大的地区如滏阳河、拒马河的 Cu、Pb 接近中等程度的生态风险,其余元素为轻微等级,这与重金属含量空间分布结果一致。大清河、永定河、漳卫河呈

现中等生态风险的 Cd 污染。对调查河系所属永定河口、海河口、独流减河口、子牙新河口、北排河口的 Cd 进行风险评价,均呈现中等的生态风险,得出一致的结论^[27]。因此,对整个海河流域,Cd 是最主要的生态风险元素,除了在对 Cd 的潜在生态风险给予足够的重视外,同时也必须对 Pb、Cu 的污染状况给予关注,避免上升为中等生态风险等级。

分析整个调查区域的综合生态风险指数(RI)(图3),徒骇马颊河、黑龙港河、漳卫河、大清河、子牙河、永定河系综合生态风险指数 RI 平均值分

表 4 海河流域河系重金属潜在生态风险指数

Table 4 Potential ecological risk index of heavy metals in river sediments

重金属	项目	河系名称(点数)					
		徒骇马颊河(10)	黑龙港河(11)	漳卫河(9)	大清河(12)	子牙河(15)	永定河(10)
Cu	范围	4.08 ~ 9.48	3.02 ~ 18.08	1.11 ~ 5.07	1.75 ~ 41.26	3.18 ~ 25.35	2.17 ~ 6.51
	平均值	6.44	7.37	2.57	15.22	10.73	3.64
Zn	范围	0.70 ~ 1.55	0.39 ~ 2.42	0.29 ~ 0.91	0.58 ~ 6.24	0.70 ~ 11.93	0.68 ~ 1.07
	平均值	1.16	1.22	0.61	2.12	2.34	0.83
Cr	范围	0.93 ~ 2.58	1.06 ~ 10.63	0.44 ~ 3.01	0.73 ~ 2.76	0.62 ~ 20.33	1.47 ~ 3.61
	平均值	1.70	2.50	1.47	1.68	3.79	2.20
Ni	范围	1.80 ~ 5.87	1.51 ~ 7.11	2.47 ~ 11.18	2.13 ~ 10.98	1.77 ~ 10.81	3.25 ~ 10.45
	平均值	3.78	3.81	4.12	5.20	5.49	4.78
Pb	范围	2.78 ~ 8.33	0.76 ~ 8.18	3.90 ~ 9.19	2.69 ~ 12.48	3.32 ~ 33.50	2.96 ~ 11.44
	平均值	4.67	5.16	7.28	7.50	11.50	7.16
Cd	范围	32.04 ~ 83.82	18.09 ~ 150.00	24.55 ~ 49.86	23.60 ~ 180.87	29.83 ~ 418.53	21.04 ~ 164.08
	平均值	51.79	64.44	35.79	80.11	121.61	80.93
RI	范围	51.87 ~ 106.86	46.90 ~ 168.04	33.16 ~ 68.04	37.59 ~ 244.93	45.73 ~ 518.43	40.08 ~ 193.89
	平均值	69.54	84.50	51.83	111.84	155.46	99.55

别为 69.54、84.50、51.83、111.84、155.64、99.55。子牙河仍是生态风险相对最高的河系,大清河和永定河系也相对较高,徒骇马颊河系、漳卫河、黑龙港河系生态风险相对较低。根据表 2 进行评价,56 个点位呈现“轻微”等级,9 个点位呈现“中等”等级,主要分布在山西和河北省交界处,可能是由于距离城市带较远,经济发展较落后,环境执法力量薄弱、权责不清所致;2 个点位呈现“强”的等级,位于受工业污染严重的子牙河系滏阳河段,必须予以重点关注和加强监管,以免风险等级进一步升高。

2.3 沉积物重金属污染源分析

2.3.1 重金属同源性分析

对流域沉积物重金属进行 Pearson 相关性分析,分析沉积物重金属的同源性,结果见表 5。海河流域沉积物中 Cd、Pb、Zn、Cr 之间存在显著的相关

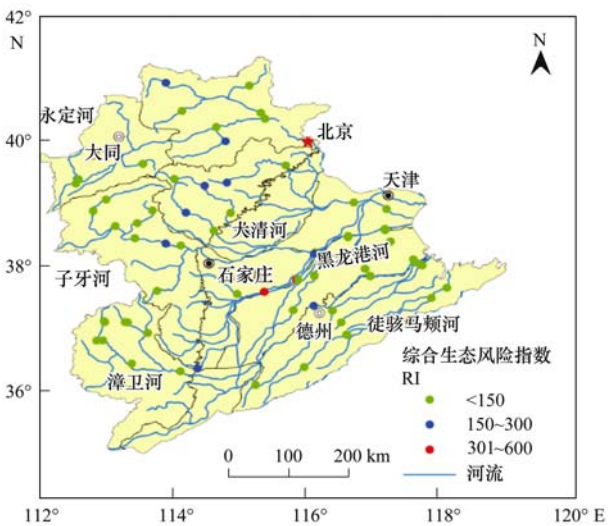


图 3 采样点潜在生态风险

Fig. 3 Potential ecological risk grades of the sampling sites

表 5 沉积物重金属相关性分析¹⁾

Table 5 Pearson correlation coefficients of heavy metals in river sediments

	Cu	Zn	Cr	Ni	Pb	Cd
Cu	1					
Zn	0.562 **	1				
Cr	0.181	0.739 **	1			
Ni	0.473 **	0.437 **	0.426 **	1		
Pb	0.441 **	0.795 **	0.681 **	0.455 **	1	
Cd	0.353 **	0.779 **	0.658 **	0.328 **	0.789 **	1

1) * * 表示在置信度(双侧)为 0.01 时,显著相关

性(R 为 0.658 ~ 0.795, $P < 0.01$),表明上述 4 种元素具有一定的同源性,其中 Pb 与 Zn 的相关性最高($R = 0.795$, $P < 0.01$),且 Pb、Zn 含量高值出现的

点位大多处于渔业资源较为丰富的地区,因而可能与船舶使用的防腐蚀材料中的 Zn 和燃油中的 Pb 造成的污染有很大关系^[34]。Cu 与 Cd、Pb、Zn 呈一定

相关性($P < 0.01$),但是相关系数除 Zn($R = 0.562$)外都较低.同时,Ni 与其他元素也呈一定相关性($P < 0.01$),但相关系数均在 0.5 以下.

进一步对流域沉积物重金属采用组间联接法进行系统聚类分析(图 4),用沉积物重金属含量作变量参数,67 个采样点作个案,将数据标准化到[0,1]范围,对距离的测度方法选择欧式距离法.结果显示 Ni 与其它 5 种重金属被分为 2 大类,说明 Ni 与其它重金属来源不同,其中 Cd、Pb、Zn、Cr 具有相似的变化规律,与相关性分析中 Cd、Pb、Zn、Cr 存在显著相关性的结论一致,即 Cd、Pb、Zn、Cr 受到相同因素的影响,有相似的污染来源.

2.3.2 重金属来源分析

如图 5 所示,富集因子法(EF)是一种广泛应用判断研究区域重金属属于人为活动造成还是来自地

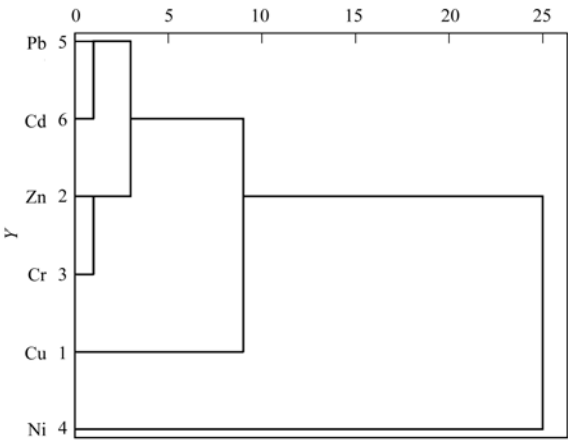


图 4 海河流域沉积物重金属含量聚类分析

Fig. 4 Hierarchical cluster analysis of heavy metals in river sediments

壳的贡献的标准化方法^[35].一般认为, $0.5 \leq EF \leq 1.5$ 时,表示痕量金属主要来自地壳贡献; $EF > 1.5$

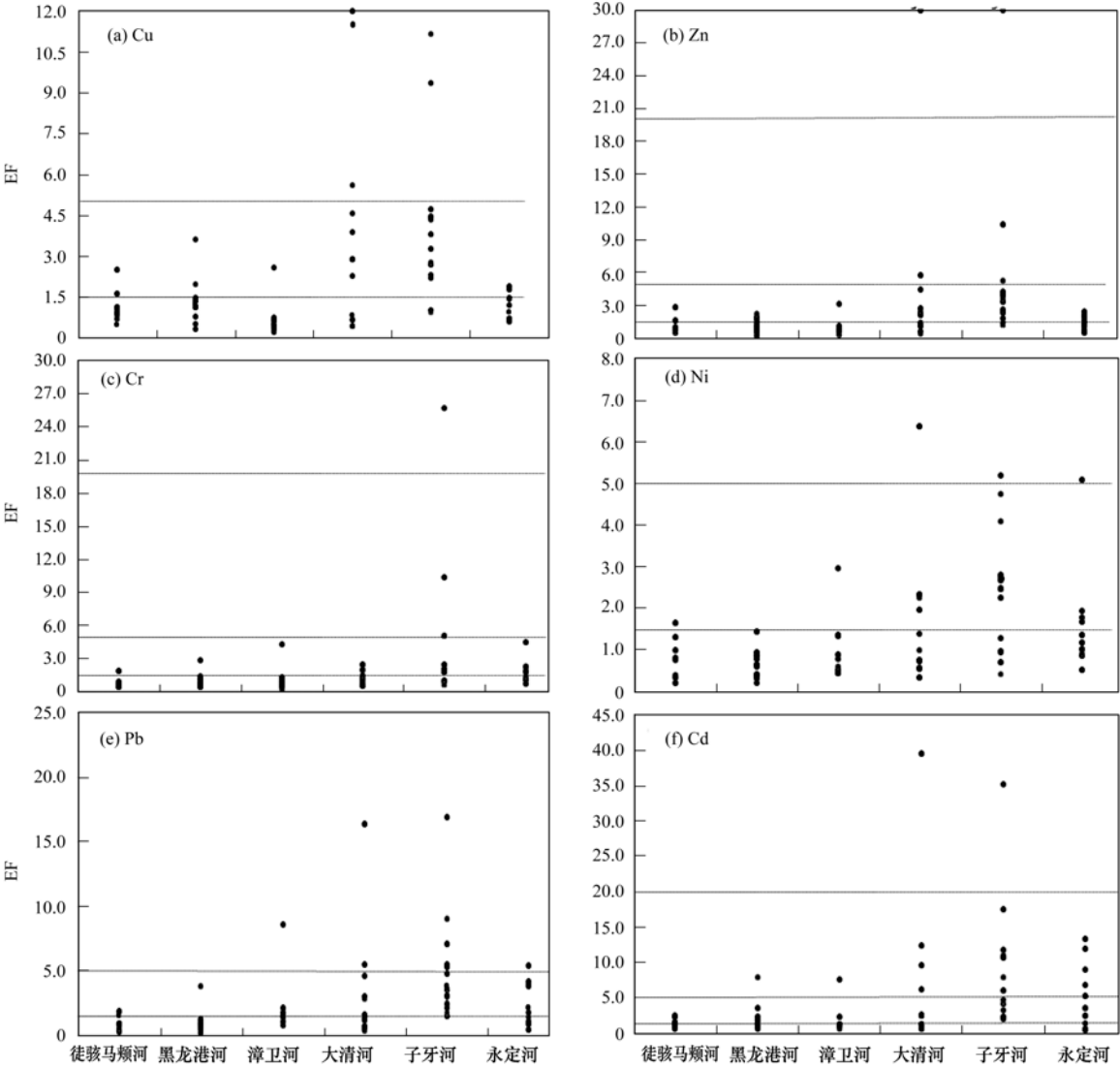


图 5 海河流域河系沉积物重金属富集因子(EF)值

Fig. 5 EF values of heavy metals in river sediments of the Haihe Basin

时表示痕量金属的大部分由非地壳来源提供^[36],当 $EF > 5$ 时,即说明受到较明显的人为污染影响;当 $EF > 20$ 时,说明受到很高程度的人为污染影响^[37]. 采用 EF 法进一步计算评估人为活动对海河流域沉积物重金属含量的影响指数,判断重金属污染来源. 根据图 5 所示, Cu 、 Zn 、 Cr 、 Ni 、 Pb 、 Cd 的 EF 平均值为 2.40、2.58、1.80、1.46、2.62、4.72; 各元素 $EF > 1.5$ 的点位中, Cu 、 Zn 、 Cr 、 Ni 、 Pb 、 Cd 分别为 28、28、21、21、31、37 个; $EF > 5$ 的点位分别为 6、6、4、3、9 个; $EF > 20$ 的点位为大清河系的拒马河和子牙河系的滏阳河,这两个地区受到很高程度的人为污染影响. 各重金属受人为影响增强顺序依次为 $Ni < Cr < Cu < Zn < Pb < Cd$.

从空间分布上,子牙河仍是受人为活动污染影响最大的河系,污染程度最重;大清河也受到较重的人为污染影响,主要为 Cu 、 Pb 、 Cd ;永定河为 Cr 、 Pb 、 Cd ;漳卫河为 Pb ,其余元素主要来自地壳贡献;徒骇马颊河和黑龙港系受人为活动污染较轻,多数点位 EF 在 1.5 以下,主要来自地壳贡献. 可见,海河流域受人为活动较为明显的重金属为 Cd 、 Pb 、 Zn 、 Cu . 这可能是因为海河流域地处京津冀经济工业圈,是我国人口密度和工业化程度最高的地区之一,人类生活生产活动是 Cd 、 Pb 、 Zn 、 Cu 的重要来源. 这一点与其他学者在人口密集和工业生产活动强烈地区的研究有相似结论, Cd 、 Pb 、 Zn 、 Cu 是人类活动的指示因子^[38~40],应当加强对这些金属的监控和管理.

3 结论

(1) 海河流域中南部河流沉积物中 Cd 的生态风险最高. 重金属按超出背景平均值排列为 $Cd > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr$, Cd 达 2.64 倍. 考虑到各个重金属指标的毒性系数后,潜在生态风险指数为 $Cd > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn$. Cd 是最主要的潜在风险元素, Cu 和 Pb 虽多数处在轻微风险等级,但一些点位潜在生态风险系数也相对较高.

(2) 海河流域中南部河流沉积物中重金属空间分布差异明显. 位于平原区域城镇化与工业化水平高的子牙河系和大清河系重金属含量较高,而以农业为主的徒骇马颊河系与黑龙港河系重金属含量相对较低,污染较轻. 相应地,综合生态风险评价结果表明,子牙河系和大清河系多数点位处于中等等级,生态风险也较高,而徒骇马颊河系、漳卫河系和黑龙港河系则处于轻微等级.

(3) 海河流域中南部河流沉积物中重金属受人为影响的程度有差异. 同源分析表明 Cd 、 Pb 、 Zn 、 Cr 有相似的污染来源,富集因子法则显示人为影响的次序为 $Ni < Cr < Cu < Zn < Pb < Cd$. 在区域上,受人类活动影响较为强烈的河系为子牙河、大清河、永定河和漳卫河,徒骇马颊河和黑龙港河受人类活动影响较小.

参考文献:

- [1] Xiao R, Bai J H, Gao H F, *et al.* Distribution and contamination assessment of heavy metals in water and soils from the college town in the Pearl River Delta, China[J]. CLEAN- Soil, Air, Water, 2012, **40**(10): 1167-1173.
- [2] Ma Z, Chen K, Yuan Z, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of six major Chinese freshwater lakes[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, **42**(2): 341-350.
- [3] Niu H, Deng W, Wu Q, *et al.* Potential toxic risk of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(8): 1053-1058.
- [4] 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.
- [5] Suresh G, Sutharsan P, Ramasamy V, *et al.* Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam lake sediments, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, **84**: 117-124.
- [6] 单丽丽, 袁旭音, 茅昌平, 等. 长江下游不同源沉积物中重金属特征及生态风险[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2399-2404.
- [7] Karak T, Bhattacharyya P, Paul R K, *et al.* Metal accumulation, biochemical response and yield of Indian mustard grown in soil amended with rural roadside pond sediment[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **92**: 161-173.
- [8] Wang C, Liu S, Zhao Q, *et al.* Spatial variation and contamination assessment of heavy metals in sediments in the Manwan Reservoir, Lancang River [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, **82**: 32-39.
- [9] 水利部海河水利委员会. 海河流域水资源公告[R]. 2013.
- [10] 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, 2001, **22**(4): 46-50.
- [11] 邹志红, 云逸, 王惠文. 两阶段模糊法在海河水系水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(4): 799-803.
- [12] Qiao M, Qi W, Liu H, *et al.* Oxygenated, nitrated, methyl and parent polycyclic aromatic hydrocarbons in rivers of Haihe River System, China: Occurrence, possible formation, and source and fate in a water-shortage area [J]. Science of the Total Environment, 2014, **481**: 178-185.
- [13] 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.
- [14] 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.

- [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] 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.
- [17] 尚林源, 孙然好, 汲玉河, 等. 密云水库入库河流沉积物重金属的风险评价[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12): 344-348.
- [18] 孙然好, 陈利顶, 王伟, 等. 基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1784-1788.
- [19] Liu C, Wang Z Y, He Y, *et al.* Evaluation of water and sediment qualities at river mouths in the Haihe river system[J]. International Journal of Sediment Research, 2007, **22**(4): 318-326.
- [20] 孙然好, 汲玉河, 尚林源, 等. 海河流域水生态功能一级二级分区[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 509-516.
- [21] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [23] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. Science, 1974, **183**(4121): 198-200.
- [24] 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.
- [25] Tang W, Zhao Y, Wang C, *et al.* Heavy metal contamination of overlying waters and bed sediments of Haihe Basin in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **98**: 317-323.
- [26] Liu L, Li F, Xiong D, *et al.* Heavy metal contamination and their distribution in different size fractions of the surficial sediment of Haihe River, China[J]. Environmental Geology, 2006, **50**(3): 431-438.
- [27] 吕书丛, 张洪, 单保庆, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4204-4210.
- [28] 马仁宏, 岳建新, 梁淑敏. 子牙河下游上段水环境现状分析及治理对策[J]. 海河水利, 2008, (2): 31-33.
- [29] 熊洋, 李文体. 对子牙河水系水资源保护的思考[J]. 海河水利, 2007, (1): 16-17.
- [30] 王超, 单保庆. 子牙河水系水和沉积物好氧氨氧化微生物分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 2943-2950.
- [31] 赵健, 周怀东, 陆瑾, 等. 大清河流域表层土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(7): 1452-1458.
- [32] 高盼, 李淑芹, 叶水根, 等. 徒骇马颊河流域水资源承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, **18**(6): 69-72.
- [33] 刘成林. 新时期黑龙港地区水资源问题及对策[J]. 地理与地理信息科学, 2007, **23**(3): 109-112.
- [34] Singh N, Turner A. Trace metals in antifouling paint particles and their heterogeneous contamination of coastal sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, **58**(4): 559-564.
- [35] Gao X, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay[J]. Water Research, 2012, **46**(6): 1901-1911.
- [36] Zhang L, Ye X, Feng H, *et al.* Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, **54**(7): 974-982.
- [37] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.
- [38] Chabukdhara M, Nema A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: A chemometric and geochemical approach[J]. Chemosphere, 2012, **87**(8): 945-953.
- [39] Quinton J N, Catt J A. Enrichment of heavy metals in sediment resulting from soil erosion on agricultural fields [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(10): 3495-3500.
- [40] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Heavy metal sources and associated risk in response to agricultural intensification in the estuarine sediments of Chaohu Lake Valley, East China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 945-951.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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