

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)

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^{1,2}, 秦明周^{1,2*}, 陈龙^{1,2}, 胡长慧^{1,2}, 赵亚平^{1,2}, 董文君^{1,2}

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004; 2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

摘要: 按照土壤采样规范, 对开封段黄河滩区及滩外土壤采样, 表层0~20 cm样品48个, 垂直剖面采样100 cm, 2个; 并按照土壤化学分析方法, 对Pb、Cr、Hg、As和Cd这5种重金属进行分析; 最后, 按照国家土壤一级标准, 采用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数和Håkanson潜在生态危害指数法对开封市黄河滩区土壤重金属分布特征、污染状况和潜在生态危害进行了分析. 结果表明: ①开封市黄河滩区土壤Pb、Cr、Hg、As和Cd这5种重金属含量就平均值而言, Cr的平均含量最大, Pb、Hg的平均含量最小. 除Hg之外, 其它重金属元素的变异系数均较小, 说明重金属Hg存在较大差异; 滩区土壤的主要污染元素为Hg、As、Pb, 其中Pb的污染为普遍性污染. Cr和Cd在各村间变化不大, 且含量均在国家一级标准(自然保护区)以下. ②土壤各重金属元素的空间分布特征研究区内上下段之间分异明显, 上段呈清洁状态, 中段有少量污染, 下段表现出明显富集分布状态; ③以黄河大堤为界, 滩区内重金属分异与居民点分布密切相关, 在滩区上段(西南部)居民集中, 土壤各重金属浓度较高, 表现为沿河区<大堤外, 中下游段(滩区东北部)重金属含量大于大堤外土地, 下游段东北趋向于污染富集. ④以重金属平均单项潜在生态风险指数(E_r^i)评价表明, 开封市黄河滩区土壤Hg的潜在生态风险达到强烈水平, Pb在重金属综合潜在生态风险的贡献率高达50.5%, 是最主要的生态风险重金属, 各个重金属的污染程度为Hg>Pb>As>Cd>Cr. ⑤各重金属生态危害的次序为Hg>Cd>As>Pb>Cr. 由RI值对应的潜在生态风险等级可知, 开封市黄河滩区土壤存在中等级别重金属潜在生态危害.

关键词: 黄河滩区; 土壤重金属; 分布特征; 潜在风险危害; 开封

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3654-09

Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City

ZHANG Peng-yan^{1,2}, QIN Ming-zhou^{1,2}, CHEN Long^{1,2}, HU Chang-hui^{1,2}, ZHAO Ya-ping^{1,2}, DONG Wei-jun^{1,2}

(1. Institute of Resource and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: The distributions, soil environment status and potential ecological risk of heavy metals were studied in beach soil of returning the cropland into Yellow River beach region in Kaifeng by the Nemerows and Håkansons methods. The results showed that ① as Among the average contents of the five heavy metals Pb, Cr, Hg, As and Cd, the highest was the average content of Cr, and the lowest was the average content of Pb and Hg. In addition to Hg, the coefficients of variation of other heavy metals were relatively small, indicating that the content of heavy metals was quite different at different sites, and to some extent, reflecting that Hg, As and Pb were the major elements polluting the soil, among which, Pb pollution was the pollution with universality. There was little difference in the contents of Cr and Cd from village to village the coefficient of variation was small, and the contents were below the national standard level. ② There was significant difference in the spatial distribution of soil heavy metal elements in the upper, the middle and lower sections of the study area. The upper section was clean, the middle section was slightly polluted, and the lower section was enriched with pollutants. ③ The distribution of heavy metals in the beach region inside and outside the levees of Yellow River was closely related to the distribution of the residential regions. In the upper section of the beach region (southwest), the population was large and the contents of heavy metals were high. The contents of heavy metals were lower in the near river zone than outside the levees of Yellow River. And the heavy metal contents in the middle and lower section were higher than those outside the levees of Yellow River, while the lower section (northwest) showed a tendency of pollution enrichment. ④ In the view of the average individual potential ecological risk index of heavy metals (E_r^i), the potential ecological risk of Hg reached intense levels, and the potential ecological risk of Pb's contribution to the integrated risk was 50.5%, which was the heavy metal with highest ecological risks. Cd and Pb had a moderate ecological risk, while As and Cr had minor ecological risk. Ecological hazards of heavy metals ranked in the ascending order of Hg > Pb > As > Cd > Cr. ⑤ The ecological hazard of the heavy metals was ranked in the order Hg > Cd > As > Pb > Cr. Based on the potential ecological risk level

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171439); 河南大学资源与环境研究所项目

作者简介: 张鹏岩(1983~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为资源利用与环境保护, E-mail: pengyanzh@126.com

* 通讯联系人, E-mail: mzqin@henu.edu.cn

corresponding to the RI values, it was shown that there was moderate potential ecological risks of heavy metals in the Yellow River beach region in Kaifeng.

Key words: Yellow River beach region; soil heavy metal; distribution characteristics; potential ecological risk; Kaifeng

近几年来黄河水体污染日趋严重,无机污染物与有机污染物混杂^[1],沿岸滩区土壤重金属污染逐渐显现.所谓重金属污染,是指由重金属及其化合物引起的环境污染^[2~4],由于其持久性和高毒性的环境危害,重金属所诱发的生态毒性风险越来越受到关注^[5~7],特别是与粮食生产关联的土壤重金属含量及迁移规律更是得到普遍重视^[8~10].美国^[11~14]、欧洲^[15,16]、非洲^[17]、澳大利亚^[18]等多个地区和国家先后开展了土壤重金属空间分布、灌溉中重金属存在形态、螯合修复、植物修复等研究,研究表明,土壤重金属富集分别与成土原因及土壤的pH、有机碳OC、质地粒级等因素相关.美国、墨西哥学者对Rio Conchos流域As在河道内外分布开展了研究,发现了尾矿、泥沙沉积等形成的分布差异^[19];泰国西部稻田Cd、Zn分布研究发现与灌溉系统的泥沙搬运有关^[20].一般而言,污水灌溉不仅改变了土壤理化性质,导致了土壤重金属含量增加;而且影响到食品安全、生态安全.因此,灌溉引起的健康风险^[21,22]、污染危害^[23~25]和生态安全^[26,27]等实验评价研究随之兴起.近年来,中国学者^[28~32]对污灌区、矿山污染等重金属研究长期关注,研究表明污灌区重金属Cd、Cr、Cu、Zn和Pb富集趋势明显,污染加剧,且发现灌溉水源是影响土壤重金属空间分布的重要因素.当前重金属研究中以探讨土壤、生物或食物链中的富集、迁移、形态、生物修复、质量标准等为主,研究地域相对集中于城郊污灌区、矿污灌区等,对自然河流滩区研究依然较少.

黄河滩区开封段地处下游悬河大堤内侧,由于水沙运移影响和上游来水水质的恶化等原因,滩区重金属污染已成为一个值得关注的问题.它不仅直接危害滩区土地利用与粮食安全,而且危及滩区生态环境安全,影响到栖息于此的候鸟、水禽和鱼类等.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

开封市黄河滩区位于市境北部.南以黄河大堤为界,北至黄河水面,西到城区水稻乡回回寨村与中牟县交界处,东至兰考县谷营乡窑寨村与山东省边界^[33].开封市滩区上首段直线长约52 km,属明清

故道,河道宽浅,属典型的游荡性河道,两岸堤距5.5~12.7 km,河槽宽1.5~7.5 km^[34].土地总面积311.39 km²,现有耕地127.28 km²,滩区人均耕地 8×10^{-4} km².

黄河下游滩地是不同于一般平原河流滩地的特殊类型,不具备典型的河漫滩相沉积,无二元结构.在小浪底建成运行前(2002年),是河流行洪区域,而且经常遭受河流侵蚀、水淹等.2002年小浪底水库运行后,随着下游控导工程有计划建成,控制下游流量、约束主流按设计治导线泄,滩区才得以稳定,少有水灾或水淹.因此,当前滩区内边界是以现核准最低洪水流量 $4\,000\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 为起算边界^[33],外侧以黄河大堤为界.但是,由于黄河下游高泥沙、善徙、善变等特点,滩区土壤的形成与一般河道不同.研究区内滩地淤积的土壤均属新分类的初育土.局部淤积年代10 a左右,靠近大堤、地势较高的滩地形成历史可能在百年以上,并承受了多次洪水淹没.

1.2 样品采集和处理

(1) 样品分布

土壤样品于2010年4月采集.采样范围覆盖开封市黄河滩区内所有的8个村庄,采集样品50个,其中马庄村9个样点,马庄村靠近黄河岸边5个样点,小马庄村6个样点,马头村、轩楼村、梅庄、南北堤村和黄河渡口浮桥各4个样点;朱厂村3个样点,共48个表层样点;在渡口浮桥和马头村滩区内,进行剖面土样采集,根据剖面表现出来的形态特征差异,将渡口浮桥处进行剖面1土样采集,划分3层至100 cm;在马头村进行剖面2土样采集,划分4层至100 cm.采样点分布如图1所示.

(2) 样品采集与初处理

样品均采自100 m²以上的大面积田块取表层0~20 cm土壤5个点制成混合样.用四分法取大约1 kg的样品,保存在自封袋内带回实验室.实验室内自然风干,后取50 g,用木质工具碾碎并用玛瑙研钵上研磨,混匀,过2 mm和0.125 mm尼龙筛,保存在自封袋内后,用于重金属的测定.

(3) 样品分析

pH采用电位法,Hg、As采用还原气化-原子荧光光谱法,Cr、Pb、Cd采用三酸(HF-HNO₃-HClO₄)

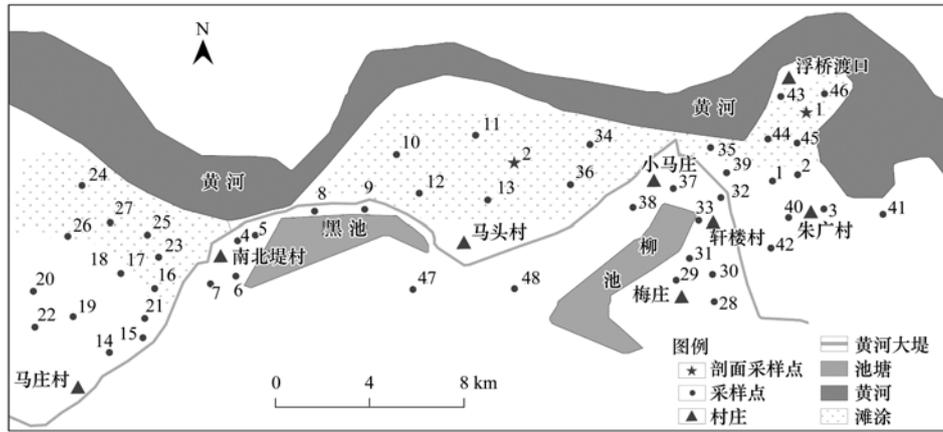


图1 研究区域及其采样示意
Fig. 1 Study area and sampling sites

消化,电感耦合高频等离子体发射光谱法(即 ICP 法)测定^[35].

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量的描述性统计分析

国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)将土壤环境质量分为3个等级^[36](见表1). 黄河滩区作为下游重要湿地系统,一直按照自然保护区进行管理. 所以,本研究采取国家土壤环境质量标准一级标准的土壤自然背景值对黄河滩区开封段土壤进行评价,评价指标为 Pb、Cr、Hg、As、Cd.

表1 国家土壤环境质量标准

| 级别 | 一级 | 二级 | 三级 |
|---------|------|------|---------|
| 土壤 pH 值 | 自然背景 | <6.5 | 6.5~7.5 |
| Cr≤ | 90 | 150 | 200 |
| Hg≤ | 0.15 | 0.30 | 0.50 |
| As≤ | 15 | 40 | 30 |
| Cd≤ | 0.20 | 0.30 | 0.30 |
| Pb≤ | 35 | 250 | 300 |

参照土壤污染分级标准进行评价(见表2).

表2 土壤环境质量评价分级表(GB 15618-1995)

| 污染指数 | 污染程度 | 污染水平 | 等级 |
|--------------------|------|---------------------|------|
| $p_n \leq 0.7$ | 安全 | 清洁 | I级 |
| $0.7 < p_n \leq 1$ | 警戒 | 尚清洁 | II级 |
| $1 < p_n \leq 2$ | 轻污染 | 土壤污染物超过其背景值,作物开始受污染 | III级 |
| $2 < p_n \leq 3$ | 中度污染 | 土壤、作物受到中度污染 | IV级 |
| $p_n > 3$ | 重度污染 | 土壤、作物受污染已相当严重 | V级 |

开封市黄河滩区土壤 Pb、Cr、Hg、As 和 Cd 这5种重金属含量的描述统计分析(见表3)表明:就

平均值而言,Cr 的平均值最大,其次为 Pb,Hg 的平均值最小. 除 Hg 之外,其它重金属元素的变异系数均较小,说明黄河滩区开封段各村受污染程度相似,这可能与黄河滩地土壤的形成和淤积年代有关. Cr 和 Cd 在各村间田块变化不大,变异系数较小,并且含量均在国家一级标准以下. Hg 在各村间田块变化最大,变异系数最大 48.00%,其含量以马头村为最高值 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Pb 的变异系数为 21.00%,各样点含量不稳定,虽然 Hg 和 Pb 的平均含量均满足国家一级标准,但部分样点的 Hg 和 Pb 含量仍高于国家一级标准,这就说明土壤中 Hg 和 Pb 受外界干扰尤其显著,究其原因可以归结为该地区的砖瓦窑开采和一些工矿废弃物排放的影响. As 的变异系数仅次于 Hg,为 28.00%,以轩楼(公路)为最低,平均含量为 $11.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,局部高于国家一级标准,黄河滩区被污染土壤中的 As 来自农药中的砷残留,以及当地砖瓦窑燃煤、上游工厂含砷废水的排放等含砷飘尘的降落.

表3 开封市黄河滩区土壤重金属含量的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of soil heavy metal contents in the Yellow River beach region in Kaifeng

| 样品类型 | Pb | Cr | Hg | As | Cd |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 74.4 | 79.75 | 0.17 | 18.78 | 0.129 |
| 最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 30.9 | 51.37 | 0.02 | 7.22 | 0.083 |
| 平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 48.26 | 62.99 | 0.076 | 11.69 | 0.103 |
| 标准差 | 10.13 | 9.47 | 0.04 | 3.26 | 0.01 |
| 变异系数/% | 21 | 15 | 48 | 28 | 13 |

2.2 评价方法

现有的重金属评价中,主要采用的是污染指数法^[37,38]. 其中,单因子污染指数评价法可用于评价土壤重金属元素的累积污染程度,内梅罗指数法可

评价土壤重金属综合污染程度^[39,40]。

单因子污染指数法是测算评价土壤中单个污染元素的污染指数,其公式为:

$$P_{ij} = \frac{c_{ij}}{s_{ij}} \quad (1)$$

表4 黄河滩区土壤重金属样本比例单因子污染状况/%

Table 4 Sample proportion of single factor pollution of soil heavy metals in the Yellow River beach region/%

| 元素 | 样品个数 | I (清洁) | II (尚清洁) | III (轻污染) | IV (中度污染) | V (重污染) |
|----|------|--------|----------|-----------|-----------|---------|
| Cr | 48 | 60.42 | 39.58 | | | |
| Hg | 48 | 79.17 | 18.75 | 2.08 | | |
| As | 48 | 47.92 | 29.17 | 22.91 | | |
| Cd | 48 | 100 | | | | |
| Pb | 48 | | | 56.25 | 47.25 | |

单因子污染指数法计算得出,Pb超过了土壤背景值,已构成污染,且中度污染范围较广;而As和Hg构成Ⅲ级轻度污染,Cr、Cd没有构成污染且全部清洁。

内梅罗(NLNemerow)综合污染指数法,其公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_i)^2 + (P_{i\text{max}})^2}{2}} \quad (2)$$

表5 滩区土壤重金属污染指数¹⁾

Table 5 Soil heavy metal pollution index in the Yellow River beach region

| 元素 | 样本数 | 单项污染指数 | | | 综合污染指数 | 污染程度(级别) |
|----|-----|--------|-------|-------|--------|----------|
| | | 平均值 | 最小值 | 最大值 | | |
| Cr | 48 | 0.698 | 0.571 | 0.886 | 1.160 | Ⅲ级轻度污染 |
| Hg | 48 | 0.500 | 0.133 | 1.133 | | |
| As | 48 | 0.775 | 0.481 | 1.250 | | |
| Cd | 48 | 0.515 | 0.414 | 0.643 | | |
| Pb | 48 | 1.919 | 1.236 | 2.976 | | |

1) 根据国家土壤环境质量一级标准

根据国家环境保护局土壤环境质量标准(GB 15618-1995)和土壤污染分级标准进行评价。采用内梅罗污染指数法,得出研究区土壤质量属于Ⅲ级轻度污染。根据采样时对当地人员访问和实地环境的考察,这是自然环境下土壤内在属性和人为因素共同的作用。主要原因20世纪90年代以来,黄河及支流受到严重污染^[46,47],上游来水水质的不断恶化,河床呈游荡型,河水反复淤积冲刷滩区土地,加之滩区内有砖瓦窑进行生产,其燃烧产生的大量重金属及其污染物质在滩区土壤残留,使得重金属以及污染物质继续向中游和下游迁移、富集。由于近些年,漫滩几率低,滩区内人为活动增多,导致滩区内大量污水、废物进行排放,同时也加剧了滩区土壤受到污染的可能性。

式中, P_{ij} 是黄河滩区土壤中 j 个样点 i 污染物的环境质量指数; c_{ij} 是 j 个样点 i 污染物的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); s_{ij} 是 i 污染物的评价标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。土壤环境的质量可以分为5级,见表2,根据土壤质量环境标准来进行单因子污染指数评价,其结果见表4。

式中, $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_i 为重金属 i 实测含量与其评价参考值(以不同的评价参考背景值)的比值; $P_{i\text{max}}$ 为各重金属中最大的污染指数的最大值,这种方法的计算结果不仅考虑了各种污染物的平均污染水平,也反映了污染中严重的污染物给环境带来的危害。

根据国家土壤环境质量标准进行评价,其结果见表5。

3 滩区土壤重金属分布特征

3.1 滩区重金属水平分布趋势

空间插值研究的本质就是要通过空间建模来拟合生成充分逼近要素空间分布特征的函数方程^[48],插值模型的选择是土壤重金属污染评价的基础^[44]。普通克里格法(Ordinary Kriging)对土壤化学性质的插值精度和每种土壤属性都是最好的方法^[45,46]。本研究应用普通克里格法进行最优内插,绘制了各重金属元素的空间分布格局图(图2)。由图2中重金属的分布特征分析发现,滩区中段和西南部居民集中区域的土壤重金属浓度较高,滩区中段地区是原有砖瓦窑厂址,西南部马庄村一带是居民点聚集地,研究区东北处趋向于污染富集态势。

早在 20 世纪 70 年代,黄河原水样品中被称为准金属或类金属的含量很高,尤其是山、陕以下河段原水样品中的含量剧增,一些悬浮物和沉积物的重金属含量较高,具有潜在生态危险,黄河中的重金属物质并不存在于水相中,而主要存在于悬浮泥沙相中^[47,48]. 经过河水淤积之后,残留在地表土壤之中,逐步下移. 小浪底水库建成进行调水调沙之后,滩区河漫滩的几率变得很小,成土重金属富集的可能性也变小.

土壤 As 含量在研究区上段靠近黄河保持清洁,高浓度区域集中在研究区中段靠近河流位置,土壤 As 在研究区东北角有富集趋势,其他区域都非常低,整体无超标现象.

土壤 Pb 含量在研究区上段地区靠近黄河与大堤外部保持清洁,高浓度区域集中在居民点较多的马庄村和滩区中段靠近河流的马头村,土壤 Pb 在研究区东北处略有升高趋势,其他区域都非常低,整体无超标现象.

土壤 Cd 含量和 Pb 含量呈相似分布,高浓度区域集中在马庄村和马头村,在研究区东北处一带浓度富集,滩区外部和滩区上段地区保持清洁,没有出现超标状态.

土壤 Cr 富集区域主要分布在研究区的中东部,由西向东略有升高趋势并向下游富集的趋势,其他区域 Cr 的含量都非常低,无超标现象,并且低于国家土壤环境背景值一级标准.

土壤 Hg 含量的分布趋势总体上是中段地区偏高,属于滩区内部. 其他地区 Hg 的含量较小.

3.2 滩区重金属纵向分布趋势

为更好地评定滩区土壤重金属污染及迁移状况,根据剖面表现出来的形态特征差异,在位于老滩的渡口浮桥进行剖面 1 土样采集,划分 3 层;在新滩的马头村进行剖面 2 土样采集,划分 4 层. 对黄河滩区开封段土壤 Pb、Cr、Hg、As 和 Cd 这 5 种重金属含量进行纵向分析(见表 6). 从剖面 1 可以看出,在渡口浮桥处,土壤重金属含量变化不是很明

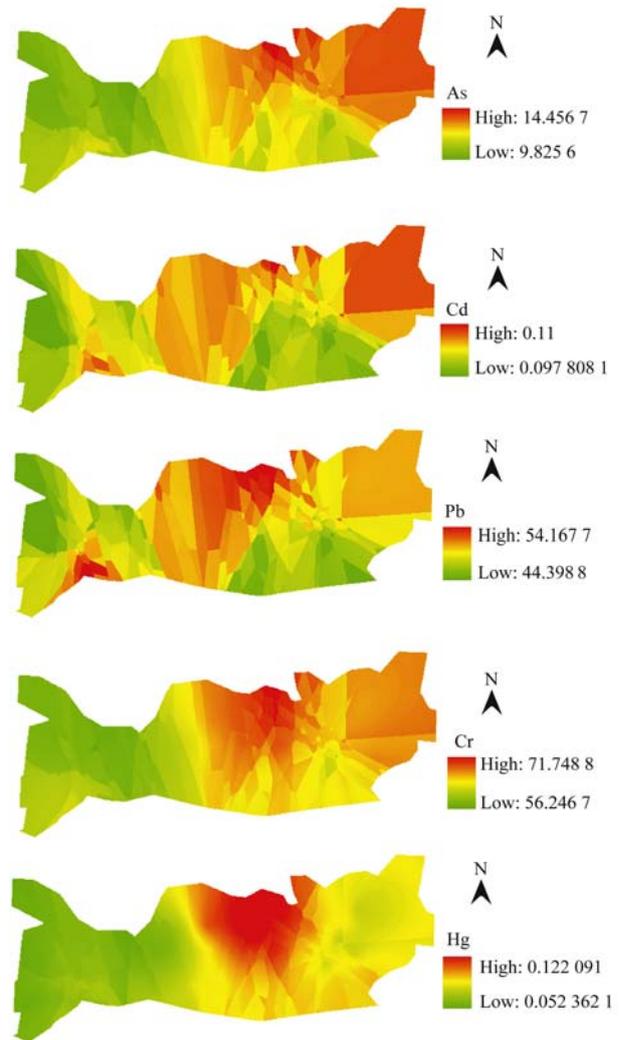


图 2 滩区土壤各重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals As,Pb,Cd,Cr and Hg in the Yellow River beach region

显,在 0 ~ 20 cm 处重金属含量为最大,重金属含量逐层下降,60 ~ 100 cm 处重金属含量最小;从剖面 2 可以看出,在 40 ~ 70 cm 深度所研究的各重金属均达到最大值,70 ~ 100 cm 处重金属含量与表层土 0 ~ 20 cm 最小. 除了 Pb 含量超标之外,其余所研究的重金属均低于国家一级标准. 剖面 1 表层土重金属含量较大是因为渡口浮桥,车辆较多,尾气排放以

表 6 5 种重金属平均含量在土壤剖面上的分布/mg·kg⁻¹

Table 6 Distribution of average concentrations of the five heavy metals in the soil profile/mg·kg⁻¹

| 元素 | 剖面 1 | | | 剖面 2 | | | |
|----|-----------|------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|
| | 0 ~ 20 cm | 20 ~ 60 cm | 60 ~ 100 cm | 0 ~ 20 cm | 20 ~ 40 cm | 40 ~ 70 cm | 70 ~ 100 cm |
| Pb | 30.00 | 28.10 | 25.90 | 28.60 | 31.00 | 39.60 | 31.50 |
| Cr | 56.10 | 54.41 | 40.81 | 55.33 | 60.94 | 64.90 | 55.77 |
| Hg | 0.031 | 0.013 | 0.011 | 0.018 | 0.015 | 0.028 | 0.024 |
| As | 8.59 | 7.42 | 4.95 | 8.23 | 7.00 | 11.17 | 8.70 |
| Cd | 0.083 | 0.080 | 0.083 | 0.080 | 0.089 | 0.103 | 0.097 |

及器械磨损产生的重金属居多;人为影响较大,生产、生活产生的废弃物排放后分解,由于这部分区域属于老滩,淤积漫滩几率已经很低,造成这部分土壤质地构成稳定,表层土污染稍大.剖面2中40~70 cm处重金属含量最高,这可能与河道土壤淤积年代有关.由于河道滩涂土壤的形成主要是由于河流的淤积而成,不同时期的土壤严格受到上游河道的影响,土壤淤积会由于年代不同而出现明显的分层现象.

3.3 滩区沿河上段至下段土壤重金属浓度变化

为了更好地对黄河滩区开封段土壤重金属进行研究,笔者对土壤重金属进行了横向和纵向的分析.随机选取研究区沿河上段、中段和下段的采样点进行分析(见表7),滩区中段地区重金属含量最高,下段次之,上段最低,这是由于中段和下段地区属于高滩,常年土壤淤积,其主要原因与上段污水和当地土壤质地有关,由于黄河上段来水污染情况比较严峻,导致河水在摆荡和冲刷滩区,发育成的土壤质地较粘,具有较强的吸附能力,可吸附较多的重金属,也是此区域重金属富集的原因.

表7 滩区上段至下段土壤重金属浓度变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 7 Concentration change of soil heavy metals from the upper section to the lower section in the Yellow River beach region/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 位置 | 编号 | Pb | Cr | Hg | As | Cd |
|----|-----|-------|-------|------|-------|------|
| 上段 | Q23 | 35.80 | 56.32 | 0.04 | 9.73 | 0.09 |
| | Q24 | 40.80 | 54.56 | 0.06 | 9.64 | 0.09 |
| | Q25 | 34.70 | 53.27 | 0.05 | 8.24 | 0.09 |
| | Q27 | 37.30 | 53.35 | 0.09 | 8.47 | 0.09 |
| | 平均值 | 37.15 | 54.38 | 0.06 | 9.02 | 0.09 |
| 中段 | Q10 | 38.10 | 60.17 | 0.02 | 7.22 | 0.09 |
| | Q11 | 72.40 | 78.98 | 0.17 | 18.08 | 0.13 |
| | Q34 | 51.60 | 72.93 | 0.15 | 13.65 | 0.11 |
| | Q35 | 56.70 | 72.27 | 0.13 | 15.04 | 0.11 |
| | 平均值 | 54.70 | 71.09 | 0.12 | 13.50 | 0.11 |
| 下段 | Q43 | 58.50 | 75.13 | 0.10 | 14.78 | 0.12 |
| | Q44 | 50.10 | 72.60 | 0.07 | 12.97 | 0.11 |
| | Q45 | 37.20 | 56.87 | 0.15 | 17.76 | 0.09 |
| | Q46 | 31.50 | 52.91 | 0.02 | 7.80 | 0.09 |
| | 平均值 | 44.33 | 64.38 | 0.09 | 13.33 | 0.10 |

3.4 滩区沿河向外至大堤外土壤重金属浓度变化

随机选取上段、中段和下段采样点对滩区沿河区、外部和大堤外土壤重金属继续比较分析(见表8~表10),上段各区域除了Cr的含量大堤外低于

滩区内,Pb、Hg、As和Cd的含量均是大堤外>滩区外部>滩区沿河区;中段区域和下段区域重金属各含量均是滩区沿河区最高,说明滩区沿河区重金属污染已经开始积累.

表8 滩区内至大堤外(上段)土壤重金属含量变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 8 Concentration change of soil heavy metals from the inner region to the outside region of the levees (the upper section) in the Yellow River beach region/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 位置 | 编号 | Pb | Cr | Hg | As | Cd |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 滩区沿河区 | Q27 | 37.30 | 53.35 | 0.086 | 8.47 | 0.091 |
| 滩区外部 | Q21 | 43.50 | 55.11 | 0.050 | 9.30 | 0.094 |
| 大堤外 | Q6 | 54.40 | 52.47 | 0.060 | 10.62 | 0.114 |

表9 滩区内至大堤外(中段)土壤重金属变化/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 9 Concentration change of soil heavy metals from the inner region to the outside region of the levees (the middle section) in the Yellow River beach region/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 位置 | 编号 | Pb | Cr | Hg | As | Cd |
|-------|-----|-------|-------|------|-------|------|
| 滩区沿河区 | Q11 | 72.40 | 78.98 | 0.17 | 18.08 | 0.13 |
| 滩区外部 | Q13 | 41.40 | 51.81 | 0.05 | 8.40 | 0.09 |
| 大堤外 | Q48 | 45.00 | 63.69 | 0.06 | 12.32 | 0.11 |

表 10 滩区内至大堤外(下段)土壤重金属变化/mg·kg⁻¹Table 10 Concentration change of soil heavy metals from the inner region to the outside region of the levees(the lower section) in the Yellow River beach region/mg·kg⁻¹

| 位置 | 编号 | Pb | Cr | Hg | As | Cd |
|-------|-----|-------|-------|------|-------|------|
| 滩区沿河区 | Q43 | 58.50 | 75.13 | 0.10 | 14.78 | 0.12 |
| 滩区外部 | Q1 | 46.70 | 54.12 | 0.03 | 8.98 | 0.10 |
| 大堤外 | Q28 | 34.70 | 55.55 | 0.08 | 8.69 | 0.09 |

4 生态风险评价

采用 Håkanson 潜在生态危害指数法^[49]评价土壤重金属风险程度,其计算公式为:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i} \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (5)$$

式中, C_f^i 为单项污染系数, C^i 为样品中污染物*i*的实测含量, C_n^i 为污染物*i*的参比值, E_r^i 为污染物*i*的单项潜在生态风险指数, T_r^i 为污染物*i*的毒性系数(见表 11),RI 为综合潜在生态风险指数。 E_r^i 和 RI 可分别评价某种污染物和多种污染物的潜在生态风险程度。

据此,得到本研究各评价指标的等级划分标准(表 12、表 13)。

表 14 黄河滩区土壤重金属潜在生态风险评价

Table 14 Assessment of potential ecological risks of soil heavy metals

| 类型 | 统计项 | C_f^i | | | | | E_r^i | | | | | RI |
|------|-----|---------|------|------|------|------|---------|------|--------|-------|-------|--------|
| | | Pb | Cr | Hg | As | Cd | Pb | Cr | Hg | As | Cd | |
| 滩区土壤 | 最大值 | 3.40 | 1.20 | 3.62 | 1.94 | 1.29 | 16.99 | 2.39 | 144.68 | 19.36 | 38.57 | 232.05 |
| | 最小值 | 1.41 | 0.77 | 0.43 | 0.74 | 0.83 | 7.05 | 1.54 | 17.02 | 7.44 | 24.86 | 65.62 |
| | 平均值 | 2.19 | 0.94 | 1.60 | 1.20 | 1.03 | 10.95 | 1.89 | 63.85 | 11.98 | 30.93 | 126.55 |

从重金属平均单项污染系数(C_f^i)来看(表 14、表 15),黄河滩区开封段土壤 Hg 呈强烈污染,Pb、As 和 Cd 呈中等污染,Cr 呈轻微污染,各个重金属的污染程度为 Hg > Pb > As > Cd > Cr。由表 15 可见,土壤 Hg 污染达到强烈程度和中等程度的样点百分数分别为 6.3%、68.8%,最大 C_f^{Hg} 出现在马头村的 11 号样点($C_f^{\text{Hg}} = 3.62$)。土壤 Pb 污染达到中等程度的样点百分数为 95.8%,最大 C_f^{Pb} 出现在马庄北的 14 号样点。需要指出,虽然土壤 As 是自然源重金属,在滩区土壤中富集较多,64.5%的样点也发生了中等 As 污染。

从重金属平均单项潜在生态风险指数(E_r^i)来

表 11 重金属的毒性系数及参比值

Table 11 Toxicity coefficients of heavy metals and reference values

| 项目 | Pb | Cd | Cr | As | Hg |
|------|------|-----|------|-----|-------|
| 毒性系数 | 5 | 30 | 2 | 10 | 40 |
| 参比值 | 21.9 | 0.1 | 66.6 | 9.7 | 0.047 |

表 12 Håkanson 潜在生态危害分级标准

Table 12 Grading standards of Håkanson potential ecological risk

| 生态危害 | 轻微 | 中等 | 强 |
|----------|------|---------|------|
| E_r^i | <30 | 30~60 | >60 |
| H_{RI} | <135 | 135~265 | >265 |

表 13 C_f^i 的分级标准Table 13 Grading standards for evaluation factors of C_f^i

| 污染程度 | 轻微 | 中等 | 强 | 很强 |
|---------|----|-----|-----|----|
| C_f^i | <1 | 1~3 | 3~6 | >6 |

重金属形态含量之和作为 C^i ,以其潮土背景值作为参照值,按式(3)~式(5)计算得到土壤各个重金属的 C_f^i 、 E_r^i 和 RI 值(表 14)。

看(表 14、表 15),黄河滩区开封段土壤 Hg 的潜在生态风险达到强烈水平($E_r^{\text{Hg}} = 144.68$),Pb 对重金属综合潜在生态风险的贡献率高达 50.5%,是最重要的生态风险重金属。在黄河上游区域 Pb、Cd 和 Hg 具有相对较高的生态风险指数,尤其是 Pb 的潜在风险比较高^[50]。土壤 Cd 属中等生态风险,Pb、As 和 Cr 属轻微生态风险。各重金属生态危害的次序为 Hg > Cd > As > Pb > Cr,最大 E_r^{Hg} 出现在马头村的 11 号样点,最大 E_r^{Cr} 值出现在朱厂村的 41 号样点, E_r^{Cd} 、 E_r^{As} 、 E_r^{Pb} 的最大值都出现在马头村的马庄村北的 18 号样点。经过实地考察和验证,18 号样点靠近废弃砖瓦窑用地。

表 15 黄河滩区土壤 C_r^i 、 E_r^i 分级样点百分数/%Table 15 Percentage of the samples in different C_r^i and E_r^i grades for different metals in the Yellow River beach region/%

| 重金属 | C_r^i | | | | E_r^i | | |
|-----|---------|------|------|------|---------|------|------|
| | 轻微污染 | 中等污染 | 强烈污染 | 很强污染 | 轻微风险 | 中等风险 | 强烈风险 |
| Pb | 4.2 | 95.8 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| Cr | 66.7 | 33.3 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| Hg | 24.9 | 68.8 | 6.3 | 0.0 | 12.5 | 35.4 | 52.1 |
| As | 36.5 | 64.5 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 0.0 |
| Cd | 45.8 | 54.2 | 0.0 | 0.0 | 45.8 | 54.2 | 0.0 |

5 结论

(1) 从开封段黄河滩区重金属的分布特征来看, 滩区中段和西南部居民集中区域的土壤重金属浓度较高, 除了砖瓦窑和居民聚集点原因之外, 还由于这部分地区属于高滩, 自小浪底水库建成进行调水调沙之后, 河漫滩的几率变得很小, 缺少水沙运移的重金属富集可能增强。下段区域有污染的趋势, 存在污染潜在风险, 这可能与本研究区下游段滩区长期泥沙淤积, 重金属可能富集趋势增加有关。

(2) Cr、Hg、Cd、As 在黄河滩区土壤中富集不明显, 属于自然源重金属; 而土壤 Pb 富集明显, 属于人为源重金属, 可能与上游黄河沿岸工厂废水排放有关。根据 Håkanson 潜在生态危害分级标准进行评价, 5 种重金属潜在生态危害指数 RI 为 65.62 ~ 235.05。由此推知, 滩区开封段土壤属中等级别重金属潜在生态危害。

(3) 对照滩区检测重金属元素的背景值以及 RI 值评价结果推知, 人类活动对滩区土壤的影响不是很强烈, 但为避免土壤潜在生态危害的进一步发展, 应重视上下游重金属污染防治。

参考文献:

- [1] 李恭臣, 夏星辉, 王然, 等. 黄河中下游水体中多环芳烃的分布及来源[J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1738-1743.
- [2] 曹斌, 何松洁, 夏建新. 重金属污染现状分析及其对策研究[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2009, **18**(1): 29-33.
- [3] Hervada-Sala C, Jarauta-Bragulat E. Optimal regional sampling network to analyse environmental pollution by heavy metals using indirect methods. Case Study: Galicia (NW of Spain) [M]. Springer Netherlands: GeoENV IV-Geostatistics for Environmental Applications, 2004. 449-460.
- [4] Abrahams P W. Soils; Their implications to human health[J]. Science of the Total Environment, 2002, **291**(1-3): 1-32.
- [5] 孙晋伟, 黄益宗, 石孟春, 等. 土壤重金属生物毒性研究进展[J]. 生态学报, 2008, **28**(6): 2861-2869.
- [6] 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): 761-768.
- [7] Golia E E, Dimirkou A, Mitsios I K. Levels of heavy metals pollution in different types of soil of central Greece[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, **80**(3): 206-210.
- [8] Crnković D, Ristić M, Antonović D. Distribution of heavy metals and Arsenic in soils of Belgrade (Serbia and Montenegro)[J]. Soil and Sediment Contamination, 2006, **15**(6): 581-589.
- [9] Douay F, Roussel H, Fourrier H, et al. Investigation of heavy metal concentrations on urban soils, dust and vegetables nearby a former smelter site in Mortagne du Nord, Northern France[J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, **7**(3): 143-146.
- [10] Tume P, Bech J, Sepulveda B, et al. Concentrations of heavy metals in urban soils of Talcahuano (Chile): a preliminary study [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **140**(1-3): 91-98.
- [11] Singh A, Sharma R K, Agrawal M, et al. Effects of wastewater irrigation on physicochemical properties of soil and availability of heavy metals in soil and vegetables[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, **40**(21-22): 3469-3490.
- [12] Nelson S S, Yonge D R, Barber M E. Effects of road salts on heavy metal mobility in two eastern Washington soils[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, **135**(7): 505-510.
- [13] Engberg R A, Sylvester M A. Concentrations, distribution, and sources of selenium from irrigated lands in Western United States [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, **119**(3): 522-536.
- [14] Zhang Y Q, Moore J N. Controls on selenium distribution in wetland sediment, Benton Lake, Montana[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1997, **97**(3-4): 323-340.
- [15] Wyzga B, Ciszewski D. Hydraulic controls on the entrapment of heavy metal-polluted sediments on a floodplain of variable width, the upper Vistula River, southern Poland[J]. Geomorphology, 2010, **117**(3-4): 272-286.
- [16] Sollitto D, Romić M, Castrignanò A, et al. Assessing heavy metal contamination in soils of the Zagreb region (Northwest Croatia) using multivariate geostatistics[J]. CATENA, 2010, **80**(3): 182-194.
- [17] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, et al. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, **107**(2-3): 151-165.
- [18] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, et al. Long-term impact

- of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, **109**(3-4): 310-322.
- [19] Gutierrez M, Alarcón-Herrera M T, Camacho L M. Geographical distribution of arsenic in sediments within the Rio Conchos Basin, Mexico[J]. *Environmental Geology*, 2009, **57**(4): 929-935.
- [20] Simmons R W, Pongsakul P, Saiyasitpanich D, *et al.* Elevated levels of cadmium and zinc in paddy soils and elevated levels of cadmium in rice grain downstream of a zinc mineralized area in Thailand; Implications for public health [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2005, **27**(5-6): 501-511.
- [21] Thornton G J P, Walsh R P D. Heavy metals in the waters of the Nanty-Fendrod; change in pollution levels and dynamics associated with the redevelopment of the Lower Swansea Valley, South Wales, UK[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **278**(1-3): 45-55.
- [22] 杨军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉风灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析——兼论土壤重金属有效性测定指标的可靠性[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(12): 1661-1666.
- [23] 郑袁明, 陈同斌. “北京市土壤和蔬菜重金属污染与风险评价”取得重要进展[J]. *地理研究*, 2004, **23**(5): 715.
- [24] 王贵玲, 蔺文静. 污水灌溉对土壤的污染及其整治[J]. *农业环境科学学报*, 2003, **22**(2): 163-166.
- [25] Olga A, Richard M. Environmental risk assessment of metals contaminated soils at silver mines abandoned mine site, Co Tipperary, Ireland[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2003, **25**(2): 247-266.
- [26] Al-Jamala M S, Sammis T W, Mexala J G, *et al.* A growth-irrigation scheduling model for wastewater use in forest production [J]. *Agricultural Water Management*, 2002, **56**(1): 57-79.
- [27] 宋冬梅, 肖笃宁, 马明国, 等. 民勤湖区地下水资源时空变化对灌区景观生态安全的影响研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(10): 1815-1820.
- [28] Fu C, Guo J, Pan J, *et al.* Potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in sediments of the Yangtze River within the Wanzhou section, China [J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, **129**(1-3): 270-277.
- [29] 吴光红, 苏睿先, 李万庆, 等. 大沽排污河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.
- [30] 杨继松, 孙丽娜, 杨晓波, 等. 沈阳市细河沿岸农田土壤重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(5): 1933-1936.
- [31] 杜习乐, 马建华, 吕昌河, 等. 污灌农田土壤动物及其对重金属污染的响应——以开封市化肥河灌区为例[J]. *地理研究*, 2010, **29**(4): 617-628.
- [32] 李政红, 张胜, 马琳娜, 等. 污灌区土壤重金属污染分布及其影响因素研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, **24**(11): 166-169.
- [33] 秦明周, 张鹏岩, 赵自胜, 等. 开封市黄河滩区土地资源规避洪水风险的安全利用[J]. *地理研究*, 2010, **29**(9): 1584-1593.
- [34] 王英, 张希玉, 宋广生. 黄河下游滩区存在问题分析[J]. *中国水利*, 2006, (18): 3-5.
- [35] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [36] 叶琛, 李思悦, 卜红梅, 等. 三峡水库消落区蓄水前土壤重金属含量及生态危害评价[J]. *土壤学报*, 2010, **43**(6): 1264-1269.
- [37] Jamali M K, Kazi T G, Arain M B, *et al.* Heavy metals from soil and domestic sewage sludge and their transfer to Sorghum plants [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2007, **5**(4): 209-218.
- [38] Morton-Bermea O, Hernández-Álvarez E, González-Hernández G. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2009, **101**(3): 218-224.
- [39] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. 102-103.
- [40] 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰土土地土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. *生态学报*, 2009, **29**(4): 2169-2177.
- [41] 洪松, 陈静生, 程兵岐. 黄河水系悬浮物和沉积物重金属质量基准研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, **28**(12): 61-65.
- [42] 罗文艺, 靳孟贵, 何巧林, 等. 黄河河南段河漫滩沉积柱重金属元素分布规律[J]. *人民黄河*, 2008, **30**(9): 53-54.
- [43] 朱会义, 刘述林, 贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. *地理研究*, 2004, **23**(4): 425-432.
- [44] 谢云峰, 陈同斌, 雷梅, 等. 空间插值模型对土壤 Cd 污染评价结果的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 847-854.
- [45] Panagopoulos T, Jesus J, Antunes M D C, *et al.* Analysis of spatial interpolation for optimizing management of a salinized field cultivated with lettuce [J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, **24**(1): 1-10.
- [46] Yasrebi J, Saffari M, Fathi H, *et al.* Evaluation and comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters [J]. *Research Journal of Biological Sciences*, 2009, **4**(1): 93-102.
- [47] 陈静生, 余涛. 对黄河泥沙与水质关系的研究——回顾及展望[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, **41**(6): 950-956.
- [48] 何江, 王新伟, 李朝生, 等. 黄河包头段水——沉积物系统中重金属的污染特征[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(1): 53-57.
- [49] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [50] 袁浩, 王雨春, 顾尚义, 等. 黄河水系沉积物重金属赋存形态及污染特征[J]. *生态学杂志*, 2008, **27**(11): 1966-1971.

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 (Epicichlorhydrin-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