

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

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

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价

于洋¹, 高宏超¹, 马俊花¹, 李迎霞^{1*}, 莫罹², 孔彦鸿²

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要: 为了解潮河流域周边土壤重金属污染状况, 判断重金属污染对周边饮用水源的威胁程度, 沿潮河流域采集了15个潮河流域周边土壤样品, 测定样品中重金属含量。结果表明, 重金属As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn的平均值分别为7.94、0.16、127.71、38.45、0.22、45.97、21.98、81.06 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。除Pb以外, 各采样点土壤重金属含量均值均高于北京市土壤重金属含量背景值。与上海黄浦江水源地相比, 重金属Cr、Cu、Ni浓度较高, 其他重金属处于中等水平。地累积指数法评价表明Cr、Hg处于中度污染, Cu、Ni处于无-中度污染, 其他重金属无污染。生态危害指数法表明, Hg达到强生态风险等级, 其他金属均处于低生态风险等级, 研究区域整体处于中等生态风险水平, 重金属Cr、Hg、Cu、Ni需要加以控制。

关键词: 土壤重金属; 水源地; 地累积指数法; 生态危害指数法; 潮河

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3572-06

Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County

YU Yang¹, GAO Hong-chao¹, MA Jun-hua¹, LI Ying-xia¹, MO Li², KONG Yan-hong²

(1. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to explore the heavy metal concentrations in soils surrounding the Chaohe River, 15 soil samples were collected along the Chaohe River. Results show that average concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn are 7.94, 0.16, 127.71, 38.45, 0.22, 45.97, 21.98, 81.06 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. The mean concentrations of 15 samples for most heavy metals are higher than the background values of Beijing soil except Pb. Compared to the heavy metal concentrations in the soil of Shanghai Huangpu River water resource area, the mean concentrations of Cr, Cu and Ni are higher and concentrations of other heavy metals are at a moderate level. Geo-accumulation index method was used to evaluate the pollution status of different heavy metals. Results show that the pollution of Cr and Hg is moderate. The pollution of Cu and Ni is between no to moderate. There is no pollution of As, Cd, Pb and Zn in the study area. Ecological risk index method was also used to evaluate the ecological impact. Results show that the pollution level of Hg is strong and Cu is medium. Other heavy metals are at a slight pollution level. The samplings region as a whole is at a medium ecological pollution level. In a word, Hg, Cr, Ni, and Cu need to be controlled.

Key words: heavy metals in soil; water resource area; geo-accumulation index evaluation method; ecological risk index method; Chaohe River

重金属作为持久性有毒物质,能够在一定条件下从土壤中迁移到水和植物生态系统中,并通过饮水和食物链的传递和富集作用影响人类健康。有研究表明水源地的河流沉积物中某些重金属主要来源于其周边土壤的淋溶作用^[1]。因此加强对土壤中重金属的研究,并将重金属作为常规环境监测的重要指标是十分必要的。

密云水库作为北京市目前唯一的地表水水源,其水质好坏直接影响北京市人民的生活和工农业生产活动。密云水库的入库水源主要由潮白河供给,潮河在流入密云水库前,经过矿产丰富且以农业为主的密云县,降雨时径流冲刷携带潮河流域周边的土壤进入潮河,进而威胁密云水库的水质。研究也表明该流域点源污染较少,非点源是影响水库水质的主要原因^[2]。因此对该流域土壤重金属含量的研

究显得尤为重要。

目前很多学者都在研究各种用地的土壤中重金属的分布及影响等,主要包括市区绿地中的土壤重金属^[3,4],公路沿线^[5,6],工业区周边^[7,8],农业用地^[9,10],污灌区^[11],水源地周围的土壤重金属^[1,12~14]等。由于水源地的环境状况与人类健康的密切关系,对于水源地周围的土壤重金属的研究需要引起广泛的关注。

土壤重金属污染评价的方法多种多样,例如因子指数法、综合指数法、地累积指数法、模糊贴

收稿日期: 2012-12-07; 修订日期: 2013-01-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07318-001); 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目(51121003); 国家自然科学基金项目(51278054)

作者简介: 于洋(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为非点源污染, E-mail: yuyang8903@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yingxia@bnu.edu.cn

近度法、生态危害指数法^[15]等。相比之下,地累积指数法和生态危害指数法较为常用,这两种方法均起源于沉积物中的重金属研究,目前广泛应用于土壤中的重金属评价。地累积指数法既考虑了自然因素又考虑了人文因素,潜在生态危害指数法可以同时考虑多种污染物的综合影响。本研究采用地累积指数法和生态危害指数法对土壤重金属进行评价。

1 材料与方法

1.1 采样介绍

由于潮河流域是密云水库非点源污染来源的主要区域之一,本研究将采样点布置在密云县境内的潮河流域沿岸的区域上,如图 1 所示。在每个采样点采用多点混合取样的方法,在样点周围1 m²的范围内取 3 个表层 0 ~ 15 cm 的土壤样品混合成一个样品,2011 年 10 月在 15 个采样点共采集 15 个混合样品,所有样品均装入聚乙烯密封塑料袋中带回实验室,剔除植物根系等植物残体自然风干 3 个星期,然后过 2 mm 的筛子去除大石块等杂物,研磨后测定重金属的含量。

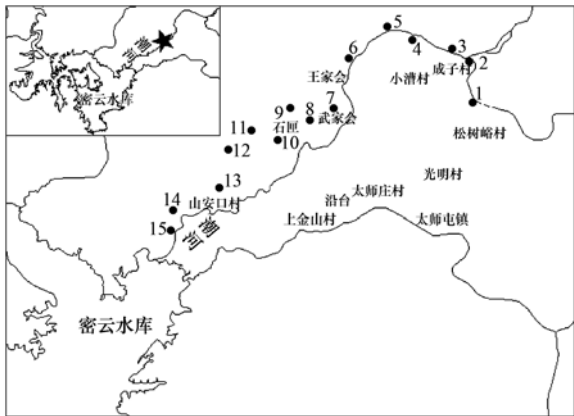


图 1 采样点分布示意
Fig. 1 Sampling site locations

采样点的具体信息如表 1 所示,采样点共包括 4 种土地利用方式,分别是玉米地、果园、林地、草地。

1.2 土壤重金属测定方法

重金属 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 的浓度采用 ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry)

表 1 各采样点的具体信息

Table 1 Detailed information for all sampling sites		
样点编号	土地利用类别	经纬度
1	玉米地	40°34'15.24"N,117°8'11.69"E
2	草地	40°35'8.89"N,117°8'1.04"E
3	林地	40°35'14.59"N,117°7'51.72"E
4	果园	40°35'51.12"N,117°7'19.44"E
5	林地	40°35'45.22"N,117°7'18.21"E
6	玉米地	40°35'31.60"N,117°5'31.60"E
7	果园	40°34'31.80"N,117°4'15.37"E
8	玉米地	40°34'28.49"N,117°3'11.82"E
9	果园	40°34'36.51"N,117°2'28.61"E
10	玉米地	40°33'44.70"N,117°2'23.95"E
11	玉米地	40°33'48.09"N,117°1'45.21"E
12	林地	40°33'43.48"N,117°1'39.25"E
13	玉米地	40°32'53.37"N,117°1'23.33"E
14	草地	40°32'18.88"N,117°1'1.99"E
15	草地	40°31'48.66"N,117°1'4.16"E

进行测定。利用 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer)测定重金属 Cr 的浓度。重金属 As、Hg 利用 AFS (Atomic Fluorescence Spectrometry) 进行浓度测定。

1.3 土壤重金属污染评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法由 Muller 在 1969 年定义,20 世纪 60 年代晚期在欧洲发展起来。最开始用它来评价沉积物中的重金属污染^[16~18],现在也广泛用于评价土壤中的重金属^[19]和地表颗粒物中的重金属^[20,21]。该方法不仅考虑了自然因素引起的背景值变化对污染程度的影响,同时也考虑了人类活动对污染程度的影响。公式如下所示:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{c_n}{k \times B_n} \right)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数; c_n 指元素 n 在沉积物中的实测浓度值; B_n 为普通页岩中元素 n 的地球化学背景值; k 为考虑岩层差异所引起背景值变化的调整系数,该值通常取 1.5。在本研究中 B_n 采用北京市土壤重金属含量背景值^[22]。表 2 列出了地累积指数法的评价标准。

1.3.2 生态危害指数法

生态危害指数法由瑞典科学家 Hankanson 根据重金属的性质和环境行为特点提出的,是一种定量

表 2 地累积指数 I_{geo} 的污染分级

项目	I_{geo} 计算值范围						
	<0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	>5
级别	0	1	2	3	4	5	6
污染等级	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

地计算土壤或沉积物中重金属生态危害的方法. 该方法最初是为了评价表层沉积物中重金属的生态风险水平,目前也广泛应用于评价土壤中重金属的生态风险水平^[19,23]. 计算公式如下所示:

$$C_i = D_i/B_i \tag{2}$$

$$T_i = S_i \cdot \frac{\sqrt{S}}{\sqrt{BPI}} \tag{3}$$

$$E_i = T_i \times C_i \tag{4}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \tag{5}$$

表 3 北京市土壤中重金属的背景值和毒性响应系数

Table 3 Beijing soil background values and toxic coefficients of heavy metals

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
土壤重金属背景值/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	7.09	0.119	29.8	18.7	0.058	26.8	24.6	57.5
重金属毒性响应系数	10	30	2	5	40	5	5	1

本研究涉及 8 种重金属,与 Hankanson 研究中涉及的元素种类不同,因此应根据本研究的重金属种类、数量对评价指标的分级标准进行调整. E_i 最低级别的上限值由 C_i 最低级别 ($C_i < 1$) 的上限值 1 与最大毒性系数 T_i 值相乘得到 ($40 \times 1 = 40$),其余级别上限值依次加倍. RI 分级标准的最低级别上限值由各污染物 T_i 值之和与 C_i 最低级别上限值相乘后得到的数值取 10 的倍数部分得到 ($40 + 10 + 30 + 2 + 5 + 5 + 5 + 1 = 148 \approx 150$),其余级别依次加倍^[23]. 得到本研究各评价指标的等级划分标准(见表 4).

表 4 C_i 、 E_i 和 RI 的等级标准

Table 4 Standard classification of C_i , E_i and RI

C_i	E_i	RI	生态风险等级
<1	<40	<150	轻微
$1 \leq C_i < 3$	$40 \sim 80$	$150 \sim 300$	中等
$3 \leq C_i < 6$	$80 \sim 160$	$300 \sim 600$	强
$C_i \geq 6$	$160 \sim 320$	≥ 600	很强
—	≥ 320	—	极强

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属元素含量特征

从整体上看,15 个采样点的重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的平均值分别为 7.94、0.16、127.71、38.45、0.22、45.97、21.98、81.06 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 除 Pb 以外,各采样点土壤重金属含量均高于北京市背景值,其中 Cr 的平均含量为原有背景值的近 4 倍. 而与国家《土壤环境质量标准》(GB 156182-1995)一级标准进行比较发现除 As 以外,其余各采样点的重金属含量均有超标的现象发生. Cr

式中, C_i 为重金属 i 的污染系数, D_i 为样品中重金属 i 的实测浓度, B_i 为重金属 i 的土壤背景值,本研究采用北京市土壤的重金属背景值来计算^[22] (见表 3), T_i 为重金属 i 的毒性响应系数, S_i 为重金属的毒性系数, BPI 为生物生产指数 (bioproduction index), 目前众多学者一般直接用毒性系数代替毒性响应系数^[24], 所以在本研究中取各重金属的 BPI 值为 5, E_i 为重金属 i 的潜在危害系数, RI 为土壤中多种重金属的综合生态危害指数.

的超标率最高,约有 73.3% 的采样点土壤中 Cr 含量超过国家一级标准,采样点中 Hg 的最大浓度为国家一级标准的 5 倍以上,这说明目前密云水库周边土壤中部分重金属的含量偏高,可能对水库水质产生一定的威胁. As 的含量低于国家一级标准,且在部分地区其含量低于北京市背景值,相关文献指出其下降的原因可能与作物和瓜果蔬菜的吸收有关^[26].

表 5 和表 6 分别列出了此次研究与其他研究中水源地土壤中重金属的含量情况. 潮河流域与其他水源地相比,重金属 Cr、Ni 浓度远高于其他水源地,重金属 Hg 的浓度明显高于山东省部分水岸带. 其他重金属基本处于中等水平. 这可能与种植作物的种类不同有关. 与上海相比,Cr、Ni 浓度基本为上海市水源地的 2 倍,As、Cu 比上海市水源地浓度稍高,而 Hg、Pb、Zn 稍低于上海市水源地重金属浓度. 与不同地区的果园相比,潮河流域只有 Cr、Cu 的浓度显著高于其他地区,Pb、Zn 稍低于其他地区,其他重金属的浓度基本保持在同一水平. 这种差异可能是由于潮河上游存在废弃的采矿区,并且流域周边农村较密集,燃煤较多引起的. 从对比结果看,潮河流域应该重视重金属 Cr、Ni、Cu 的污染源控制,可以通过在废弃矿区增加植被覆盖以减少非点源污染输出、改变种植作物的种类、减少农药和化肥的使用、通过集中供暖减少煤的燃烧等方法来减少土壤中重金属的含量.

由于不同重金属含量的差异较大,直接采用重金属浓度做图会导致有的重金属差异不能体现出来. 所以本研究中利用 15 个采样点样品重金属浓

表 5 不同水源地周围土壤重金属比较/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
潮河流域(本研究)	7.94	0.16	127.71	38.45	0.22	45.97	21.98	81.06
上海市饮用水源地 ^[13]	6.31	0.16	65.75	30.66	0.33	24.04	30.14	103.79
上海市黄浦江水源地 ^[1]	—	0.15	—	—	—	—	33.33	—
黄浦江中上游地区 ^[14]	7.54	0.16	86.30	31.40	0.14	—	24.90	98.80
山东省部分水岸带 ^[12]	—	0.14	53.03	18.38	0.02	24.96	22.48	56.13
陕西省渭河流域(均值) ^[26]	14.04	0.20	53.76	—	—	—	32.81	—

表 6 不同农业用地重金属分布情况/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
潮河流域果园(本研究)	7.46	0.19	140.54	45.38	0.14	51.67	20.70	87.56
黄浦江中上游地区果园 ^[14]	7.50	0.20	92.42	27.73	0.13	—	27.00	91.58
陕西省渭河流域周至猕猴桃基地 ^[26]	12.42	0.25	58.30	—	—	—	48.40	—
陕西省渭河流域洛河苹果基地 ^[26]	15.88	0.19	53.50	—	—	—	23.87	—

度与背景值浓度的比值做出箱型图(见图 2). 从箱型图可以看出,各重金属的浓度分布上存在较多的离群值,其中 Cr、Cu、Hg、Ni 的离群值较多且偏离较大,表明这几种重金属在不同采样点的含量差异较大,可能与采样点周围的环境、种植的作物种类^[27]等有关. 其中采样点 4 的 4 种重金属 Cd、Cr、Cu、Ni 浓度远远高于其他采样点,说明该区域的重金属含量整体偏高,这可能是由于该点距离河岸较近,在降雨时经常被河流淹没从而有较多的河流沉积物. 采样点 6 的 Cr、Ni 浓度偏离其他采样点浓度较明显,可能与该地种植的作物种类有关. 采样点 15 的 Hg 浓度远远高于其他采样点,这可能是由于采样点 15 处在密云水库入口

处,在雨季时经常被河流淹没,从而含有较多的河流沉积物.

2.2 地累积指数评价

地累积指数 I_{geo} 计算结果表明各采样点 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的地累积指数的平均值分别是 -0.422 、 -0.182 、 1.515 、 0.455 、 1.322 、 0.193 、 -0.747 、 -0.090 . 8 种元素的平均值 $I_{\text{Cr}} > I_{\text{Hg}} > I_{\text{Cu}} > I_{\text{Ni}} > I_{\text{Zn}} > I_{\text{Cd}} > I_{\text{As}} > I_{\text{Pb}}$. 从平均值看,Cr、Hg 属于中度等级,Cu、Ni 属于无-中度等级,其他重金属基本无污染. 15 个采样点的 As、Cd、Pb、Zn 基本都处于无污染的状态,大部分采样点的 Cu、Ni 处于无-中的状态,Cr、Hg 的个别采样点出现了中-强,甚至是强的等级. 第 15 个采样点的 Hg 出现了强污染等级,需要进行进一步的探究. 总体来说,潮河流域重金属污染属于无到中度等级的水平. 将采样点重金属地累积指数的频率分布绘制在图 3 中,

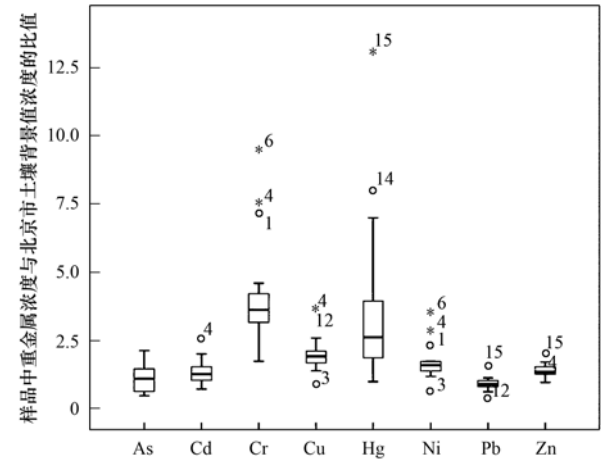


图 2 15 个采样点土壤样品中重金属浓度与北京市土壤背景值浓度比值的分布情况

Fig. 2 Distribution of the ratio of heavy metal concentrations in soil samples from 15 sampling sites to the background value of Beijing soil

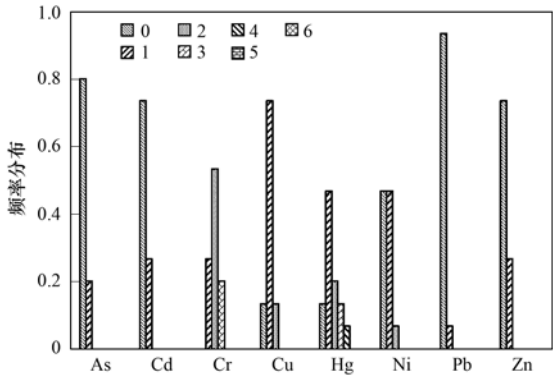


图 3 采样点重金属地累积指数的频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of geo-accumulation index of heavy metals in sampling sites

从各采样点计算地累积指数来看,Cr、Hg 的几个采样点指数达到了中-强的程度.

2.3 生态危害指数评价

表 7 显示了各采样点 E_i 和 RI 的计算结果. RI 的平均值为 234.20,表明采样区域整体处于中等的生态风险等级. 在生态危害指数评价中,采样点 1 和采样点 11 具有轻微生态风险等级,采样点 8 和 14 属于强生态风险等级,采样点 15 属于很强的生

态风险等级,其余采样点均属于中等生态风险等级. 其中,第 15 个采样点的 Hg 出现了极强的生态风险,与地累积指数法结果相似. 从 E_i 可以看出,Hg 达到强的生态风险等级,采样点中出现的生态风险等级基本都是中等以上,其他金属均处于轻微的生态风险等级. 这可能是由于 Hg 的毒性系数最大引起的. 土壤中 8 种重金属的潜在生态危害由强至弱依次为 $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Cr > Pb > Zn$.

表 7 E_i 和 RI 的评级结果

Table 7 Evaluation results of E_i and RI

项目	某单个金属的生态危害系数 E_i								RI
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
采样点 1	轻微	轻微	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 2	轻微	中等	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
采样点 3	轻微	轻微	轻微	轻微	很强	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 4	轻微	中等	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 5	轻微	中等	轻微	轻微	中等	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 6	轻微	轻微	轻微	轻微	中等	轻微	轻微	轻微	轻微
采样点 7	轻微	轻微	轻微	轻微	中等	轻微	轻微	轻微	轻微
采样点 8	轻微	轻微	轻微	轻微	很强	轻微	轻微	轻微	强
采样点 9	轻微	轻微	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 10	轻微	中等	轻微	轻微	中等	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 11	轻微	轻微	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 12	轻微	轻微	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 13	轻微	轻微	轻微	轻微	强	轻微	轻微	轻微	中等
采样点 14	轻微	轻微	轻微	轻微	很强	轻微	轻微	轻微	强
采样点 15	轻微	中等	轻微	轻微	极强	轻微	轻微	轻微	很强
最小值	4.62	20.99	3.45	4.56	38.97	3.01	2.01	0.95	78.55
最大值	21.16	77.15	19.01	18.32	522.76	17.74	7.76	2.02	685.92
平均值	11.19	39.66	8.57	10.28	150.05	8.58	4.47	1.41	234.20

态危害系数与地累积指数法的评价结果稍有不同,这是由于两种评价方法的侧重点不同引起的. 地累积指数法主要考虑地球化学行为的影响,分析了重金属的人为源和自然背景值,主要反映外源重金属的富集程度. 而生态危害指数法除了考虑重金属的含量之外,还考虑了不同金属之间环境毒性的差异,更加侧重于重金属的生态风险,考虑了其对地球的生态危害,对于生态系统的健康发展更具意义. 将这两种方法结合使用能较合理地対土壤重金属污染状况进行评价,更加全面深入地了解研究区域的重金属污染状况.

从两种评价方法来看,采样点中的 5 个玉米地重金属浓度相比于其他采样点,Cd、Zn 的浓度显著偏低,可能是由于玉米对 Cd、Zn 的吸收较多^[27].

从评价结果看,研究区域的土壤确实存在重金属含量偏高的情况,对密云水库的水质具有潜在威胁,有必要对密云水库的整个流域周围土壤进行进一步研究,分析重金属分布状况及其输入来源. 另

外,在此基础上,还要加深对土壤重金属进入河流方式的研究,雨水对流域土壤的淋溶作用及重金属在多相中的分配作用将是进一步研究的重点. 目前已经有很多研究成果表明某些植物可以有效吸附重金属,去除土壤中的重金属,可以考虑通过改变作物种类及种植方式来改善重金属污染状况.

3 结论

(1)从本研究得到的重金属的数据可知,除 Pb 以外各采样点土壤重金属含量均高于北京市背景值,其中 Cr 的超标率最高,Hg 最大值浓度为国家一级标准的 5 倍以上. 与其他水源地周围土壤中重金属含量相比,重金属 Cr、Ni、Hg 的浓度高于其他水源地的浓度,其他几种重金属浓度基本处于中等水平. 果园中的 Cr、Cu 浓度明显偏高,这可能与种植作物的种类有一定的联系.

(2)地累积指数法评价结果表明, $I_{Cr} > I_{Hg} > I_{Cu} > I_{Ni} > I_{Zn} > I_{Cd} > I_{As} > I_{Pb}$. 其中 Cr、Hg 属于中度污

染,Cu、Ni 属于无-中度污染,其他重金属基本无污染。从生态危害系数的计算结果可以看出,采样区域整体处于中等的生态风险等级。Hg 达到强的生态风险等级,其他金属均处于轻微生态风险等级,8 种重金属的潜在生态风险由强至弱依次为 $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Cr > Pb > Zn$ 。评价结果表明,重金属 Cr、Hg、Cu、Ni 的浓度偏高,对密云水库的水质具有一定的潜在威胁。对采样点周围情况分析推测 Hg 主要来自周围矿产资源的开发使用,Cr、Cu、Ni 可能主要来自煤的燃烧,另外还可能与作物的种类及种植方式有关。

参考文献:

- [1] 程晨,陈振楼,毕春娟,等.上海市黄浦江水源地重金属铅、镉多介质富集特征分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(10):948-953.
- [2] 王晓燕,王晓峰,汪清平,等.北京密云水库小流域非点源污染负荷估算[J].地理科学,2004,24(2):227-231.
- [3] 卢德亮,乔璐,陈立新,等.哈尔滨市市区绿地土壤重金属污染特征及植物富集[J].林业科学,2012,48(8):16-24.
- [4] 左倬,王金凤,由文辉.上海城市不同绿地类型土壤重金属污染研究[J].生态科学,2008,27(1):12-16.
- [5] Christoforidis A, Stamatis N. Heavy metal contamination in street dust and roadside soil along the major national road in Kavala's region, Greece[J]. Geoderma, 2009, 151(3-4): 257-263.
- [6] 谷蕾,全致琦,宋博,等.基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例[J].环境科学,2012,33(10):3577-3584.
- [7] Yaylali-Abamuz G. Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey [J]. Microchemical Journal, 2011, 99(1): 82-92.
- [8] 赵秀峰,王强盛,石宁宁,等.石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J].环境科学学报,2010,30(1):133-141.
- [9] 陈圆圆,孙小静,王军,等.上海宝山区农业用地土壤重金属空间分异规律及分布特征研究[J].环境化学,2009,29(2):215-219.
- [10] Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in Chinese vegetable plantation land soils and related source analysis[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(9): 1115-1126.
- [11] 吴光红,苏睿先,李万庆,等.大沽排污河污灌区土壤重金属富集特征和来源分析[J].环境科学,2008,29(6):1693-1698.
- [12] 张菊,陈诗越,邓焕广,等.山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J].生态学报,2012,32(10):3144-3153.
- [13] 史贵涛,陈振楼,张翠,等.上海市饮用水源地周边环境中的重金属[J].环境科学,2008,29(7):1797-1805.
- [14] 谢小进,康建成,闫国东,等.黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J].中国环境科学,2010,30(8):1110-1117.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [16] Forstner U. Lecture notes in earth sciences (Contaminated sediments)[M]. Berlin: Springer Verlag, 1989. 107-109.
- [17] Shafie N A, Aris A Z, Zakaria M P, et al. Application of geoaccumulation index and enrichment factors on the assessment of heavy metal pollution in the sediments [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2013, 48(2): 182-190.
- [18] Chen C W, Kao C M, Chen C F, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan [J]. Chemosphere, 2007, 66(8): 1431-1440.
- [19] 刘勇,岳玲玲,李晋昌.太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J].环境科学学报,2011,31(6):1285-1293.
- [20] Xiang L, Li Y X, Yang Z F, et al. Seasonal difference and availability of heavy metals in street dust in Beijing[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2010, 45(9): 1092-1100.
- [21] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, 94(2): 99-107.
- [22] 陈同斌,郑表明,陈煌,等.北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J].环境科学,2004,25(1):117-122.
- [23] 侯千,马建华,王晓云,等.开封市幼儿园土壤重金属生物活性及潜在生态风险[J].环境科学,2011,32(6):1764-1771.
- [24] 徐争启,倪师军,庾先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008,31(2):112-115.
- [25] 胡克林,张凤荣,吕贻忠,等.北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J].环境科学学报,2004,24(3):463-468.
- [26] 陈超.陕西省渭河流域典型区域的农业环境污染研究[D].西安:西北大学,2006.
- [27] Wang Q R, Liu X M, Cui Y S, et al. Responses of legume and non-legume crop species to heavy metals in soils with multiple metal contamination[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2002, 37(4): 611-621.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-yi, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 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

国内外公开发行人