

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈革, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估

王洋洋¹, 李方方¹, 王笑阳^{1,2}, 杨志辉², 韩科³, 阮心玲^{1*}

(1. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明传承与现代文明建设河南省协同创新中心, 开封 475001; 2. 中南大学冶金与环境学院, 长沙 410083; 3. 河南省土壤重金属污染监测与修复重点实验室, 济源 459000)

摘要: 以焦作某铅锌冶炼厂为例, 采用网格布点法在冶炼厂周围 64 km² 范围内采集表层农田土壤样品 135 个。在实验室测定了土壤重金属 (Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Ni、V、Co) 含量, 利用 Arcgis 10.1 进行克里格插值分析研究区域农田土壤中重金属的空间分布特征, 并利用富集因子法、潜在生态风险以及健康风险模型对研究区域农田土壤中重金属污染状况及潜在风险进行评价。结果表明, 研究区域农田土壤中 Cd、Pb、Cr、Zn 的平均值均高于河南省 A 层土壤元素背景值, Cd 的平均值为国家土壤环境质量二级标准的 2.8 倍; 研究区域内总体污染分布呈西高东低, 中部冶炼厂附近为 Pb、Cd 重度污染区, 在 3 km 范围内距离工厂越近污染越严重。在研究区域内, Cd 为重度污染, 部分样点 Pb、Cu、Zn 污染较严重, Cr、Co 为轻度污染, Ni 和 V 几乎不受工厂影响。风险评估结果显示, 研究区域内 Cd 存在严重的潜在生态风险和健康风险, Pb、Cu 存在较严重潜在生态风险, Cr 存在较严重的致癌风险。

关键词: 冶炼厂; 重金属污染; 农田土壤; 空间分布; 风险评估

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0437-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201803031

Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter

WANG Yang-yang¹, LI Fang-fang¹, WANG Xiao-yang^{1,2}, YANG Zhi-hui², HAN Ke³, RUAN Xin-ling^{1*}

(1. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization of Henan Province, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Key Laboratory for Monitor and Remediation of Heavy Metal Polluted Soils of Henan Province, Jiyuan 459000, China)

Abstract: Surface farmland soil samples were collected from 135 different sites in a 64 km² area around a lead and zinc smelter in Jiaozuo City, China. The concentration of the selected heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Ni, V, and Co) was analyzed and the spatial distribution of these heavy metals in the farmland was determined using the kriging interpolation technique (ArcGIS 10.1). The enrichment factor, potential ecological risk model, and potential health risk model were used to assess the contamination level and potential risk of heavy metals in farmland surface soil. The results show that the average contents of Cd, Pb, Cr, and Zn in farmland soil are higher than the background content of these metals in the Henan Province and the average content of Cd is 2.8 times higher than that of class II of the environmental quality standard for soils in China (GB 15618-1995). The heavy metal contamination in the west of the study area is higher than that in the east and the soil around the lead and zinc smelter (within 3 km) is severely contaminated with Pb and Cd, which is consistent with the location of the industries causing the pollution. The enrichment factors show that the soil is severely contaminated with Cd; partial sampling points are seriously contaminated with Pb, Cu, and Zn; the Cr and Co pollution is small; and Ni and V are almost not affected by human activities. The results of the risk assessment indicate that Cd poses serious ecological and health risks, Pb and Cu pose serious ecological risks, and Cr poses a serious cancer risk.

Key words: smelter; heavy metal contamination; farmland soil; spatial distribution; risk assessment

近年来,随着人口增长、工业生产规模的不断扩大,对土地造成了严重的重金属污染。由于重金属污染的隐蔽性、长期性和不可逆性,且不能被微生物降解^[1],因此,土壤系统中的重金属污染问题一直是国际上的难点和热点研究课题^[2~4]。重金属可通过多种渠道进入土壤环境,如矿产资源的开采及冶炼过程、汽车尾气排放、化石燃料的燃烧、垃圾堆存产生的渗滤液等,其中以矿产资源冶炼过程造成的影响最为严重,特别是有色金属冶炼^[5~7]。有色金属冶炼过程会产生大量富含重金属的细小微

粒,随着烟尘排放到大气中,然后通过降雨或自由沉降进入土壤;同时冶炼过程还会产生大量富含重金属的冶炼废渣和废水,废渣废水的不恰当处置也会造成冶炼厂周边土壤的重金属污染^[8,9]。土壤一

收稿日期: 2018-03-06; 修订日期: 2018-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51704093, 41430637); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(16IRTSTHN012); 河南大学新兴交叉与特色学科培育项目(XXJC20140004)

作者简介: 王洋洋(1986~),男,博士研究生,讲师,主要研究方向为环境微生物学及土壤污染修复, E-mail: wangyangyangxyz@163.com

* 通信作者, E-mail: 0412420xx@163.com

且遭受重金属污染就很难恢复,且重金属在土壤中会不断地富集,使得冶炼厂周边土壤中重金属含量远远高于其背景含量,并通过食物链对人体健康造成危害^[10~12].因此,研究铅锌冶炼厂周边土壤中重金属的空间分布、污染状况及风险评价,对铅锌冶炼厂周边土地的安全利用、保障周边居民健康生活具有重要意义.

近年来,国内外有很多针对冶炼厂周边土壤环境影响的报道.Šajin等^[10]对科索沃地区某铅锌冶炼企业周边土壤进行了研究,覆盖范围约为301.3 km²,结果显示土壤中Pb、Cd、Sb、As、Cu、Ag、Zn、Hg等多种重金属及类金属在研究区域内含量为欧洲平均值的数倍,且其含量升高主要是受铅锌冶炼的影响.相关的研究在国内也有报道,余娟娟等^[13]对某铅锌冶炼厂周边土壤中6种重金属的含量分布、空间结构及分布特征进行了研究,结果显示冶炼厂周边土壤中重金属污染程度不同,且冶炼厂是周边土壤中重金属污染的主要贡献者.刘勇等^[14]对关中西部某铅锌冶炼厂周边农田进行了研究,发现地势低的土壤中重金属含量明显较高,重金属在垂直分布上主要富集在0~20 cm的表层土壤中,且随着深度的进一步增加,土壤中重金属含量变化幅度减弱,基本趋于稳定;并且土壤中Cd、Pb及Hg对周边环境具有严重的潜在生态危害.但是,针对河南省冶炼企业对周边农田土壤污染状况的研究还鲜有报道.由于河

南省是我国粮食主产区,因此针对河南省冶炼企业周边农田土壤中重金属污染空间分布及相关风险评估非常必要,对维持周边居民健康及国家粮食安全战略具有重要意义.

本文以焦作某已关闭的铅锌冶炼企业周边农田表层土壤为研究对象,分析不同重金属的空间分布规律;利用富集因子法及潜在生态风险指数对周边农田土壤中重金属的污染特征及生态风险进行分析评价;利用健康风险评价模型,分析铅锌冶炼厂对周边人群潜在的健康危害,以期为该区域土壤重金属污染防治及土地合理利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与采样点的布设

依据实际调研情况,选取焦作市某铅锌冶炼厂对其周围4 km范围内表层土壤进行采集,采样点主要集中在农田,个别为林地.采样时利用GPS精确记录每个采样点对应的坐标,观察并对其周边环境进行记录.

以该冶炼厂为中心,以卫星影像为基础,在其周边采用网格布点,在四周2 km范围内每隔0.5 km布设采样点,在2~4 km范围内每隔1 km布设采样点.依据《土壤环境检测技术规范》(HJ/T 166-2004)采集农田土壤表层(0~20 cm)样品,每个采样点采集5个土壤样品,现场混合并利用四分法选取约1 kg的土壤样品,实际采样点见图1.

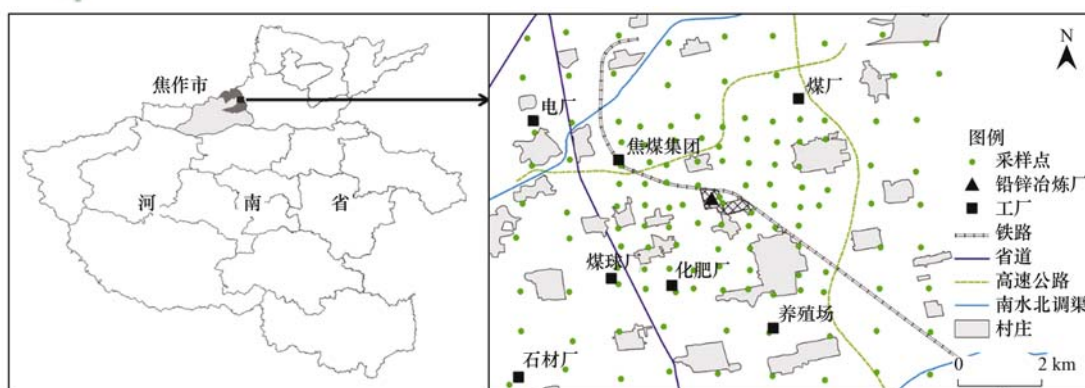


图1 采样点位置及样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

1.2 土壤样品的处理

土壤样品置于阴凉处自然风干,混匀后选取约0.5 kg土壤样品进行研磨处理,依次全部通过18、60和100目尼龙筛,置于自封袋中保存备用.称取100目土壤样品0.1 g(精确至0.0001 g)置于消解管中,用石墨消解仪(ST-60)进行消解.消解过程如下^[15]:加入5 mL硝酸,升温至160℃,加热1 h;加入2.5 mL HClO₄,180℃下加热1 h;再加入1 mL

HF,180℃下加热1 h;最后加入1 mL混合液(硝酸和超纯水以1:1体积比配制),180℃下加热2 h,室温下冷却30 min.将消解完成的样品置于100 mL容量瓶,定容并混匀后过滤到聚乙烯瓶中,并利用电感耦合等离子体光谱仪ICP-AES(ICAP 6200, USA Thermofisher)测定重金属(Cu、Zn、Pb、Cr、V)含量,利用电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS(X2, USA Thermofisher)测定Co、Ni、Cd含量.在所有样

品试验过程中,采用平行试验、国家标准土壤样品(ESS-2)回收试验进行质量控制.平行试验相对误差在 1.27% ~ 10.52% 之间,标准样品回收率在 91.6% ~ 108.2% 之间.

1.3 重金属污染评价方法

目前重金属污染的评价方法有很多^[16].主要有指数法,模型指数法,人体健康风险评价法以及基于 ArcGIS 的地统计学评价方法等.其中,基于 ArcGIS 的元素空间分布越来越广泛地应用于重金属污染评价中^[10, 17~19].本文选用富集因子法^[20](能够较好地判断人为污染)、潜在生态风险评价法以及人体健康风险评价模型对研究区域重金属污染状况及风险进行分析.

1.3.1 富集因子法

富集因子的计算公式为:

$$EF = \frac{(C_n/C_{ref})_{\text{实测}}}{(B_n/B_{ref})_{\text{背景}}}$$

式中, C_n 表示待测元素的测试含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_{ref} 表示参比元素的测试含量; B_n 表示待测元素的背景含量; B_{ref} 表示参比元素的背景含量.在此运用 Sutherland 提出的分类方法^[21],将污染元素按不同等级划分.经测定所选土样 pH 在 8.06 ~ 9.32 之间,为弱碱性土.铁在碱性土中不易迁移,化学性质较稳定,所以选用 Fe 作为参比元素^[22].

1.3.2 潜在生态风险评价

计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_r^i) \\ = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_r^i}{C_n^i} \right)$$

式中, RI 表示多元素潜在生态风险综合指数; E_r^i 表示重金属元素 i 的单项潜在生态风险指数; T_r^i 表示重金属元素 i 的毒性响应系数; C_r^i 表示元素 i 的污染系数; C^i 表示元素 i 的实际测量含量; C_n^i 为参照值,采用焦作市所属的河南省的土壤元素背景值. T_r^i 取值如下: $T_r^{\text{Ti}} = T_r^{\text{Mn}} = T_r^{\text{Zn}} = 1$, $T_r^{\text{V}} = T_r^{\text{Cr}} = 2$, $T_r^{\text{Cu}} = T_r^{\text{Ni}} = T_r^{\text{Co}} = T_r^{\text{Pb}} = 5$, $T_r^{\text{Cd}} = 30$ ^[23].

1.3.3 健康风险评价

重金属进入人体的途径主要有 3 种:由口摄入、皮肤接触以及呼吸摄入.3 种暴露途径下重金属日均暴露量计算公式如下.

由口摄入:

$$ADD_{\text{ing}} = \frac{c \cdot \text{IngR} \cdot CF \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$$

呼吸接触:

$$ADD_{\text{inh}} = \frac{c \cdot \text{InhR} \cdot EF \cdot ED}{PEF \cdot BW \cdot AT}$$

皮肤摄入:

$$ADD_{\text{derm}} = \frac{c \cdot SA \cdot CF \cdot SL \cdot ABS \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}$$

非致癌总风险:

$$HI = \sum HQ = \sum \frac{ADD}{RfD}$$

单途径的致癌风险:

$$RISK = ADD \times SF$$

式中, RfD 表示非致癌参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], SF 为致癌风险的斜率系数 [$(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$].

HI 与 1 相比,等于或小于 1 时可认为风险较小或可忽略风险,大于 1 则表示存在非致癌风险,数值越大,则表示风险越大.对个体的总风险则为所有途径的风险总和.各符号以及参数取值^[24~26]如表 1 所示.

表 1 重金属日均暴露量参数及取值

Table 1 Parameters of average daily dose calculation models for heavy metals

参数	表征意义	单位	取值
C	重金属含量均值	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	实测值均值
IngR	经口摄入土壤频率	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	100
InhR	呼吸频率	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	12.85
EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	350
ED	暴露年限	a	30
BW	平均体重	kg	55.9
AT	平均暴露时间	d	30 × 365 (非致癌物) 70 × 365 (致癌物)
PEF	灰尘排放因子	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.36×10^9
SA	暴露皮肤表面积	$\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$	5 000
SL	皮肤黏着度	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	1
ABS	皮肤吸收因子	—	0.001
CF	转换系数	$\text{kg} \cdot \text{mg}^{-1}$	10^{-6}

2 结果与讨论

2.1 冶炼厂周边重金属含量水平

冶炼厂周边土壤重金属含量见表 2.从中可知, Cd 是唯一最小值超过河南省土壤元素背景值^[27]的元素,且其含量均值超过了国家二级土壤环境质量标准^[28],甚至超过了三级标准(三级标准值为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),表明冶炼厂周围土壤中的 Cd 污染严重,可能会危及农业生产及人体健康. Cd、Pb、Cr、Zn 这 4 种元素均值均超过背景值,分别达到背景值的 23.0、2.2、1.5 及 1.1 倍, Cd 与标准值相比超标率高达 94.57%.除 Ni 外,其他 4 种元素均存在不同程度的污染.由变异系数可知,元素变异程度之间存在较大差异,为 $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cr}$,其中 Cd、Pb 变异程度最大,超过 100%,属于强变

异;其中 Cu 和 Ni 的变异系数较高,超过 40%,属于中等变异程度;而其他元素 Zn、Cr、Co 和 V 的变

异系数在 30% 左右,变异程度较低,高于 10% 也属于中等程度变异^[29]。

表 2 铅锌冶炼厂周边土壤重金属含量描述性统计

Table 2 Statistical analysis of heavy metals in the soil around the lead and zinc smelter

元素	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	均值 /mg·kg ⁻¹	标准差	变异系数 /%	背景值 ^[27] /mg·kg ⁻¹	土壤环境质量标准值 ¹⁾ /mg·kg ⁻¹
Cd	0.32	12.49	1.70	1.72	101.18	0.07	0.60
Cu	4.92	60.95	15.98	7.90	49.48	19.70	100
Pb	9.33	367.92	42.33	46.18	109.10	19.60	350
Cr	42.02	175.95	99.75	24.40	24.46	63.80	250
Zn	23.29	170.88	67.77	22.50	33.20	60.10	300
Ni	0.25	20.90	9.12	4.15	45.51	26.70	60
V	8.57	92.60	45.37	16.24	35.79	58.40	—
Co	7.06	27.32	15.86	3.96	24.97	9.90	—

1) 数值表示 GB 15618-1995《土壤环境质量标准》二级标准(pH>7.5);“—”表示无相应的标准值

2.2 土壤重金属的空间分布

运用普通克里金插值法对元素的空间分布进行研究,由于各重金属元素之间含量差异较大,为了直观地体现元素的空间分布情况,对不同元素采用不同的分级标准.重金属空间分布规律如图 2 所示.

由图 2 可将重金属的空间分布分为 3 大类:① Pb、Cd 及 Zn 这 3 种元素的含量以冶炼厂为中心向四周逐渐下降,变化趋势非常明显,冶炼厂附近和研究区外围相比 Pb、Cd 及 Zn 含量呈现出明显的差异性.参照国家土壤环境质量二级标准,Cd 含量超标范围覆盖整个研究区,远高于当地土壤背景值 0.07 mg·kg⁻¹,而 Pb、Zn 在冶炼厂周围 1 km 范围内含量超出国家标准值.在研究区内 Cd、Pb 严重累积,Zn 在冶炼厂周围一定范围内累积.据调查,当地未用工厂的污水进行灌溉,也无冶炼废渣无规则堆放的历史,由此可以认为,Pb、Cd 及 Zn 含量极大程度上受冶炼厂影响,主要来自冶炼厂烟尘的无组织排放,经大气扩散在冶炼厂附近沉降,随着距离越远土壤中重金属的含量越低,Pb、Cd 其分布呈现东北-西南的椭圆形分布,这与当地的主导风向为西南风有关;② V、Ni、Cr、Co 分布相似,呈明显的西北-东南方向的带状分布,且存在高值中心,这个与此区域的省道(S233)有关,该省道南北横贯研究区(图 1),公路两侧周边散布多家工厂,

如化肥厂、煤球厂等,离省道较近的采样点重金属元素含量偏高,其中 V、Ni 元素含量均未超过国家标准,Cr、Co 则在省道(S233)周围出现了较大范围的高值区,研究区内离省道较远的东北方向重金属元素含量较低,说明这 4 种元素受小型工厂的影响较大,几乎不受冶炼厂的影响;③ Cu 含量较高区域主要集中在研究区域的东南部,且含量较高区域与当地一养殖场所在位置完全吻合,由此推断,研究区域内 Cu 的污染主要来源于养殖场,而冶炼厂的存在对 Cu 的污染影响相对较小.据报道,我国市售猪饲料 Cu 含量平均已经达到 200 ~ 300 mg·kg⁻¹^[30],而该养殖场的养殖废水大多被用于污水灌溉,动物粪便被用作有机肥施入农田,这是造成养殖场周边土壤中 Cu 含量偏高的主要原因.

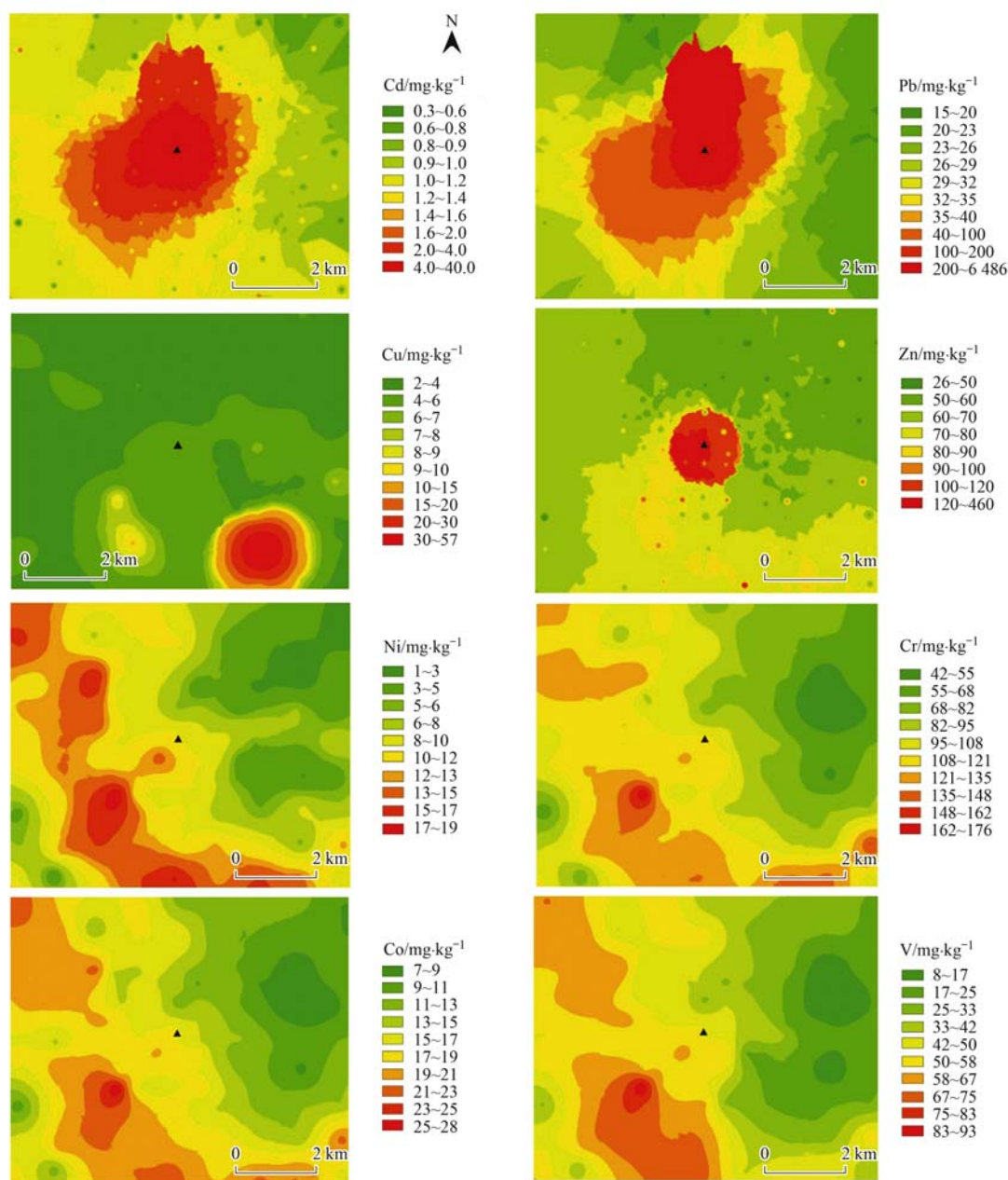
2.3 富集因子分析

以河南省 A 层土壤元素背景值为参比值,以 Fe 为参比元素,对所有土壤样品的 8 种元素的富集因子(EF)进行计算,计算得出 Ni、V 两种元素的 EF<1 的比例为 100%,其余 6 种元素按污染程度的不同进行分类(表 3).由统计可知^[31, 32],Cu、Zn 属轻微污染,Cd、Pb 污染较严重,Cd 显著污染及其以上的比例达到了 100%,Pb 无污染比例仅占 11.6%.由此分析,冶炼厂对周边环境造成严重的重金属污染,其中 Cd 受冶炼厂影响最为显著,其次为 Pb,而 Ni、V 几乎不受影响.此外,该冶炼

表 3 有明显污染元素所占污染程度百分比

Table 3 Percentage of pollution degree of pollution elements

EF	污染程度	元素在各种污染程度所占比例/%					
		Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	Co
≤1	无污染	0.0	73.6	11.6	32.6	99.2	99.2
1~2	轻微污染	0	21.7	48.1	58.1	0.8	0.8
2~5	中度污染	0	3.9	32.6	9.3	0	0
5~20	显著污染	56.6	0	6.2	0	0	0
20~40	强烈污染	31.8	0.8	0.8	0	0	0
>40	极强污染	11.6	0	0.8	0	0	0



图中“▲”符号表示冶炼厂

图2 铅锌冶炼厂周围土壤重金属的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in the soil around the lead and zinc smelter

厂已于2004年停止生产,但是其造成的污染在十几年后依然存在并且非常严重,进一步说明冶炼厂对周边土壤环境的危害。

2.4 潜在生态风险评价

以河南省土壤A层土壤元素背景值为参比,得到8种重金属元素的单项潜在生态风险指数。按照徐争启等^[23]对潜在生态风险指数的分级情况,对元素进行风险等级划分,并计算各元素占各风险等级的比例。详细的风险等级情况见表4。各元素的潜在生态风险按均值大小排序为: Cd (778.4) >> Pb (40.0) > Co (7.9) > Cu (4.7) > Cr (3.1) > Ni (1.7) > Zn (1.1) > V (0.5), 其中Cd的平均潜在生态风

险指数远远超过了分级指数的最大值,这一方面与Cd的毒性响应系数较大有关,另一方面也说明研究区域内土壤样品Cd浓度普遍较高,其次潜在生态风险较大的为Pb。由表5可以看出,在所有土壤样品中,Cd有82.94%的采样点存在极强的环境风险,轻微环境风险仅为0.8%。由RI(多元综合潜在生态风险指数)来看,该地区存在较严重的生态风险。

由图3可看出,综合潜在生态风险指数分布与Cd、Pb的含量空间分布特征基本相似,这是由于Cd存在极严重的潜在生态风险,Pb次之,其他金属潜在生态风险很小。冶炼厂周围约2 km范围内

表 4 潜在生态风险指数分级标准

Table 4 Classification standard for the potential ecological risk index					
环境风险程度	轻微	中等	强	很强	极强
E_r^i	≤ 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	> 320
RI	≤ 150	150 ~ 300	300 ~ 600	> 600	—

表 5 各风险等级所占频率/%

Table 5 Frequency of each risk level/%					
环境风险程度	轻微	中等	强	很强	极强
Cd	0	0	0.78	16.28	82.94
Co	100	0	0	0	0
Cr	100	0	0	0	0
Cu	99.2	0	0.8	0	0
Ni	100	0	0	0	0
Pb	96.1	1.5	0.8	0.8	0.8
V	100	0	0	0	0
Zn	100	0	0	0	0
RI	0.8	10.1	52.7	36.4	

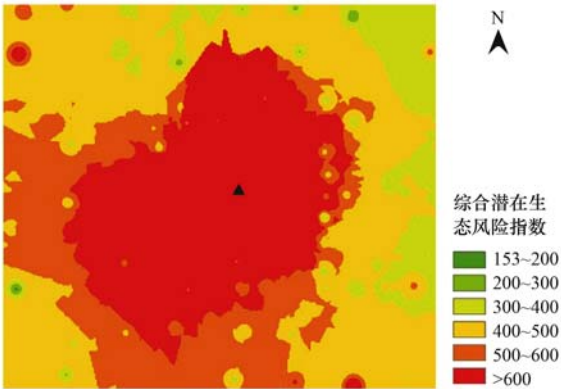


图 3 综合潜在生态风险指数空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of the potential ecological risk index

存在极强的潜在生态风险, 2 ~ 4 km 范围内为强潜在生态风险.

2.5 健康风险评价

利用健康风险评价模型及参数, 得出以下 6 种对人体健康危害较大的重金属在 3 种暴露途径下的健康风险值(表 6). 分析结果表明, 6 种重金属除 Cd 之外的非致癌总风险均小于 1, 表明 Cd 存在非致癌健康风险, 其余重金属不会造成明显的非致癌风险. 呼吸途径致癌风险最小, Cd、Cr 两种元素非致癌风险大小为皮肤接触途径 > 由口摄入途径, 其余 4 中元素均为由口摄入途径 > 皮肤接触途径. 非致癌总风险为 Cd > Pb > Cr > Cu > Ni > Zn, 致癌风

表 6 非致癌风险指数与致癌风险值

Table 6 Indexes for the carcinogenic and non-carcinogenic risks					
重金属元素	HQ _{ing}	HQ _{inh}	HQ _{derm}	HI	Risk
Zn	6.36×10^{-6}	6.01×10^{-10}	1.59×10^{-6}	7.95×10^{-6}	—
Pb	5.29×10^{-3}	4.97×10^{-7}	1.76×10^{-3}	7.06×10^{-3}	—
Cu	2.03×10^{-4}	1.82×10^{-8}	3.38×10^{-5}	2.37×10^{-4}	—
Ni	6.28×10^{-5}	5.76×10^{-9}	1.16×10^{-6}	6.39×10^{-5}	4.84×10^{-9}
Cr	7.65×10^{-4}	7.59×10^{-6}	1.91×10^{-3}	2.69×10^{-3}	3.19×10^{-4}
Cd	0.48	4.54×10^{-5}	2.40	2.88	2.91×10^{-4}

险大小为 Cr > Cd >> Ni. 人体可接受癌症风险最大值为 10^{-4} ^[19], 而 Cr、Cd 两种致癌金属致癌风险均大于该值, 表明存在较严重的致癌风险, 威胁人体健康; Ni 致癌风险远小于该阈值, 不会对人体健康造成威胁.

3 结论

(1) Pb、Cd、Zn 这 3 种元素含量极大程度上受冶炼厂影响, 在研究区域内 Cd 严重污染, Cd 的超标率达到 94.57%. 冶炼厂西部重金属含量受到石

材厂、煤球厂、化肥厂、焦煤集团的影响.

(2) Co、Cr、Cu、Zn 属轻微污染; Cd、Pb 污染较严重, 受人类活动影响显著, Cd 显著污染及其以上的比例达到了 100%, Pb 污染比例为 88.38%, 而 Ni、V 几乎不受人类活动影响.

(3) 本研究区总体存在强潜在生态风险. Cd 存在极强的潜在生态风险, 存在致癌风险和严重的非致癌风险, Cr 存在较严重的致癌风险.

参考文献:

[1] Peng J F, Song Y H, Yuan P, et al. The remediation of heavy

- metals contaminated sediment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 633-640.
- [2] Järup L. Hazards of heavy metal contamination [J]. *British Medical Bulletin*, 2003, **68**(1): 167-182.
- [3] Luo C L, Liu C P, Wang Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, South China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(1): 481-490.
- [4] Zhuang P, Zou B, Li N Y, *et al.* Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China; implication for human health [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31**(6): 707-715.
- [5] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, *et al.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **174**(1-3): 455-462.
- [6] 李崇, 李法云, 张营, 等. 沈阳市街道灰尘中重金属的空间分布特征研究[J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 560-564.
- Li C, Li F Y, Zhang Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of heavy metals in street dust in Shenyang city [J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(2): 560-564.
- [7] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(4): 542-551.
- [8] 杜平. 铅锌冶炼厂周边土壤中重金属污染的空间分布及其形态研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2007.
- Du P. Distribution of heavy metals and their chemical speciation in soils around a Pb-Zn smelter [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2007.
- [9] 王利军, 卢新卫, 荆淇, 等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(2): 325-330.
- Wang L J, Lu X W, Jing Q, *et al.* Heavy metals pollution in soil around the lead-zinc smelting plant in Changqing Town of Baoji City, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(2): 325-330.
- [10] Šajn R, Aliu M, Stafilov T, *et al.* Heavy metal contamination of topsoil around a lead and zinc smelter in Kosovska Mitrovica/ Mitrovic?, Kosovo/Kosov? [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, **134**: 1-16.
- [11] 袁艺宁, 杨志辉, 柴立元, 等. 铅锌冶炼厂渣堆场周边土壤铅污染特征[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(2): 307-311.
- Yuan Y N, Yang Z H, Chai L Y, *et al.* The Characteristics of lead pollution in the soil around the slag yard in lead and zinc smeltery [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(2): 307-311.
- [12] 徐玉霞, 薛雷, 汪志华, 等. 关中西部某铅锌冶炼区周边耕地土壤重金属污染特征及评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, **32**(2): 251-256.
- Xu Y X, Xue L, Wang Z H, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals in farmland soil around a lead-zinc smelting plant in western Guanzhong Plain [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, **32**(2): 251-256.
- [13] 余娟娟, 赵世君, 杨柳, 等. 铅锌冶炼厂周边土壤重金属的空间分布特征研究[J]. *江西农业学报*, 2014, **26**(6): 110-113.
- She J J, Zhao S J, Yang L, *et al.* Research on spatial distribution characteristics of soil heavy metal near lead and zinc smelting plant [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, **26**(6): 110-113.
- [14] 刘勇, 王成军, 刘华, 等. 铅锌冶炼厂周边重金属的空间分布及生态风险评价[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(1): 477-484.
- Liu Y, Wang C J, Liu H, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil around a lead and zinc smelter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(1): 477-484.
- [15] 龙加洪, 谭菊, 吴银菊, 等. 土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(1): 123-126.
- Long J H, Tan J, Wu Y J, *et al.* A comparative study on the detection of heavy metal in soil with different digestion methods [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(1): 123-126.
- [16] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. *生态学报*, 2011, **30**(5): 889-896.
- Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, *et al.* Evaluation methods for soil heavy metals contamination: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(5): 889-896.
- [17] 廖晓勇, 陈同斌, 武斌, 等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. *地理研究*, 2006, **25**(5): 843-852.
- Liao X Y, Chen T B, Wu B, *et al.* Mining urban soil pollution: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of Jinchang, China [J]. *Geographical Research*, 2006, **25**(5): 843-852.
- [18] Stafilov T, Šajn R, Pančevski Z, *et al.* Heavy metal contamination of topsoils around a lead and zinc smelter in the Republic of Macedonia [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1-3): 896-914.
- [19] 陈志凡, 范礼东, 陈云增, 等. 城乡交错区农田土壤重金属总量及形态空间分布特征与源分析——以河南省某市东郊城乡交错区为例[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(4): 1317-1327.
- Chen Z F, Fan L D, Chen Y Z, *et al.* Spatial distribution and source analysis of heavy metals in agricultural soils in a Peri-urban area based on IDW interpolation and chemical fractions: a case study in Henan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(4): 1317-1327.
- [20] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 攀枝花工矿区土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(1): 13-16.
- Teng Y G, Tuo X G, Ni S J, *et al.* Application of an enrichment factor in determining anthropogenical pollution of heavy metal in topsoil [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, **11**(1): 13-16.
- [21] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(6): 611-627.
- [22] 李娟娟, 马金涛, 楚秀娟, 等. 应用地累积指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. *中国安全科学学报*, 2006, **16**(12): 135-139.
- Li J J, Ma J T, Chu X J, *et al.* Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in safety assessment of heavy-metal contamination in soil of copper refining [J]. *China Safety Science Journal*, 2006, **16**(12): 135-139.
- [23] 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.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [24] 朱朝云, 王铁宇, 徐笠, 等. 农药企业场地土壤重金属污染

- 状况及风险评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, **23**(4): 67-72.
- Zhu Z Y, Wang T Y, Xu L, *et al.* Contamination and risk assessment of heavy metals in soils from pesticide factory[J]. China Population, Resources and Environment, 2013, **23**(4): 67-72.
- [25] Yuswir N S, Praveena S M, Aris A Z, *et al.* Health risk assessment of heavy metal in urban surface soil (Klang District, Malaysia) [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, **95**(1): 80-89.
- [26] 王兰化, 李明明, 张莺, 等. 华北地区某蔬菜基地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 地球学报, 2014, **35**(2): 191-196.
- Wang L H, Li M M, Zhang Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of a vegetable base in North China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, **35**(2): 191-196.
- [27] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [28] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [29] Zhang X Y, Lin F F, Wong M T F, *et al.* Identification of soil heavy metal sources from anthropogenic activities and pollution assessment of Fuyang County, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **154**(1-4): 439-449.
- [30] 王秋丽. 畜禽养殖导致土壤重金属污染现状及对策[J]. 现代农业科技, 2016, (11): 245, 247.
- Wang Q L. Status and countermeasures on soil heavy metal pollution of livestock [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016, (11): 245, 247.
- [31] Kaushik A, Kansal A, Santosh, *et al.* Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India; assessment by metal enrichment factor of the sediments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **164**(1): 265-270.
- [32] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 176-186.



CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Maifanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)