

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, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂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, 谢薇薇, 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N₂O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, 陈永稳, 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, 胡凌霄, 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SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 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

多证据分析技术在场地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)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究

朱磊¹, 贾永刚^{1,2*}, 潘玉英¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 污染程度确定及健康风险评价是重金属污染场地修复的前提。调查了青岛北站规划区 Cu、Cr、Pb、Cd、Zn、Ni 这 6 种重金属含量, 并对重金属含量进行相关性分析; 以人为影响倍数来表征污染物超过背景值的程度, 采用地质累积指数法以及内梅罗指数中嵌入 I_{geo} 综合指数的新方法对土壤污染状况进行评价; 最后利用健康风险评价模型对重金属含量进行人体健康风险评价。结果表明, 规划区土壤均有不同程度的重金属污染, 6 种重金属污染程度依次为: Cd > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn, 其中 Cd 达到了严重污染的程度, Cu、Ni 次之, Cr、Pb、Zn 污染轻微; 各元素总体平均变异程度为 Cd > Ni > Cr > Zn > Pb > Cu; 研究区内土壤各重金属分布特征不尽相同, 但总体上差异不大。土壤重金属非致癌风险大小为 Cr > Pb > Cu > Ni > Cd > Zn, 均小于风险阈值 1; 致癌风险 Ni > Cd, 均低于致癌风险阈值, 各重金属污染不会对人体健康造成威胁。

关键词: 青岛北站; 土壤重金属; 地质累积指数; 嵌入 I_{geo} 综合指数; 健康风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3663-06

Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station

ZHU Lei¹, JIA Yong-gang^{1,2}, PAN Yu-ying¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: The determination of pollution extent and health risk assessment are the premise of heavy metal contaminated site remediation. The content of Cu, Cr, Pb, Cd, Zn, Ni in Qingdao North Station was detected, and the correlation of the 6 kinds of heavy metal content was analyzed. The pollution extent in excess of background values was characterized by anthropogenic influence multiple, and the pollution of heavy metal in soil was evaluated using geoaccumulation index and a new method which connects geoaccumulation index with Nemerow index. Finally, human health risk assessment was carried out with health risk assessment model for heavy metal content. The results showed that Qingdao North Station soil were polluted by heavy metals. Six heavy metal pollution levels were: Cd > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn, and Cd had reached the severity pollution level, Cu and Ni followed by, Cr, Pb and Zn were in minor pollution level. The order of coefficient variation in all heavy metals was: Cd > Ni > Cr > Zn > Pb > Cu. Within the study area soil heavy metal distribution was different, but overall discrepancy was small. The order of non-cancer hazards of heavy metals in soil was Cr > Pb > Cu > Ni > Cd > Zn, and the order of carcinogen risks of heavy metals was Ni > Cd. The non-cancer hazard and carcinogen risks values of metals were both lower than that their threshold values. They were not the direct threats to human health.

Key words: Qingdao North Station; soil heavy metal; geoaccumulation index; embedded I_{geo} composite index; health risk assessment

近年来,青岛市经济的快速发展和城市化进程的加快带动了交通需求的迅速增长,因此火车站、汽车站与地铁换乘车站相组合的多功能化建设模式受到了青岛的青睐。青岛北站作为即将建成的山东省最大的交通枢纽,将会成为青岛新的地标^[1],人流量较大,潜在的土壤重金属污染难以治理,将会对人体健康产生危害,因此对拟建场地土壤重金属分布进行调查与污染评价显得尤为重要。目前,国内逐步开展了城市土壤污染物的来源、影响因素、污染程度以及风险评价等研究^[2~6],常用的土壤重金属污染评价方法^[7]有单因子指数法^[8]、内梅罗指数法^[9]、潜在生态风险指数法^[10]、地质累积指数法^[11]等。土壤中过量的重金属会给生态系统施加压力,同时给人类健康带来风险,但是现有研究基本

都未直接考虑土壤污染物对生态受体的毒理效应,不能够为某些特定人群提供保护。本研究通过对原场地进行取样分析,利用指数和健康风险评价两种模型来对研究区土壤进行健康风险评价,旨在了解青岛北站拟建场地的土壤污染情况,为北站及周边区域的土地资源利用及科学管理建设提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 样品的采集与测定

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-10-16

作者简介: 朱磊(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染场地风险评估, E-mail: zhul-12345@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

1.1.1 样品采集区概况

青岛北站规划区位于山东省青岛市李沧区,地处沧海路以南,太原路以北,濒临胶州湾东岸,地形平坦开阔,地面高程一般为3~8 m,占地面积40 000 m². 该区域原属于海湾沉积地貌的滨海沼泽地,后被辟为青岛垃圾填埋场,地表凹凸不平,局部有深浅不一的积水坑分布,站区内有且仅有一条通往胶州湾的无名小溪,附近较大河流为李村河,均注入胶州湾中. 规划区东北侧为现有胶济铁路沧口站,西侧为胶州湾高速公路,西南约1 km为青岛海湾大桥起点,北距青岛流亭国际机场约13 km. 青岛北站是集城际公路、普速铁路、高速公路、轨道交通(青岛地铁北站和国铁青岛北站)、公交、长途客运、出租车等多种交通方式为一体的综合性大型交通枢纽. 青岛市李沧区政府将把青岛北站及周边区域建设成集商务办公、餐饮接待、休闲娱乐、高档商住、金融咨询等服务业于一体的游客集散中心.

1.1.2 布点与采样

采用判断布点与分块随机布点相结合的方法来确定土壤采样点位^[12],在综合考虑原场地的土地使用情况、周围建筑物分布和未来规划的用途,将研究区划分为10个小区块,分别在各个区块随机布设1个采样点,共10个采样点,各采样点位置见图1. 在每个采样点5 m²的范围内采取“S”型采集0~20 cm表层土壤样品,用四分法去掉多余部分,将剩余的1 kg左右土壤装入样品袋带回实验室.

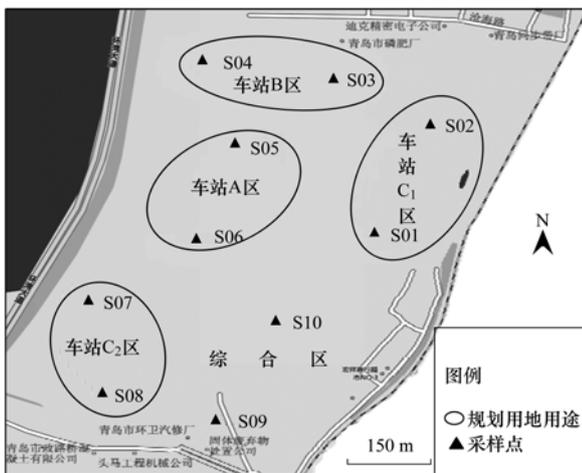


图1 土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling points

1.1.3 样品的处理与分析

土壤样品在实验室内室温风干,用木质工具粉碎并用玛瑙研钵研磨,过20目筛,用以分析土壤pH值;另取部分土样进一步研磨过200目筛,用以测

定6种重金属的含量. 土壤样品pH值(水土比2.5:1)用pH计测定;用混合酸消化法(HF-HClO₄-HNO₃)在聚四氟乙烯坩埚中消解土壤样品,然后采用原子吸收分光光度法测定Cu、Cr、Pb、Cd、Zn、Ni的含量. 数据分析采用Excel和SPSS 13.0软件进行.

1.2 土壤重金属污染评价方法及其分级标准

1.2.1 人为影响倍数

土壤环境背景值是指在区域内很少受人为活动影响的情况下,土壤原来固有的化学组成和元素含量的水平^[13]. 以青岛市土壤环境背景值^[14]作为评价标准,引入人为影响倍数(即超标倍数)来表征人为影响程度. 其计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{c_{ij} - E_j}{E_j}$$

式中, P_{ij} 表示人为影响倍数, c_{ij} 表示第*i*个样品中元素*j*的实测浓度, E_j 为元素*j*的区域土壤背景值.

1.2.2 地质累积指数

地质累积指数(I_{geo})由德国科学家Muller教授提出,是用于研究沉积物及其他物质中重金属污染程度的定量指标^[15]. 它反映了单一元素的污染水平,在计算过程中加入了岩石地质及其他因素的修正指数,充分考虑到人为活动对重金属的污染的影响. 因此该指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征,而且还可以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数^[16-18]. 其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{c_j}{KBE_j} \right]$$

式中, c_j 表示样品中元素*j*的实测浓度, BE_j 表示元素*j*的地球化学背景值, K 表示修正指数,为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变化而取的系数(一般取 $K=1.5$).

Forstner等^[15]将该指数分为7个级别: $I_{geo} < 0$,污染等级为0级,表示无污染; $0 \leq I_{geo} < 1$,污染等级为1级,表示无污染到中度污染; $1 \leq I_{geo} < 2$,污染等级为2级,表示中度污染; $2 \leq I_{geo} < 3$,污染等级为3级,表示中度污染到重污染; $3 \leq I_{geo} < 4$,污染等级为4级,表示重污染; $4 \leq I_{geo} < 5$,污染等级为5级,表示重污染到极重污染; $I_{geo} \geq 5$,污染等级为6级,表示极重污染.

1.2.3 嵌入 I_{geo} 的综合指数

基于地质累积指数的优势,结合青岛北站原场地的地质构造特点,因此可以在内梅罗指数的计算公式中,用地质累积指数替换单因子指数,形成嵌入

I_{geo} 的综合污染指数, 公式如下:

$$P_j = \sqrt{\frac{(I_{max})^2 + (I_{ave})^2}{2}}$$

式中, P_j 表示元素 j 的综合污染指数, I_{max} 表示地质累积指数中的最大值, I_{ave} 表示地质累积指数的平均值。

在地质累积指数分级标准的基础上加以调整, 可以得到嵌入 I_{geo} 综合指数的 8 个等级标准^[6]: $P < 0$, 污染等级为 0 级, 表示无污染; $0 \leq P < 0.5$, 污染等级为 1 级, 表示轻污染; $0.5 \leq P < 1$, 污染等级为 2 级, 表示轻污染至中度污染; $1 \leq P < 2$, 污染等级为 3 级, 表示中度污染; $2 \leq P < 3$, 污染等级为 4 级, 表示中度污染至重污染; $3 \leq P < 4$, 污染等级为 5 级, 表示重污染; $4 \leq P < 5$, 污染等级为 6 级, 表示重污染至极重污染; $P \geq 5$, 污染等级为 7 级, 表示极重污染。

1.3 土壤重金属污染健康风险评价模型及参数

1.3.1 选定健康风险评价模型

根据表 3 中 Cu、Cr、Pb、Cd、Zn、Ni 这 6 种重金属的浓度平均值, 应用健康风险评价模型 CDI^[19] 进行评价。公式如下:

$$CDI = \frac{c \times IR \times CF \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

式中, CDI 表示日慢性摄取量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; c 表示污染物含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; IR 表示摄取速率, $\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$; CF 表示转换因子, $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mg}^{-1}$; FI 表示摄取分数(范围 0.0 ~ 1.0), %; EF 表示暴露速率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 表示暴露周期, a; BW 表示受体体重, kg; AT_{ac} 表示致癌效应平均接触时间(计算致癌效应), d; AT_{nc} 表示非致癌效应平均接触时间(计算非致癌效应), d。健康风险评价中, 健康风险评价模型包括致癌物所致健康危害的模型和非致癌物质所致健康危害的风险模型, 因此风险结果的表达就有两种方式: 用风险度表示致癌效应, 是根据暴露水平的数据和特定化学物质的剂量-反应关系估算个体终生暴露所产生的致癌概率; 用风险指数表示非致癌效应, 是对暴露量与毒性(或标准)进行比较。公式如下:

$$HQ = \frac{CDI}{RfD}$$

$$HI = \sum HQ_s$$

$$\text{CancerRisk} = CDI \times SF$$

式中, HI 表示风险指数, %; HQ 表示风险度, %; CancerRisk 表示致癌风险; RfD 表示参考剂量,

$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; SF 表示斜率因子, $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

1.3.2 健康风险评价模型中参数的选择

根据文献[20 ~ 23]和场地调查的实际情况, 考虑人体通过呼吸、接触摄取土壤中污染物途径, 确定适合研究区的暴露评价参数, 见表 1。

表 1 健康风险评价模型的暴露参数

暴露评价参数	成人参考值	儿童参考值	参考值
IR	100	200	
ED	30	10	
BW	56	16	
CF			10 ~ 6
FI			0.0 ~ 1.0
EF			300
AT_{ac}			25 550
AT_{nc}			9 125

根据国际癌症研究中心(IARC)全面评价化学物质对人的致癌危险性的分类系统, 确定所研究的 6 种重金属都具有慢性非致癌健康风险, Cd、Ni 为较强的化学致癌物。根据美国国家环保署(USEPA)推荐与评价有关的参考剂量值^[24]和斜率因子, 见表 2。

表 2 模型参数 RfD 和 SF 值

重金属元素	RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	SF/ $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$
Cu	0.04	
Cr	0.003	
Pb	0.003 5	
Cd	0.001	6.3
Zn	0.3	
Ni	0.02	0.84

综上, 文中采用的评价思路是首先得出研究区场地内各重金属整体的污染特征, 然后利用地质累积指数讨论各采样点的污染程度和采用嵌入 I_{geo} 综合指数得出各重金属的污染程度, 最后进行健康风险评价。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属污染总体特征

研究区土壤样品的 pH 值在 7.54 ~ 8.74 之间, 酸碱度在中性略偏碱性, 属于正常范围。土壤表层重金属基本参数统计描述如表 1 所示。土壤样品中 Cu、Cr、Pb、Cd、Zn、Ni 这 6 种重金属含量的平均值分别为 120.33、55.42、62.94、1.62、121.36、37.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均已超过青岛市土壤环境背景值。所有土壤样品中, 检测到 Cr、Pb、Zn 这 3 种重金属

浓度与背景值差距不大,表明研究区受到 Cr、Pb、Zn 的污染很轻;而样品中 Cu、Cd、Ni 的浓度超过背景值较多,人为影响倍数分别为 6.41 ~ 10.12、3.06 ~ 17.81、0.6 ~ 3.7,表明研究区受到 Cu、Cd、Ni 的污染较严重. 变异系数可以反映总体样品中各采样点的平均变异程度,如表 3 数据显示,总体平均

变异程度为: Cd > Ni > Cr > Zn > Pb > Cu. 样品之间含量差异最大的是 Cd,达到了 36.05%,说明土壤中 Cd 受人为活动影响最显著; Cr、Pb、Zn、Ni 受人为活动影响较显著;而土壤中的 Cu 的变异系数(13.29%)较小,说明 Cu 元素受外界影响比较小,空间分异相对不显著.

表 3 土壤重金属基本参数描述分析

Table 3 Descriptive analysis of basic parameters of the soil heavy metals

项目	Cu	Cr	Pb	Cd	Zn	Ni
算数平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	120.33	55.42	62.94	1.62	121.36	37.04
标准差	15.99	15.34	13.83	0.59	33.58	10.70
最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	146.77	76.15	85.45	2.45	163.70	57.80
最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	97.86	33.73	40.99	0.53	56.60	19.69
变异系数/%	13.29	27.68	21.97	36.05	27.67	28.88
青岛市背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	13.2	31	31	0.13	69	12.3
人为影响倍数	6.41 ~ 10.12	0.09 ~ 1.71	0.32 ~ 1.76	3.06 ~ 17.81	0.18 ~ 1.47	0.6 ~ 3.7

2.2 土壤重金属含量的相关性分析

区域内土壤重金属污染物的来源途径可以是单一的,也可以是多途径的. 研究土壤中重金属的相关性可以推测重金属的来源是否相同,若有显著相关性,相同来源的可能性及较大,若不存在则来源不同^[25]. 分析结果见表 4,可见 Pb 与 Zn 存在显著相关性($P < 0.05$),Ni 与 Cu、Cd 的相关系数分别为 0.809、0.779,达到了极显著水平($P < 0.01$); Pb 与 Ni、Cu、Cd 不相关,Cr 与 Pb、Zn 不

相关. 表明 Pb 和 Zn、Ni 和 Cu、Cd 具有相同来源或复合污染的可能性较大,具有较强的伴生关系,Cr 和 Pb、Zn、Pb 和 Ni、Cu、Cd 的来源则不同. Pb 和 Zn 的污染来源可能来自交通污染(汽车轮胎及排放的废气)和研究区中垃圾中转站堆放的废弃物^[26]; Cu、Cd、Ni 的污染来源可能是工业污染包括一些金属冶炼厂排放的废渣和废水、研究区内的汽车修配厂的废弃物以及李村河口、胶州湾近海域的沉积物^[27].

表 4 土壤重金属污染浓度相关系数矩阵¹⁾

Table 4 Correlation matrix of heavy metal pollution concentration in soil

	Cu	Cr	Pb	Cd	Zn	Ni
Cu	1	0.560	0.191	0.449	0.504	0.809**
Cr		1	-0.231	0.614	-0.044	0.568
Pb			1	0.202	0.632*	0.056
Cd				1	0.388	0.779**
Zn					1	0.532
Ni						1

1) **表示在 0.01 水平上显著相关,*表示在 0.05 水平上显著相关

2.3 研究区土壤重金属污染环境评价

2.3.1 各取样点基于地质累积指数的污染评价

研究区表层土壤重金属元素的地质累积指数和污染等级见表 5. 从中可知,Cr、Pb、Zn 分别在除了 S05、S06、S08 和 S06、S07 和 S02、S06、S07 样品中地质累积指数小于 0(无污染级别)之外,其余的都在 0 ~ 1 之间,属于无污染至轻污染; Ni 在 S05、S06、S08、S09、S10 样品中污染等级为 1 级,其余的均为 2 级,处于中度污染的程度. 10 个土壤样品中,Cu 元素的地质累积指数均在 2 ~ 3 之间,处于中度污染至重污染的程度,污染较为严重; Cd 元素的

污染最为严重,在 S01 ~ S04 和 S07 样品中则达到了重污染的程度. 总体上看,各重金属污染较多的集中在 S01 ~ S04 采样点处,而 Cu 污染范围最广,Cd 污染最严重,Cu、Ni 次之,Cr、Pb、Zn 污染轻微.

2.3.2 不同重金属基于嵌入 I_{geo} 综合指数的污染评价

依据表 5,对土壤中的 6 种重金属分别进行综合考虑,得出各元素地质累积指数的最大值和平均值,代入公式,求出土壤中重金属的嵌入 I_{geo} 综合指数及等级见表 6. 从中可见,青岛北站土壤中的 Cr、Pb、Zn 的 P 值处于 0.5 ~ 1 之间,属于轻度污染; Ni 的 P 值处于 1 ~ 2 之间,属于中度污染; Cu 的 P 值

表 5 青岛北站表层土壤重金属 Muller 指数评价

Table 5 Muller index evaluation of topsoil heavy metal in Qingdao north station

样号	Cu		Cr		Pb		Cd		Zn		Ni	
	I_{geo}	等级										
S01	2.89	3	0.21	1	0.50	1	3.47	4	0.66	1	1.65	2
S02	2.47	3	0.37	1	0.50	1	3.65	4	-0.04	0	1.16	2
S03	2.56	3	0.26	1	0.31	1	3.27	4	0.43	1	1.14	2
S04	2.63	3	0.71	1	0.38	1	3.54	4	0.10	1	1.11	2
S05	2.58	3	-0.25	0	0.76	1	2.82	3	0.72	1	0.94	1
S06	2.31	3	-0.46	0	-0.18	0	1.44	2	-0.87	0	0.09	1
S07	2.83	3	0.85	1	-0.10	0	3.03	4	-0.02	0	1.33	2
S08	2.44	3	-0.03	0	0.59	1	2.47	3	0.02	1	0.57	1
S09	2.45	3	0.14	1	0.39	1	2.86	3	0.36	1	0.66	1
S10	2.77	3	0.25	1	0.88	1	2.91	3	0.35	1	0.84	1

表 6 不同重金属的嵌入 I_{geo} 综合指数及等级Table 6 Embedded I_{geo} composite index and its grading of different heavy metals

项目	Cu	Cr	Pb	Cd	Zn	Ni
I_{geo}	2.89	0.85	0.87	3.65	0.72	1.65
I_{ave}	2.59	0.2	0.4	2.95	0.17	0.95
P	2.74	0.62	0.68	3.32	0.52	1.35
污染等级	4	2	2	5	2	3

处于 2~3 之间,属于中度污染至重污染; Cd 的 $P > 3$, 达到了 3.32, 属于重污染. 综合污染指数的大小排序是: $Cd > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$.

2.3.3 研究区土壤重金属健康风险评价

根据健康风险评价模型和模型参数,结合表 3 的数据结果,可以计算出土壤中重金属 Pb、Cu、Zn、Cd、Ni、Cr 可能引起的成人与儿童平均个人风险,其中考虑了 Cd、Ni 的致癌风险,计算结果见表 7.

表 7 土壤中不同重金属健康危害的平均个人年风险

Table 7 Health hazard of individual person caused by different heavy metals in soil

项目	成人						儿童					
	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd
HQ	0.031	0.005	0.001	0.032	0.003	0.003	0.073	0.012	0.002	0.075	0.008	0.007
HI	0.076						0.178					
CancerRisk				1.96×10^{-5}	6.42×10^{-6}					4.57×10^{-5}	1.50×10^{-5}	

由表 7 可知:6 种重金属所引起的成人与儿童的非致癌风险度 HQ 均小于 1,总的非致癌风险指数 HI 也小于 1,对人体基本不会造成伤害. 非致癌物质所引起的健康风险比较小,但也对暴露人群构成潜在的健康危害,其潜在人体健康危害风险大小为: $Cr > Pb > Cu > Ni > Cd > Zn$; Ni 和 Cd 的致癌风险 Risk 均在癌症风险阈值 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围以内,表明 Ni 和 Cd 的致癌风险较低,对人体不会造成严重伤害; 儿童比成人更易受到土壤重金属含量的影响,6 种元素的平均风险系数均大于成人,儿童受到的健康危害风险是成人的 2 倍左右.

3 结论

(1) 青岛北站规划区内 Cu、Cr、Pb、Cd、Zn、Ni 的含量均超过了青岛市环境背景值,其中 Cr、Pb、Zn 污染较轻, Ni、Cu、Cd 污染较为严重,其超标倍数分别在 0.6~3.7、6.41~10.12、3.06~

17.81 之间.

(2) 调查样点中,6 种重金属含量变异系数存在较大差异,总体平均变异程度为: $Cd > Ni > Cr > Zn > Pb > Cu$,反映了研究区土壤中 Cd 分布差异性最大,受人为活动影响显著.

(3) 研究区重金属污染地质累积指数法评价表明,重金属污染范围在 S01~S04 样点较为集中, Cu 污染最广; 污染程度为 Cd 污染最严重, Cu、Ni 次之, Cr、Pb、Zn 轻微.

(4) 应用嵌入 I_{geo} 综合指数的新型评价模型得出,研究区内重金属污染程度不同,自强至弱依次为: $Cd > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$,其中 Cd 属于重污染, Ni、Cu 属于中度污染至重污染, Cr、Pb、Zn 属于轻污染.

(5) 土壤-人体的健康风险评价表明土壤重金属非致癌风险大小均小于非致癌风险阈值 1,致癌风险 Ni 和 Cd 均低于致癌风险阈值,对人体不会造成严重

健康危害。儿童比成人更易受到土壤重金属含量的影响,儿童受到的健康危害风险是成人的2倍左右。

参考文献:

- [1] 吴晨,毛晓兵,秦红. 能看海的车站:青岛北站[J]. 建筑创作, 2012, (3): 151-155.
- [2] 钱翌,张玮,冉德超. 青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素分析[J]. 环境化学, 2011, 30(3): 652-657.
- [3] 柳云龙,章立佳,韩晓非,等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012, 32(2): 599-606.
- [4] 钱鹏,郑祥民,周立旻,等. 312国道沿线土壤、灰尘重金属污染现状及影响因素[J]. 环境化学, 2011, 29(6): 1139-1146.
- [5] 郭伟,赵仁鑫,张君,等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3099-3106.
- [6] 滕彦国,庾先国,倪师军,等. 应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(8): 25-29.
- [7] 郭笑笑,刘丛强,朱兆洲,等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
- [8] 张宇成,胡红. 单因子标识指数法在浑河抚顺段水质评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S1): 276-280.
- [9] 赵保卫,王刚. 白银市郊区农田土壤重金属污染初步调查与评价[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(11): 79-82.
- [10] 董爱国,翟世奎,于增慧,等. 长江口海域表层沉积物重金属元素的潜在生态风险评价[J]. 海洋科学, 2010, 34(3): 69-76.
- [11] 贺心然,王晶. 应用地质累积指数评价连云港市河流表层沉积物重金属污染[J]. 内蒙古环境科学, 2008, 20(3): 80-85.
- [12] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [13] 刘江生,王仁卿,戴九兰,等. 山东省黄河故道区域土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1699-1705.
- [14] 姚德,孙梅,杨富贵,等. 青岛城区土壤重金属环境地球化学研究[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 539-550.
- [15] Forstner U, Ahlf W, Calmano W, *et al.* Sediment criteria development contributions from environmental geochemistry to water quality management[A]. In: Heling D, Rothe P, Forstner U, *et al.* (Eds). Sediments and environmental geochemistry: selected aspects and case histories [C]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. 311-338.
- [16] 易秀,谷晓静,侯燕卿,等. 陕西省泾惠渠灌区土壤重金属地质累积指数评价[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(3): 288-291.
- [17] 滕彦国,庾先国,倪师军,等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染:选择地球化学背景的影响[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(2): 7-10.
- [18] 刘衍君,汤庆新,白振华,等. 基于地质积累与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 174-178.
- [19] 李静,俞天明,周洁,等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2327-2331.
- [20] 《污染场地风险评估技术导则》(征求意见稿)[S].
- [21] 李如忠,周爱佳,童芳,等. 合肥市城区地表灰尘重金属分布特征及环境健康风险评价[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2661-2669.
- [22] 常静,刘敏,李先华,等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2009, 29(5): 548~554.
- [23] 陈奔,邱海源,郭彦妮,等. 尤溪铅锌矿集区重金属污染健康风险评价研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2012, 51(2): 245-252.
- [24] Ferreim-Bapfista L, De Miguel E. Geochemistry and riskassessment of street dust in Luanda Angola; a tropical urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(25): 4501-4512.
- [25] 朱建军,崔保山,杨志峰,等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 146-153.
- [26] 张辉,马东升. 城市生活垃圾向土壤释放重金属研究[J]. 环境化学, 2001, 20(1): 43-47.
- [27] 孙锐,舒帆,郝伟,等. 典型Pb/Zn矿区土壤重金属污染特征与Pb同位素源解析[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 1146-1154

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 Jiaying	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 (Epiclorohydrin-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, ZHANG 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 Jia-wei, <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-minget <i>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-yong, <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