

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WSON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, 陈苇, 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)		

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^{1,2}, 王美娥^{1*}, 陈卫平¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 我国西部干旱半干旱地区为生态脆弱区, 近年来西部工矿业发展引起的土壤污染问题越来越受到关注. 本文通过空间布点采样, 采用多元统计分析、GIS 技术以及地积累指数评估等手段, 对新疆某矿冶场区周围土壤的 9 种重金属污染特征进行了调查. 结果表明, Cu 和 As 元素为研究区域的主要重金属污染物; 重金属 Cr、Zn、Ni 和 Cd 累积程度较轻、受人为干扰小; Co 和 Pb 元素在少数样点存在人为干扰累积的现象, 但程度也较轻; 土壤中 Mn 没有明显累积和人为干扰. 因子分析结果发现 9 种重金属主要存在 2 种来源, As、Cu、Ni、Cr、Zn、Cd 和 Co 主要来源于第 1 种源; 元素 Mn 和 Pb 主要来源于第 2 种源. 从重金属空间分布特征可知, As、Cu、Ni、Cr、Zn、Pb、Cd 和 Co 的最高含量样点都分布在尾砂库附近区域, 因此对尾砂库进行封闭处理是减少重金属污染物向周围环境扩散的重要措施. 此外, 本研究还发现基于大气污染分析的 PCA/APCS 受体模型不适用于本案例中定量分析土壤重金属来源.

关键词: 生态脆弱区; 空间分布; 地积累指数; 尾砂库; 受体模型

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0445-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201804214

Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang

YANG Wei-guang^{1,2}, WANG Mei-e^{1*}, CHEN Wei-ping¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Arid and semi-arid regions in West China are ecologically fragile zones. Increasing attention has been focused on soil pollution triggered by mining and smelting in those areas. Nine heavy metals in the soil around a mining and smelting plant in Xinjiang were investigated using multivariate analysis, the geoaccumulation index, and GIS techniques. The heavy metals Cu and As were identified as the main pollutants in the study area. The accumulation of the heavy metals Cr, Zn, Ni, and Cd is small and weakly disturbed by human activity. Anthropogenic accumulation of Co and Pb was observed at a few sampling sites; its degree was also small. Anthropogenic accumulation of Mn in soil was not apparent. The factor analysis indicates two sources for the nine heavy metals in the soils. Source 1 includes As, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd, and Co, while Source 2 includes Mn and Pb. The spatial distribution suggests that the sites with the highest As, Cu, Ni, Cr, Zn, Pb, Cd, and Co concentrations are in areas close to the tailing dump. The sealing tailing dump is the prior way to prevent the spread of heavy metals. The results also reveal that the PCA/APCS receptor model is not applicable for the quantification of the contribution of heavy metals in soils in this case.

Key words: ecologically fragile zone; spatial distribution; geoaccumulation index; tailing dump; receptor model

工矿业排放是土壤重金属污染的重要来源^[1~3]. 近年来我国西部干旱地区由于工矿业发展引起的土壤重金属污染问题受到了广泛关注^[4~6]. 西部干旱区由于常年风速较大, 并且降雨量较少, 工矿业排放的重金属主要以大气颗粒物为介质通过干湿沉降的途径扩散, 譬如, 徐玉霞等^[7]对关中西部某铅锌冶炼区土壤重金属污染特征的调查研究结果发现, 下风向 0~200 m 范围内土壤重金属含量急剧下降; 新疆红沙泉露天煤矿区煤矸石堆场下风向 350 m 处土壤 Pb 和 Hg 含量最高^[8]; 蒲瑞丰等^[9]对石羊河流域典型工业区调查的结果也发现, 土壤重金属污染物 Ni、Co 和 Cu 含量以冶炼厂为中心呈扇形分布, 下风向含量大, 背风向含量小. 此外, 尾矿库和废渣堆周围 50 m 范围内土壤重金属含量

一般不受风向影响, 对内蒙古包头尾矿库区土壤重金属污染调查结果发现, 尾矿区各个方位土壤受重金属污染最严重为距离尾矿库边缘 50 m 范围内的区域^[10].

土壤重金属污染物识别、来源分析以及污染程度评估是土壤污染物调查分析的重要内容. 土壤重金属污染识别和来源分析的主要方法包括多元统计分析方法、空间分布分析法、统计数据频率分布法等. 王幼奇等^[11]通过数理统计和地统计学方法评价了银川市不同功能区土壤重金属 Zn、Cd 等污

收稿日期: 2018-04-26; 修订日期: 2018-07-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0503005)

作者简介: 杨伟光(1988~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤污染与生态风险评估, E-mail: wei_guangyang@sina.com

* 通信作者, E-mail: mewang@rcees.ac.cn

染现状及其来源. 刘亚纳等^[12]通过主成分分析法研究了河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染的成因和来源. 郭彦海等^[13]利用 Pearson 相关性分析和空间插值法等对上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属来源进行了解析. 主成分/绝对主成分受体模型(PCA/APCS)于 20 世纪 80 年代由 Thurston 等^[14]提出, 是定量分析大气污染物来源及每个来源的贡献率的一种方法. 该方法随后被一些学者用于土壤重金属污染来源及贡献率的定量研究. 譬如, 瞿明凯等^[15]采用该模型分析了武汉市东湖高新技术开发区土壤重金属 Cd 的主要来源为电子工业源、大气沉降源以及成土母质源, 并获得相应的贡献率; 陈秀端等^[16]也采用该模型分析了西安城市居民区土壤中 10 种重金属的来源及贡献率, 并指出采用该方法能够明晰城市土壤中重金属累积贡献率最高的人类活动. 20 世纪 60 年代由 Muller^[17]提出的地积累指数法是定量评价沉积物中重金属污染程度的重要指标, 该方法通过土壤重金属实测值与地质背景值的比较获得地积累指数, 通过与指数等级比较来评价土壤重金属污染程度. 由于地积累指数法较简单, 数据容易获得, 目前该方法已经广泛应用于土壤重金属污染程度的初步评估中.

相对于东部沿海经济发达地区, 对西部地区经济发展所产生的环境危害的关注度相对较弱. 然而, 西部干旱地区生态系统结构单一, 稳定性低, 是典型的生态脆弱区, 其特征之一为系统抗干扰能力弱, 因此, 西部地区土壤重金属污染容易对当地生态系统造成不可逆转的危害^[18-20]. 新疆克拉玛依地区蕴藏着丰富的矿产资源, 资源开发不可避免地会对地表环境产生危害, 本文以新疆克拉玛依某矿冶场区周边土壤为研究对象, 通过布点采样, 调查分析该矿冶场的长期生产活动对周边环境的污染情况, 调查研究结果对保护该地区生态环境、保证农产品和畜牧业安全及人群健康十分重要.

1 材料与方法

1.1 样点分布和土壤采集

研究区域位于克拉玛依市西 60 km 处 (84.441 7°E, 45.399 8°N), 属于温带大陆性半干旱气候, 林地较少, 草地居多, 土壤以碱性砂质土为主, pH 值在 7.7~8.9 之间. 矿冶场面积约为 0.5 km². 在场区四周布置土壤样品的采集点, 具体布点方式如图 1 所示, 以矿冶场区为中心, 除西边外, 在东、南、北这 3 个方向分别布置两层样点, 每个方向每层 5 个样点, 分别为 E1~E10、S1~S10、N1~N10, 第一层样点距离场区 50 m 左右,

两层之间相隔 50~100 m; 西边由于与采矿区相连, 属于场区内部, 因此只布置 4 个采样点, 分别为 W1~W4, 总计 34 个采样点. 土壤样品采集采用 10 m×10 m 矩形 5 点混合采样法, 采集表层 0~10 cm 土壤样品.

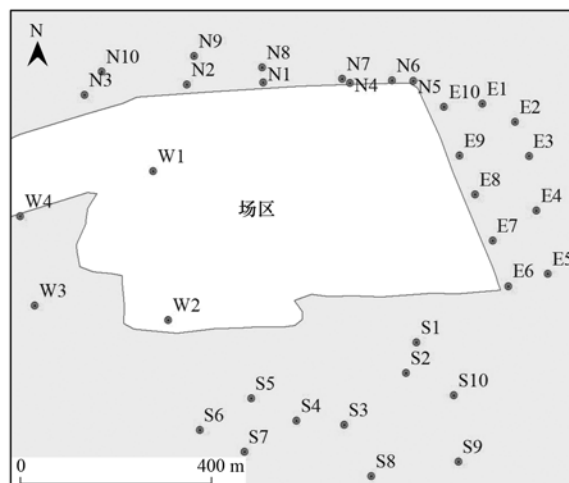


图 1 采样点空间分布示意

Fig. 1 Soil sampling map

1.2 土壤样品处理与分析方法

土壤样品于室内自然风干后, 除去土样中石子、树枝等, 磨碎后过 2 mm 尼龙筛, 再取过筛后的部分土用玛瑙研钵研磨, 并过 100 目尼龙筛.

采用四酸法电热板加热法消解分析土壤重金属, 称取 0.25 g 土壤样品 (过 100 目筛) 于聚四氟乙烯坩锅中, 滴入少量超纯水润湿, 加入 10 mL HCl 于通风橱中静置过夜; 分别加入 HF 和 HNO₃ 各 3 mL、HClO₄ 1 mL, 放置电热板上消解至大量白烟冒出, 蒸至近干, 重复加入氢氟酸和 HNO₃ 1~2 次, 直至样品呈晶体状, 冷却后加入 HCl 溶液 (1:1) 1~2 滴, 以 5% 的 HNO₃ 溶液定容至 50 mL^[21]. 采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS, NexION 300x, PerkinElmer, USA) 测定 Zn、Cr、Ni、Co、Cd 和 Pb 的含量, 采用电感耦合等离子体光谱 (ICP-OES, Prodigy7, Leemanlabs, USA) 测定 As、Mn、Cu 的含量. 每批样设置 3 个空白对照和标准物质, 以及 10% 样品的重复, 采用 GSS-18 (国家土壤标准物质) 作为质量控制. 样品回收率除了 Pb 为 76%, 其余重金属的回收率在 84%~120% 之间.

采用水土比 2.5:1 分析土壤 pH 值, 称取风干土样 8.00 g (过 2 mm 筛, 精确至 0.01), 放入 50 mL 康宁离心管中, 并加入无 CO₂ 蒸馏水 20 mL, 用玻璃棒迅速搅拌 1~2 min, 放置 30 min 后用 Seven Easy pH 仪测定 (S20K, Mettler, Switzerland).

1.3 地积累指数计算

地积累指数计算公式^[17]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 (C_n / 1.5 B_n) \quad (1)$$

式中, C_n 为土壤重金属含量; B_n 为地质背景值; 1.5 为修正系数。

根据 Forstner 等^[22] 对重金属污染级别的划分标准来进行土壤重金属污染程度的确定及其分级 (表 1)。

表 1 地积累指数分级

Table 1 Geoaccumulation index grades

项目	无污染	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染	极严重污染
I_{geo}	≤ 0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	≥ 5

1.4 主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型

PCA/APCS 受体模型计算步骤如下^[14,15]。

对土壤重金属含量做标准化处理, 即采用 PCA 分析得到归一化的因子分数:

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

式中, Z_{ij} 为土壤重金属标准化后的含量 (无纲量); C_{ij} 为土壤重金属含量; $\bar{C}_i$ 为土壤重金属含量的平均值; σ_i 为标准偏差。

对所分析的每种重金属元素引入一个含量为 0 的人为样本, 并计算该样本的因子分数:

$$(Z_0)_i = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} = -\frac{\bar{C}_i}{\sigma_i} \quad (3)$$

每个土壤重金属的样本的因子分数和 0 含量样本的因子分数的差为每个重金属元素的 APCS; 再用 APCS 与重金属含量进行多元线性回归, 得到的回归系数和常数项可将 APCS 转化为每个污染源对每个重金属样本的含量贡献:

$$C_i = b_{0i} + \sum_{p=1}^n (\text{APCS}_p \times b_{pi}) \quad (4)$$

式中, b_{0i} 为做多元线性回归得到的常数项; b_{pi} 为回归系数; APCS_p 为调整后的因子 p 的分数; $\text{APCS}_p \times b_{pi}$ 表示源 p 对 C_i 的含量贡献; 所有样本的 $\text{APCS}_p \times b_{pi}$ 平均值则为源平均绝对贡献量。

1.5 数据处理

土壤重金属原始数据经过对数标准化后进行空间分析, 因子分析的数据采用 2.2 节中的标准化方法。采用 K-S 检验数据正态分布, 当 K-S 检验为不显著 ($P \geq 0.05$) 时, 样本数据来源于正态分布, 当 $P < 0.05$ 时, 样本数据来源于非正态分布^[23]。采用普通克里格插值法 (ArcGIS 10.4) 进行重金属含量的空间分布分析; 因子分析和多元回归分析采用 SPSS 18.0, 应用 SigmaPlot 12.5 对每种重金属地积累指数的分布情况进行作图; 其它计算采用 Excel 2013。

2 结果与分析

2.1 统计学分布及与背景值比较

所检测的重金属元素与新疆地区相应的背景值

比较结果如表 2 所示。首先, Cr 的最小值比背景值略高, 但中位值、平均值和最大值均低于背景值; Mn 只有最小值大于背景值, 中位值、最大值和平均值均与背景值相仿或小于背景值; Co 最大值和平均值大于背景值, 其余均小于背景值或与背景值相仿。其次, Ni 的统计学分布中除了中位值与背景值相仿以外, 其余分布全部高于背景值; Cd 除最大值与背景值相仿以外, 其余的统计学分布均高于背景值; Zn 除了最小值低于背景值, 其余分布都超过背景值; Pb 的最小值低于背景值, 中位值与背景值相仿, 而最大值、平均值和标准差均大于背景值。最后, Cu、As 最小值都与背景值相仿, 其余远远大于背景值, Cu 的最大值和平均值分别达到 $1809 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $221 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别为背景值的 23 倍和 8 倍; As 的最大值和平均值分别为 $1730 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $184 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均为背景值的 40 倍以上, Cu 和 As 元素的标准差也分别达到 $381 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $535 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。此外, 除了 Mn 元素以外, 所有元素的变异系数都大于背景值, 其中, Zn、Ni、Cd、Pb 这 4 种元素的变异系数大于 50%, 而 Cu 和 As 的变异系数分别为 172% 和 114%, 意味着这些元素样点之间的含量差异较大, 存在某些样点累积较高的现象。与背景值比较以及变异系数分析结果表明, Mn 的累积较低与背景值相仿, Co、Cr、Ni、Cd、Zn、Pb 这 6 种元素在个别样点存在累积现象, 但是总体上累积水平较低, 然而 Cu、As 的累积较为严重。

2.2 正态分布分析

样本数据是否符合正态分布是评价土壤中重金属是否存在人为干扰的依据之一, 当数据为非正态分布时说明存在人为干扰^[25]。偏度和峰度越接近 0, 说明越接近正态分布。如表 3 所示, 只有 Mn 元素的峰度较为接近 0, 其它元素的峰度和偏度都偏离 0 较远。其中 Mn、Cr、Zn、Ni、Cd 元素的原始数据的 K-S 检验为不显著 ($P > 0.05$), 呈现为正态分布, 说明受人为干扰较小; As、Cu、Co、Pb 元素的原始数据的 K-S 检验表现为显著水平 ($P < 0.05$), 均呈现为非正态分布, 因此可以认为这 4 种元素的累积较为明显地存在人为干扰。将 As、Co、Cu、Pb 元素的原始数据进行对数标准化后都呈现出

表 2 土壤重金属含量特征及与背景值比较¹⁾

Table 2 Concentrations characteristics and comparison with background values of heavy metals in soils							
项目	<i>n</i>	Min/mg·kg ⁻¹	Median/mg·kg ⁻¹	Max/mg·kg ⁻¹	Mean/mg·kg ⁻¹	SD/mg·kg ⁻¹	CV/%
Cr	33	23.2	32.6	100	37.0	15.7	42.4
背景值	260	18.4	47.6	119	49.3	13.8	28.0
Zn	34	11.3	90.9	480	136	95.4	70.1
背景值	260	21.5	66.9	154	68.6	19.9	29.0
Ni	33	21.1	26.2	102	35.1	19.1	54.4
背景值	260	7.40	26.7	68.5	26.6	8.89	33.4
Mn	34	511	679	940	691	113	16.4
背景值	260	144	651	1 462	688	178	25.9
Cd	33	0.150	0.229	1.42	0.400	0.285	71.3
背景值	260	0.016	0.101	1.63	0.120	0.070	58.3
Pb	34	1.65	19.9	180	31.1	30.7	98.7
背景值	260	4.20	19.0	50.4	19.4	3.71	19.1
Cu	34	3.39	59.9	1 809	221	381	172
背景值	260	6.40	25.5	78.4	26.7	9.56	35.8
Co	34	3.42	12.7	65.4	19.0	13.1	68.9
背景值	260	6.20	14.8	37.2	15.9	5.07	31.9
As	34	1.65	184	1 730	469	535	114
背景值	260	1.40	10.1	39.5	11.2	5.52	49.3

1) 背景值引用参考文献[24]

表 3 土壤重金属含量的偏度、峰度及正态性检验(K-S 检验)¹⁾

Table 3 Skewness, kurtosis and normal testing (K-S testing) of heavy metal concentrations in soils				
重金属	偏度	峰度	K-S 检验(原始数据)	K-S 检验(对数标准化)
Mn	0.704	0.030	0.363	0.640
Cr	2.34	6.67	0.177	0.378
As	0.944	-0.532	0.019 *	0.357
Co	1.66	3.18	0.042 *	0.340
Cu	3.01	9.46	0.007 *	0.369
Zn	1.89	4.27	0.077	0.456
Ni	1.85	3.29	0.063	0.135
Cd	1.69	3.07	0.228	0.496
Pb	3.70	16.28	0.018 *	0.098

1) * 表示 $P < 0.05$

了正态分布,说明尽管存在人为干扰,但是程度较小.

2.3 主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型分析

对原始数据进行标准化以后进行因子分析, Bartlett 检验 ($P < 0.01$) 和 KMO (0.792) 检验表明, 对变量可以进行因子分析并且效果较好. 主成分分析的结果如表 4 所示, 一共可以提取 2 个因子, 可以解释总方差的 86.4%, 其中第一个因子可以解释 62.8% 的方差, 第二个因子可以解释 23.6% 的方差. 因此可以认为研究区域土壤中的重金属主要有两种来源, 来源 1 包括 As、Co、Cu、Cr、Ni、Zn 和 Cd 这 7 个元素, 来源 2 包括 Pb 和 Mn 这 2 个元素.

根据与背景值比较和数据正态分布分析结果, 元素 As、Cu 的累积相对较为严重, Mn 元素的累积

表 4 土壤重金属元素含量旋转后的因子载荷分析

Table 4 Factor loading analysis of soil heavy metal concentrations after rotation		
重金属	1	2
Mn	-0.231	0.822
Cr	0.844	-0.196
As	0.846	0.317
Co	0.964	0.203
Cu	0.963	0.140
Zn	0.771	0.561
Ni	0.965	0.039
Pb	0.517	0.762
Cd	0.718	0.591
特征值	5.65	2.12
解释方差/%	62.8	23.6

无明显人为干扰. 由此可见, 与 As 元素同一来源

的元素如 Co、Cu、Cr、Ni、Zn、Cd 的来源与矿冶场污染有较大关联，而 Mn 元素及与 Mn 元素一组的元素 Pb 主要来源于成土母质。

根据 PCA/APCS 受体模型，所研究的 9 种重金属元素的绝对主成分分数与土壤含量之间的多元线性回归方程参数如表 5 所示，As、Co、Cu、Zn、Cd 和 Pb 这 6 个元素的常数项为负值，并且 As 和 Cu 的常

数项分别达到 -265 和 -150，从而导致这些元素的两个因子平均含量贡献量之和 ($ASPC_1 \times b_1 + ASPC_2 \times b_2$) 超过了土壤中的总含量。元素 Mn 和 Cr 正相反，由于多元回归拟合所得常数项较大，导致其中一个因子的平均含量贡献量呈负数。由此可见，PCA/APCS 受体模型在本研究中并不能准确地定量评估不同来源的重金属对土壤重金属含量的贡献率。

表 5 PCA/APCS 受体模型计算结果

Table 5 Results of PCA/APCS receptor model calculations

重金属	多元回归方程参数			因子平均含量贡献量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
	b_0	b_1	b_2	$ASPC_1 \times b_1$	$ASPC_2 \times b_2$
Mn	599	-29.6	64.8	-28.5	123
Cr	27.6	14.1	-1.38	13.6	-2.64
As	-265	435	171	419	327
Co	-0.931	12.1	4.50	11.6	8.60
Cu	-150	360	15.6	347	29.8
Zn	-75.5	47.3	88.1	45.6	168
Ni	10.0	18.3	4.50	17.6	8.60
Cd	-0.200	0.135	0.261	0.130	0.499
Pb	-31.6	5.10	30.6	4.92	58.5

2.4 地积累指数分析

对所调查的 9 种重金属进行地积累指数的计算，结果如图 2 所示，与背景值比较的结果类似：① As、Cu 都存在轻微到极严重的污染，污染程度样点比例组成较多，其中，Cu 轻微和轻度污染样点为 6 和 2 个，中度污染样点 8 个，严重和极为严重污染点各 2 个；严重污染点编号为 S6 和 E6，极为严重污点编号为 S7 和 S8；As 的轻微、轻度和中度污染样点总计为 14 个，18 个样点为重度到极为严重污染，其中重度污染点编号为 E4、E8、E9、W1 和 W2，严重污染点编号为 W3，极为严重污染点的编号为 E6、E7 和 S1 ~ S9；② Cd、Zn、Pb 这 3 个重金属元素存在轻微到中度污染样点，其中 Cd 存在 17 个轻微污染点，9 个轻度污染点，6 个中度污染点；

③ Ni、Co 和 Cr 元素在少数样点的累积存在轻微和轻度污染，样点污染比例组成较少；Mn 元素在所有样点的含量都未达到污染水平。

2.5 土壤重金属元素的空间分布特征

利用对数标准化后的土壤重金属含量进行普通克里格插值，结果如图 3 所示，场区北边 As 含量最低，场区西南边其次，As 的最高含量样点都分布在场区南边和西边的大部分区域，即接近南边尾砂库和西边收砷房的区域[图 3(a)]。Zn、Pb 和 Cd 的分布与 As 类似，含量最高 80% ~ 100% 的区域也在尾砂库和收砷房附近[图 3(g) ~ 3(i)]。Cu、Cr、Co 和 Ni 含量最高 80% ~ 100% 的区域分布在场区南边尾砂库周围，而北边的重金属含量都较低，东边和西边靠近南边尾砂库的区域重金属含量在 60% ~ 80% 之间[图 3(b) ~ 3(f)]。但是 Mn 元素的分布与其它元素都不同，最高含量在西边一小块面积的区域，其它区域的含量基本都在 60% 以下[图 3(c)]。

3 讨论

与背景值相比以及数据正态分布分析的结果表明，总体上场区周围人为干扰引起的重金属累积程度较轻，相对而言 Cu 和 As 是累积程度最为严重的两种元素，地积累指数评价的结果也表明这两种元素在有些样点存在严重和极为严重污染。As 是许多有色金属的伴生矿，在有色金属冶炼过程中，As 以硫化物、氧化物、砷酸盐及亚砷酸盐等形态进入废气、废水、废渣中^[26]。据统计，被开采出来的 As

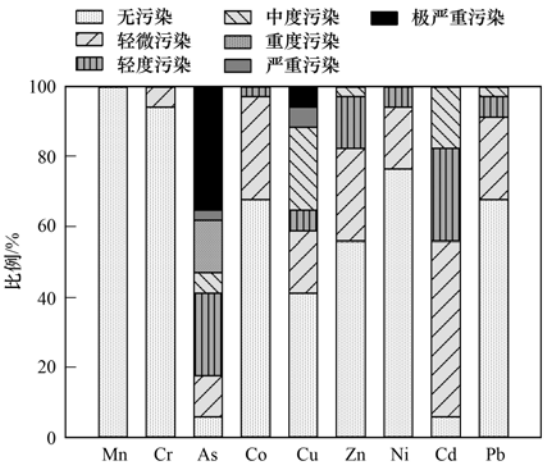


图 2 9 种重金属的地积累指数的分布比例

Fig. 2 Distribution ratios of the geoaccumulation indexes of the nine heavy metals

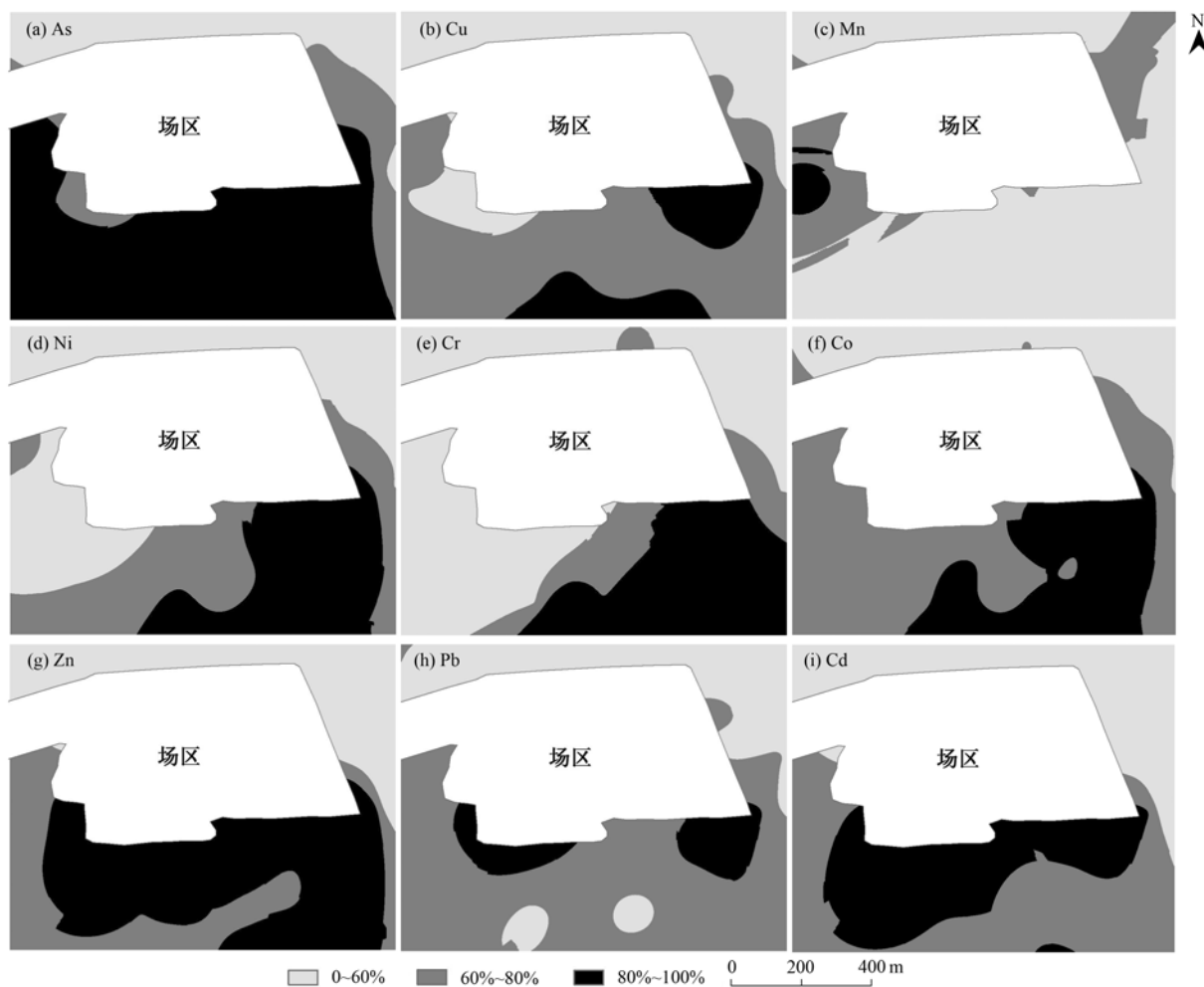


图3 土壤重金属 As、Cu、Mn、Ni、Cr、Co、Zn、Pb 和 Cd 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the heavy metals As, Cu, Mn, Ni, Cr, Co, Zn, Pb, and Cd in the soils

约70%左右进入了尾矿和尾砂中,2010年新疆地区黑色金属冶炼过程产生的废物中总As含量可达243 t^[27]. Cu和As往往伴生出现,铜精矿含有较高含量的As. 廖晓勇等^[28]对典型矿业城市的土壤重金属来源的研究结果发现,As、Cu等重金属污染区域主要集中在尾砂库区域; Triantafyllidis等^[29]的研究结果也发现,在尾砂库附近的水稻As、Cu等重金属严重超标. 不同冶炼厂产生的重金属污染物种类也不同,重金属Cd、Cr、Cu、Pb和Zn,尤其是Cu、Cd、Pb是Zn/Pb冶炼厂的主要重金属污染物^[30, 31].

场区周围土壤中Mn元素没有明显的累积,地积累指数评价结果也表明Mn元素在所有样点都没有达到污染水平;其余6种元素Cr、Co、Cu、Zn、Pb和Cd只在个别样点有轻微累积的现象,总体上受到人为干扰较小. 根据PCA/APCS受体模型,场区周围重金属来源主要有两类. 但是,如图3所示,除了Mn元素以外,重金属含量最高的样点都集中在南边尾砂库周围,场区北边土壤中重金属元素基本在背景值范围内,因此,样点之

间土壤重金属含量分布极度不均衡导致PCA/APCS受体模型不能够准确地定量计算出两个因子对各个元素的贡献量. 根据Thurston等^[14]的研究,常数项为因子不能解释的其它来源所贡献的元素含量,而且如果因子分析效果越好常数项越趋于0. 因此,尽管很多学者采用PCA/APCS受体模型进行土壤中重金属来源定量分析,但是本研究表明,PCA/APCS受体模型与因子分析类似也只能获得定性评价结果.

4 结论

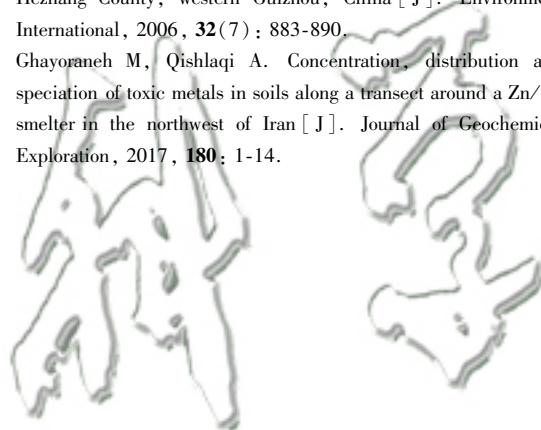
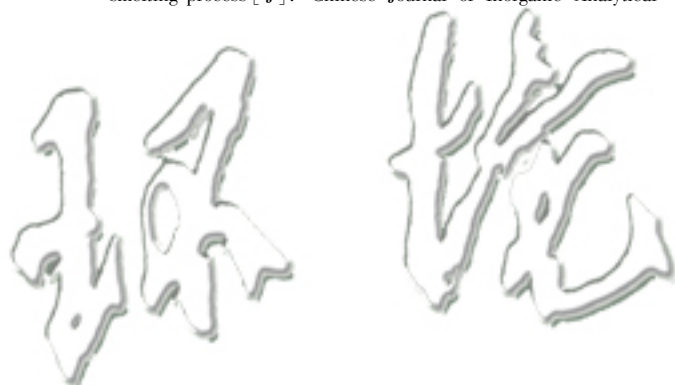
本研究通过对矿冶场区周围土壤布点调查分析结果表明,重金属Cu和As是主要的土壤污染物,Cr、Co、Ni、Zn、Pb和Cd的累积程度较轻,Mn元素没有明显累积,所有样点的Mn元素地积累指数评估都为无污染;尾砂库是周围土壤中除Mn以外多种重金属的主要来源,尾砂库和收砂房的扬尘是重金属污染物向周围土壤扩散的主要途径,为了控制污染物扩散,因此有必要对尾砂库和收砂房进行封闭处理. 此外,本研究结果还表明PCA/APCS受

体模型不适合作为本研究的来源贡献率定量分析手段。

参考文献:

- [1] Abrusci C, Pablos J L, Marin I, *et al.* Comparative effect of metal stearates as pro-oxidant additives on bacterial biodegradation of thermal-and photo-degraded low density polyethylene mulching films[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, **83**: 25-32.
- [2] Liu J L, Yang T, Chen Q Y, *et al.* Distribution and potential ecological risk of heavy metals in the typical eco-units of Haihe River Basin [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, **10**(1): 103-113.
- [3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 (2014 年 4 月 17 日)[J]. *环境教育*, 2014, (6): 8-10.
- [4] 陈建信, 孙燕英, 刘鑫, 等. 内蒙古东部两个有色金属集中开采区土壤重金属污染健康风险评估的对比研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, **32**(1): 140-146.
Chen J X, Sun Y Y, Liu X, *et al.* Assessment on the health risk of soil heavy metals in two non-ferrous metal exploration areas in eastern Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(1): 140-146.
- [5] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1887-1894.
Fan X G, Mi W B, Ma Z N, *et al.* Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan Northwest China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1887-1894.
- [6] 高宇潇, 塔西甫拉提·特依拜, 夏楠, 等. 新疆准东五彩湾煤田区不同深度土壤重金属污染评价、来源分析与空间分布特征[J]. *中国矿业*, 2016, **25**(9): 74-81, 96.
Gao Y X, Tashpolat T, Xia N, *et al.* Spatial distribution and pollution source assessment of different depth of soil heavy metals in the Wucailan coal field in Xinjiang East Junggar basin[J]. *China Mining Magazine*, 2016, **25**(9): 74-81, 96.
- [7] 徐玉霞, 汪庆华, 薛雷, 等. 关中西部某铅锌冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(5): 1240-1244.
Xu Y X, Wang Q H, Xue L, *et al.* The characteristics of heavy metals in soil around the lead and zinc smelter in western Guanzhong[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, **44**(5): 1240-1244.
- [8] 阿不都艾尼·阿不里, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 等. 煤矸石堆场周围土壤重金属污染特征分析与评价[J]. *中国矿业*, 2015, **24**(12): 60-65.
Abdugheni A, Tashpolat T, Hou Y J, *et al.* Analysis of pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surrounding soils of gangue piling site[J]. *China Mining Magazine*, 2015, **24**(12): 60-65.
- [9] 蒲瑞丰, 康尔泗, 王轲, 等. 石羊河流域典型工业区土壤重金属污染状况研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, **22**(9): 129-133.
Pu R F, Kang E S, Wang K, *et al.* Pollution status of heavy metals in soils of typical industrial districts in Shi Yang River Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, **22**(9): 129-133.
- [10] 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): 3099-3105.
Guo W, Zhao R X, Zhang J, *et al.* Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 3099-3105.
- [11] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 710-716.
Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of urban soil heavy metal and pollution evaluation in different functional zones of Yinchuan city[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 710-716.
- [12] 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 等. 河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2322-2328.
Liu Y N, Zhu S F, Wei X F, *et al.* Assessment and pollution characteristics of heavy metals in soil of different functional areas in Luoyang[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2322-2328.
- [13] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
Guo Y H, Sun X C, Zhang S B, *et al.* Pollution characteristics, Source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
- [14] Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1985, **19**(1): 9-25.
- [15] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 854-860.
Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 854-860.
- [16] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
Chen X D, Lu X W. Source apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [17] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [18] 龚新梅, 汪溪远, 潘晓玲, 等. 新疆塔里木河下游(上段)地区天然草地生态脆弱性研究[J]. *干旱区地理*, 2006, **29**(2): 230-236.
Gong X M, Wang X Y, Pan X L, *et al.* Study on the ecological fragility of the natural steppes in the lower reaches (upper section) of the Tarim River, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2006, **29**(2): 230-236.
- [19] 左其亭. 干旱半干旱地区植被生态用水计算[J]. *水土保持学报*, 2002, **16**(3): 114-117.
Zuo Q T. Study on vegetation ecological use for water resources in arid and semiarid region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(3): 114-117.
- [20] 蔡绍洪, 向秋兰, 湛莉萍, 等. 西部生态脆弱地区绿色增长极的构建——基于循环产业集群模式的研究[M]. 北京: 人民出版社, 2015. 3-5.
- [21] GB/T 17138-1997, 土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法[S].

- [22] Förstner U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments; geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. *GeoJournal*, 1981, **5**(5): 417-432.
- [23] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3532-3539.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3532-3539.
- [24] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-390.
- [25] 王学松, 秦勇. 利用对数正态分布图解析徐州城市土壤中重金属元素来源和确定地球化学背景值[J]. *地球化学*, 2007, **36**(1): 98-102.
Wang X S, Qin Y. Application of lognormal distribution plot to interpreting sources and determining geochemical background levels of heavy metals in Xuzhou urban soils, Jiangsu province [J]. *Geochimica*, 2007, **36**(1): 98-102.
- [26] 陈娟, 谢刚, 赵德平. 有色金属冶炼中含砷物料的除砷技术研究现状[J]. *中国无机分析化学*, 2014, **4**(4): 11-15.
Chen J, Xie G, Zhao D P. Research status of dearsenization technology in materials containing arsenic in non-ferrous metal smelting process [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2014, **4**(4): 11-15.
- [27] 陈琴琴. 中国砷污染排放清单研究[D]. 南京: 南京大学, 2013. 6-10.
Chen Q Q. Emissions inventory of arsenic in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. 6-10.
- [28] 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.
- [29] Triantafyllidis S, Skarpelis N, Komnitsas K. Environmental characterization and geochemistry of Kirki, Thrace, NE Greece, abandoned flotation Tailing dumps[J]. *Environmental Forensics*, 2007, **8**(4): 351-359.
- [30] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, *et al.* Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China [J]. *Environment International*, 2006, **32**(7): 883-890.
- [31] Ghayoraneh M, Qishlaqi A. Concentration, distribution and speciation of toxic metals in soils along a transect around a Zn/Pb smelter in the northwest of Iran [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **180**: 1-14.



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 Shiuli 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 Malfanite 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)