

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郅红建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析

李强¹, 曹莹¹, 何连生^{1*}, 王耀锋^{1,2}, 龚成¹, 何书涵¹

(1. 中国环境科学研究院环境检测与实验中心, 北京 100012; 2. 华北理工大学建筑工程学院, 唐山 063210)

摘要: 以韶关某冶炼厂为冶炼行业典型工业区, 对冶炼厂区内土壤中的 Cd、Pb、Hg、Sb、As、Zn、Cu、Cr 和 Ni 等 9 种重金属元素的总量和有效态含量进行了测定, 利用 ArcGIS 10.2 进行了冶炼厂地土壤中重金属空间分布的插值分析, 采用的污染状况评价方法有单因子污染指数法、富集因子法和潜在生态危害指数法, 重金属来源分析方法有相关性分析法和主成分分析法。对研究区土壤的重金属污染状况及来源进行分析。结果表明, Cd 和 As 的单因子指数为 1.50 和 2.13, 分别属于轻微污染和轻度污染; Pb 的单因子指数为 5.58, 属于重度污染。As、Hg 和 Zn 的富集因子为 3.73、10.4 和 22.4, 分别属于中度污染、重度污染和严重污染; Cd、Pb 的富集因子超过 40, 属于极重污染, 受人为污染程度明显。Pb 和 Cd 的有效态占总量的质量分数较高, 分别在 0.57%~46.0% 和 0.87%~69.2% 之间。其次为 Zn 和 Cu, 而 Hg、Sb、Ni、As 和 Cr 的有效态质量分数均在 5% 以下。研究区重金属潜在生态风险指数的空间分布由西向东整体呈由低到高再降低的变化趋势, 其中北部点位的指数显著高于其他点位, 可能存在局部泄漏。Hg 和 Sb 的空间分布与其他元素不同, 呈现中部区域较高、东西部区域较低的特点。相关性和主成分分析结果表明, Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 元素之间的相关性显著, 主要来源为工业生产活动的输入; Hg 和 Sb 元素之间具有显著的正相关性, 但与其他元素无相关性; Ni 的主要来源更符合自然输入的规律。

关键词: 冶炼场地; 重金属含量; 有效态含量; 空间分布; 来源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5930-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104313

Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites

LI Qiang¹, CAO Ying¹, HE Lian-sheng^{1*}, WANG Yao-feng^{1,2}, GONG Cheng¹, HE Shu-han¹

(1. Environmental Analysis and Testing Laboratory, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Taking a smelter in Shaoguan as a representative site of a typical industrial zone for the smelting industry, the total and bioavailable concentrations of nine heavy metal elements Cd, Pb, Hg, Sb, As, Zn, Cu, Cr, and Ni, and their spatial distributions in the soil of the smelter were studied, the latter through the interpolation analysis functionality of ArcGIS 10.2. The pollution status evaluation methods included the single factor pollution index, enrichment factor, and potential ecological hazard index methods; the analysis methods of heavy metal sources included correlation analysis and principal component analysis. The results showed that the single factor index values of Cd and As were 1.50 and 2.13, indicating light pollution; the single factor index of Pb was 5.58, indicating heavy pollution. The enrichment factors of As, Hg, and Zn were 3.73, 10.4, and 22.4, indicating moderate pollution, heavy pollution, and severe pollution, respectively; the enrichment factors of Cd and Pb exceeded 40, indicating extremely heavy pollution. The bioavailable form contents of Pb and Cd comprised a relatively high ratio of the total amount, ranging from 0.57%~46.0% and 0.87%~69.2%, respectively, followed by Zn and Cu. However, the mass fractions of Hg, Sb, Ni, As, and Cr were all less than 5%. The spatial distribution of the potential ecological risk index of heavy metals in the study area showed a trend from low to high, with a decreasing trend from west to east. The index at the northern point was significantly higher than at other points, indicating potential local leakage. The spatial distribution of Hg and Sb was different from that of other elements, being higher in the central area and lower in the eastern and western areas. The correlation analysis and principal component analysis results showed that the correlations between Cu, Zn, As, Cd, and Pb were significant, and the main source was inputs from industrial production activities. There was a significant positive correlation between Hg and Sb, but there was no correlation between these elements and other elements. The main source of Ni was probably natural input.

Key words: smelting site; heavy metal concentration; bioavailable form content; spatial distribution; source analysis

2016 年,我国发布《土壤污染防治行动计划》以切实加强土壤污染防治,并逐步改善土壤环境质量,土壤污染防治工作越来越受到重视。冶炼行业在为国民经济发展和国防军工建设作出巨大贡献的同时,也为周边土壤环境带来了较为沉重的负担^[1]。原料准备、熔炼过程、熔铸与电解过程和尾气吸收等金属冶炼工艺环节产生废气、废水与废渣,这些污染物会通过降雨、沉降、排放、泄漏、引流和下渗等方式进入到土壤环境中^[2~5]。通过近些年对我国冶炼行业排放污染物特征的分析研究,可以发现金属冶炼工艺排放的污染物主要为二氧化硫、氮氧化物、颗粒

物、烟尘、重金属和冶炼渣等^[6,7]。随着冶炼厂污染物的持续排放,土壤中的重金属会不断地富集,并通过食物链及长期暴露等方式对健康产生不利的影响,从而增加人体慢性中毒及致癌的风险^[8~11]。

近年来,国内外有较多对于冶炼厂周边土壤重金属污染的研究。王洋洋等^[12]对铅锌冶炼厂周边农田土壤的重金属污染分布及风险进行了研究,

收稿日期: 2021-04-28; 修订日期: 2021-06-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1803401)

作者简介: 李强(1990~),男,硕士,主要研究方向为环境监测, E-mail: 15201452187@163.com

* 通信作者, E-mail: heliansheng08@126.com

结果表明冶炼厂附近为 Pb 和 Cd 的重度污染区, Cd 为重度污染, 其次是 Pb、Cu 和 Zn 的污染。Cai 等^[13]对铜冶炼厂周围土壤及作物等进行了调查, 发现附近的土壤受到 Cd、Cu、Pb 和 As 的严重污染, 且在蔬菜、稻米和鱼肉中受到了不同程度的污染。余志等^[14]的研究对锌冶炼区菜地土壤和蔬菜进行了调查, 发现土壤 Cd 污染最为突出, As 对人体的健康风险较为明显, 土壤与蔬菜可食部分的重金属含量无显著相关性。以往的报道基本以重金属总量来研究土壤污染特征^[15~17], 未考虑重金属的有效性对于土壤污染的影响。且多数研究集中在冶炼厂对周边农田土壤的污染状况^[18~23], 对冶炼厂内部土壤的污染特征及成因的研究相对较少。

广东省韶关市素有“中国锌都”的称号, 有色金属矿产资源丰富且种类繁多, 金属冶炼行业的发展历史悠久。韶关某冶炼厂紧邻珠江流域中的北江干流, 拥有超过 50 年的发展历史, 被誉为我国第三大铅锌冶炼厂, 是我国南方重要的铅锌冶炼生产和铅锌产品出口基地。本文以韶关某冶炼厂为冶炼行业典型工业区, 以冶炼厂区内土壤中 Cd、Pb、Hg、Sb、As、Zn、Cu、Cr 和 Ni 等 9 种重金属元素的总量和有效态为研究对象, 试图探讨冶炼行业土壤重金属

污染特征、空间分布及来源分析, 以期冶炼重点行业场地土壤污染的防治与管控做技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于广东省韶关市的韶关某冶炼厂 (113°33' ~ 113°34'E, 24°43' ~ 24°44'N), 该厂是采用 ISP 工艺的大型铅锌冶炼厂。韶关市位于南岭多金属成矿带上, 矿产资源丰富, 种类繁多, 有“中国有色金属之乡”称号, 全市已探明储量的矿产有 55 种。研究区属于亚热带湿润型季风气候, 冬季主要为东北季风, 夏季为西南和东南风。土壤成土母质包括第四纪沉积物、紫红色砂页岩类和砂页岩类等, 厂区周边有流域、农田、林地和居民区分布。

1.2 样品采集与分析

结合韶关某冶炼厂的地貌特征、水文特征、工艺环节和周边环境等因素, 采样点位的布设选择可能污染较重的若干地块, 如生产车间、污水管线、原料和废弃物堆放处等厂区内若干地块, 共设置 13 个采样点, 如图 1 所示。每个取样点处采集土壤表层 0 ~ 20 cm 的新鲜土壤, 等量采集 3 ~ 5 个子样, 混匀后用四分法取 1 kg 土样装入样品袋, 并做好现场采样记录。

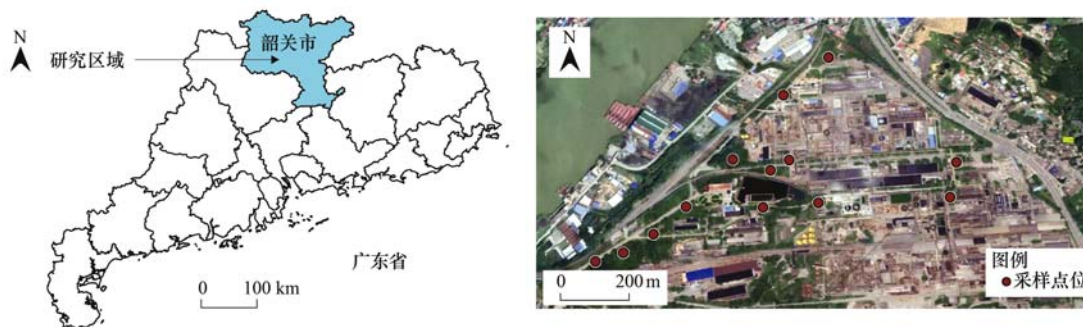


图 1 研究区域地理位置和采样点的空间分布示意

Fig. 1 Location map of the study area and the distribution of sampling sites

样品运送至实验室内, 除去枝棒和石子等异物, 进行自然风干、研磨至过 10 目和 100 目的尼龙筛待测。元素总量的测定参照 HJ803-2016, 利用微波消解仪 (CEM Mars 6) 进行消解, 然后用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS Agilent 7900) 测定 Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Sb 元素; 总 Hg 的测定依据 HJ923-2017, 使用直接进样测汞仪 (海光 HGA-100); 总 Cr 的测定参考 HJ 491-2019, 使用火焰原子吸收分光光度计 (日立 ZA3000)。有效态元素的样品消解前处理参照 HJ804-2016, 参照 USEPA 6020B (2014) 利用 ICP-MS 进行测定。土壤有效态元素, 即土壤中在植物生长过程中可以被植物根系吸

收的元素。

分析过程严格进行质量管控, 校准曲线相关系数均大于 0.999, 实验室空白均低于测定下限, 平行样品相对偏差均小于 20%, 国家标准土壤 GSS-27 的回收率在 88% ~ 106% 之间, 有效态元素的加标回收率在 75% ~ 125% 之间。分析时所用的实验用水为新制备的超纯水, 试剂均为优级纯以上。

1.3 重金属污染风险评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

该方法可以评价土壤的污染程度, 能直观地反映各项污染物指标, 单因子指数公式为:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为土壤中某一污染物 i 的单因子污染指数, C_i 为土壤中某一污染物 i 的实测含量, S_i 为土壤中某一污染物 i 的评价标准参考值, 评价标准为文献 [24] 中第二类用地的筛选值. 单因子指数共分为 5 个等级: $P_i \leq 1$ 为无污染; $1 < P_i \leq 2$ 为轻微污染; $2 < P_i \leq 3$ 为轻度污染; $3 < P_i \leq 5$ 为中度污染; $P_i > 5$ 为重度污染.

1.3.2 富集因子法

富集因子是以满足一定条件的参比元素为参考标准, 对样品中的元素进行归一化处理, 用以表示环境介质中元素的富集程度、判断和评价元素的人为污染状况:

$$EF = \frac{(C_i/C_{ref})_{sample}}{(B_i/B_{ref})_{baseline}} \quad (2)$$

式中, C_i 为某元素 i 在土壤样品中的含量, C_{ref} 为参比元素在土壤样品中的含量, B_i 为某元素 i 在背景土壤中的含量, B_{ref} 为参比元素在背景土壤中的含量. 背景土壤的含量来自文献 [25], $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Hg})$ 分别为 54.9、16.5、19.2、65.2、13.0、0.199、41.2 和 0.138 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 参比元素的选取应满足与目标元素相关性小且化学性质稳定的特点, 本文对 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Sb、Hg 和 Ni 进行的相关性分析见图 3, 可知 Ni 与其他元素相关性最

小, 且 Ni 一般在土壤介质中不易被生物因素影响或随物理化学条件改变^[26]. 富集因子共分为 5 个等级: $EF < 1$ 属于无污染, $1 < EF < 2$ 轻微污染, 两者属于同一级别; $2 < EF < 5$ 中度污染; $5 < EF < 20$ 重度污染; $20 < EF < 40$ 严重污染; $EF > 40$ 极重污染^[27].

1.3.3 潜在生态危害指数法

采用最早由 Hakanson 提出的潜在污染生态风险评价指数法可进一步评估重金属对土壤环境的潜在生态风险^[28], 其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i C_f^i = T_r^i C_d^i / C_r^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (4)$$

式中, E_r^i 为某一重金属元素 i 的潜在生态风险因子; T_r^i 为某一重金属元素 i 的毒性响应因子, Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As、Hg 和 Ni 的毒性响应参数分别为 5、5、1、30、2、10、40 和 5^[29]; C_d^i 为某一重金属元素 i 的实测含量; C_r^i 为计算的评价标准参考值(同单因子评价); RI 为多种重金属的综合潜在生态风险评价指数. 单一重金属元素的潜在生态风险等级和多种元素的综合潜在生态风险评价等级划分见表 1. 考虑到 Sb 的地球化学行为及毒性和铅类似, 因此, 定义 Sb 的毒性响应系数与铅相同, 都为 5^[30].

表 1 潜在生态风险评价的等级划分

Table 1 Classification of potential ecological risk assessment

E_r^i	单一元素的潜在生态风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较强	$300 \leq RI < 600$	较强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强		

1.4 评价标准及数据分析方法

考虑到该研究区位于铅锌冶炼厂内, 研究区土壤均属于工业用地类别, 因此选择文献 [24] 中第二类用地的筛选值为评价标准. 而对于该标准中没有的铬和锌元素, 则选择文献 [31] 中工业用地的筛选值.

数据分析与统计采用 Microsoft Excel 和 Originlab 2021 完成, 空间分析与制图采用反距离插值法在 ArcGIS 10.2 中完成, 相关性和主成分分析分别采用 Originlab 2021 和 SPSS Statistics 20 软件进行分析.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属统计特征

从表 2 可以看出, 研究场地内土壤中重金属的

整体分布情况各不相同, Cr、Ni 和 Sb 元素的最小值与最大值相差小于 10 倍, Cu 和 As 相差 10 ~ 60 倍, Zn 和 Cd 相差 100 ~ 300 倍, Pb 和 Hg 相差大于 1 000 倍. 除 Cr、Ni 和 Sb 外, Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 的变异系数较大, 均超过了 100%. 各元素的单因子污染指数在 0.01 ~ 5.58 之间, Cr、Ni、Cu、Zn、Sb 和 Hg 的单因子指数小于 0.5, 评价结果为无污染; Cd 和 As 的单因子指数分别为 1.50 和 2.13, 评价结果分别为轻微污染和轻度污染, 存在个别点位中度至重度污染; Pb 的单因子指数超过 5, 属于重度污染. 对于各元素单因子指数的最大值, Cr、Ni、Cu、Sb 和 Hg 的单因子指数最大值均小于 1, 评价结果仍为无污染; Zn 的单因子指数最大值为 3.67, 属于中度污染; As、Cd 和 Pb 单因子指数最大

值则均超过 5,属于重度污染. Cr 的富集因子小于 1,属于无污染; Cu 和 As 的富集因子为 2.94 和 3.73,属于中度污染; Hg 和 Zn 的富集因子为 10.4 和 22.4,属于重度污染和严重污染,受人类活动影响较为明显; Cd 和 Pb 的富集因子均超过 40,处于极重污染的水平,受人为污染程度十分显著. 对于各元素富集因子的最大值, Cr 的富集因子为 1.09,属于轻微污染; As、Cu 和 Hg 的富集因子为 14.4、17.1 和 23.7,属于重度污染; Cd、Pb 和 Zn 的富集因子均超过 40,属于极重污染.

有效态元素含量占元素总量的质量分数统计结果如图 2 所示,从中可以看出,Pb 和 Cd 的有效态含量质量分数较高,平均质量分数分别为 21.3% 和 22.0%. Pb 的有效态含量质量分数在 0.57% ~ 46.0% 之间, Cd 的有效态质量分数在 0.87% ~ 69.2% 之间. 其次为 Zn 和 Cu,有效态质量分

别在 0.13% ~ 37.9% 和 0.41% ~ 11.7% 之间. Hg、Sb、Ni、As 和 Cr 的有效态质量分数均在 5% 以下,其中 Hg 在 0.002% ~ 4.36%, Sb 在 0.02% ~ 1.34%, Ni 在 0.02% ~ 0.63%, As 在 0.03% ~ 0.10% 之间, Cr 的有效态比例低于 0.02%. 据陆泗进等^[32]对冶炼厂周边农田土壤的研究结果, Pb、Cd、Zn、Cu 和 Hg 的可提取态质量分数分别为 5.4%、33.1%、14.1%、13.1% 和 0.6%; 牛学奎等^[33]对典型铅冶炼鼓风炉周边土壤的研究结果,可交换态 Cd 的质量分数范围是 37.3% ~ 44.9%. Fan 等^[34]的研究结果表明,冶炼厂周边的土壤 Pb、Zn 和 Cd 的非残留态比例较高,而 Cr 和 Cu 的残留态比例较高. 对比可知,冶炼厂及其周边土壤的 Cd 有效态比例普遍较高,且该研究区土壤 Pb 的有效态质量分数较高,可能与该铅锌冶炼厂从事生产活动相关.

表 2 土壤重金属总量统计特征与污染评价
Table 2 Statistical analysis and pollution evaluation of total heavy metals in soil

重金属 指标	最小值 /mg·kg ⁻¹	中位值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	算术平均值 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%	第二类用地 筛选值 ¹⁾ /mg·kg ⁻¹	单因子污染指数法		富集因子法	
							<i>P_i</i>	污染评价	EF	污染评价
Cr	78.2	97.0	239	110	40.8	2 500 *	0.04	无污染	0.76	无污染
Ni	17.1	43.9	65.7	43.5	29.7	900	0.05	无污染	/	/
Cu	25.2	53.1	1.30 × 10 ³	148	233	18 000	0.01	无污染	2.94	中度污染
Zn	299	975	3.67 × 10 ⁴	3.84 × 10 ³	259	10 000 *	0.38	无污染	22.4	严重污染
As	41.7	66.8	741	128	146	60	2.13	轻度污染	3.73	中度污染
Cd	3.25	18.6	953	97.4	265	65	1.50	轻微污染	186	极重污染
Pb	33.8	538	5.17 × 10 ⁴	4.46 × 10 ³	318	800	5.58	重度污染	41.2	极重污染
Sb	3.92	11.1	36.4	14.8	70.6	180	0.08	无污染	/	/
Hg	0.007	1.35	13.0	3.78	130	38	0.10	无污染	10.4	重度污染

1) * 表示《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)的工业用地筛选值

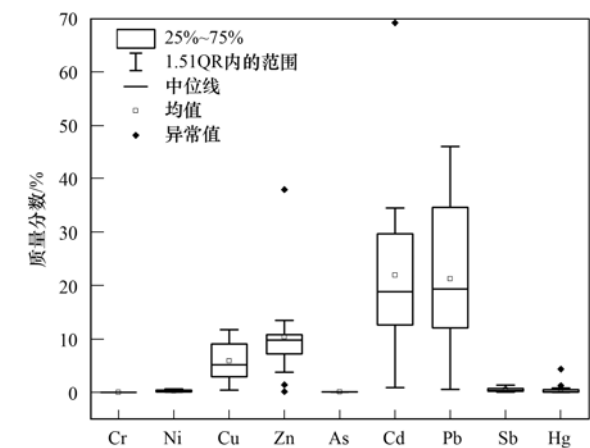


图 2 有效态元素含量占元素总量的质量分数统计
Fig. 2 Mass fraction of bioavailable form element content in total element

2.2 潜在生态风险指数的空间分布特征

由于各元素的潜在生态风险指数差异较大,采用不同的分级标准并依据大小依次进行排列,以直

观地体现各元素在空间分布的情况. 从图 3 可以看出,研究区域重金属潜在生态风险指数的空间分布由西向东整体呈由低到高再降低的变化趋势,其中北部红色区域点位的指数显著高于其他点位.

单一元素的潜在生态风险指数超过 40 的重金属为 Cd、Pb 和 As,且空间分布范围集中在北部红色区域点位附近. 其中, Cd 的最高潜在生态风险等级为极强, Pb 和 As 分别为很强和较强. Hg、Zn、Sb、Ni、Cu 和 Cr 的潜在生态风险等级均为轻微,但 Hg 和 Sb 的空间分布与其他元素不同,呈现中部区域较高和东西部区域较低的特点. 其中, Hg 的潜在生态风险指数超过 10 的点位有 3 个,其等级虽均为轻微,但其附近存在 Hg 泄漏的风险隐患. Ni 的空间分布无明显特征,且 Ni 的变异系数仅为 29.7%,其空间分布规律更符合成土母质或地质背景分布,非人为因素影响. 综合潜在生态风险评价指数(RI)的空间分布规律与 Cd 等元素的分布基本一致,其

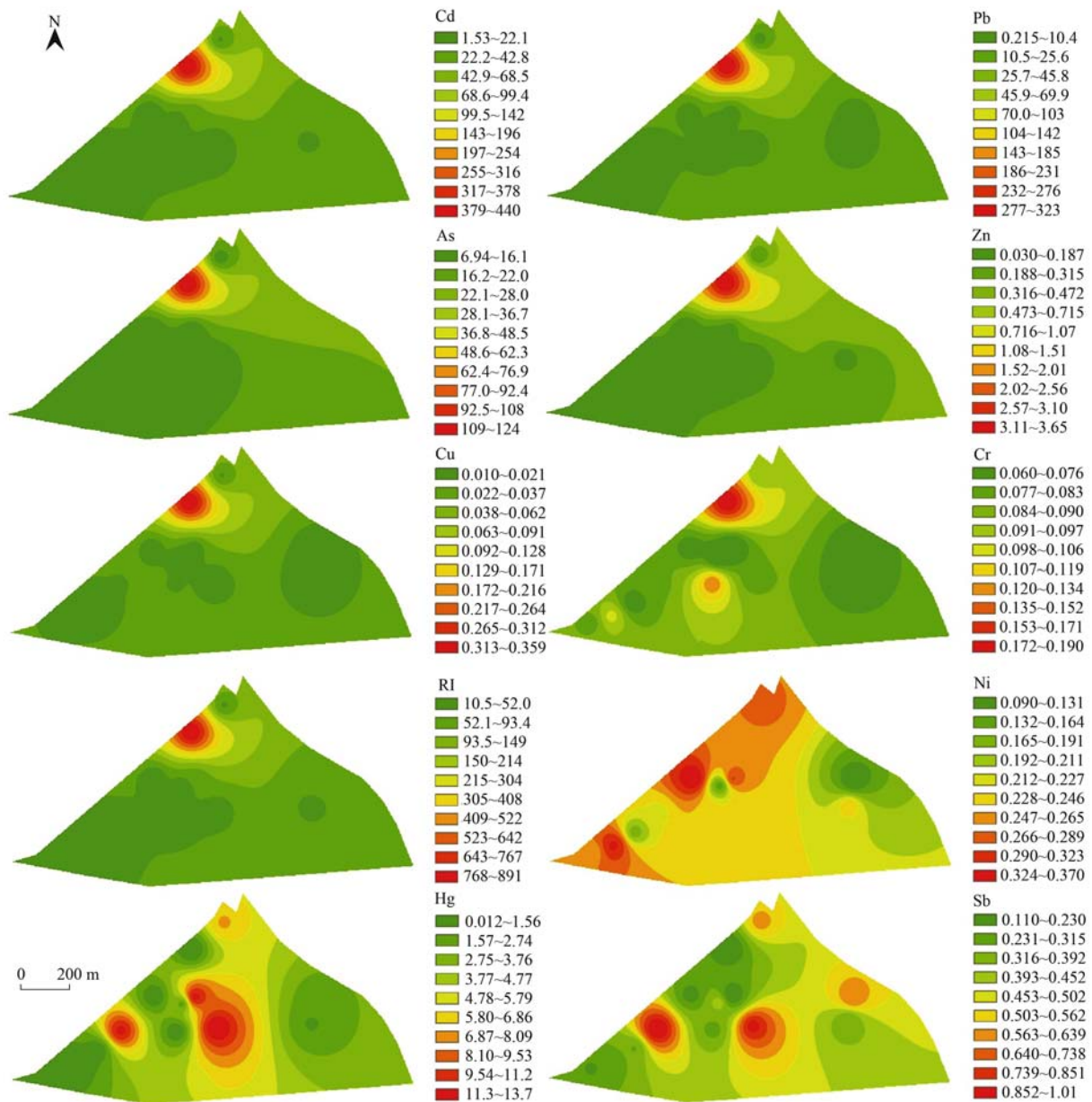


图3 研究区域重金属潜在生态风险指数空间分布

Fig. 3 Distribution of the potential ecological risk index of heavy metals along soil profiles

空间分布集中在北部红色区域点位附近,其最高点超过 600,该点位的潜在生态风险等级为很强。

多数重金属的空间分布集中在北部点位,且该点位距离原料准备工艺区较近,附近原料储存堆放量较大,可能是该点位附近在装卸、运输、配料、造粒和干燥等工艺过程中存在原料和废渣的泄漏^[2, 35]。废渣和废水中的重金属通过直接排放、雨水冲刷和土壤下渗等方式进入土壤环境,造成局部的重金属含量过高,潜在生态风险等级相对较强。

2.3 土壤重金属的相关性及来源初步分析

由于土壤重金属元素在来源与迁移转化过程中通常具有一定的联系,利用相关性分析可较为直观地体现各元素之间的相关密切程度。由图 4 可知,研

究区域内 Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的重金属总量在 0.05 水平上相互之间具有显著的正相关性,且相关系数均大于 0.8; Sb 的重金属总量在 0.05 水平上与 Hg 具有显著的正相关性; Ni 的重金属总量与其他元素的相关性较弱或无相关性。Cd 的有效态含量在 0.05 水平上与 Cr、Ni、Cu、Zn 和 As 具有显著的正相关性,且相关系数均大于 0.6; As 的有效态含量在 0.05 水平上与 Cr、Ni、Cu 和 Zn 具有显著正相关性; Cu 的有效态含量在 0.05 水平上与 Cr、Ni 和 Zn 具有显著正相关性; Sb 的有效态含量在 0.05 水平上与 Hg 具有显著的正相关性; Pb 的有效态含量在 0.05 水平上与 Zn 具有显著的正相关性。结合土壤重金属总量和有效态相关性分析可知, Cr、

Cu、Zn、As 和 Cd 元素相互之间的相关性较为显著. Hg 和 Sb 元素两者之间具有显著的正相关性, 且两者的潜在生态风险指数空间分布特征基本一致, 但两者与其他元素的相关性较弱或无相关性. 结合 Hg 和 Sb 元素呈现中西部个别点位较高的特点, 两者的来源较为符合工业生产活动局部泄漏的规律.

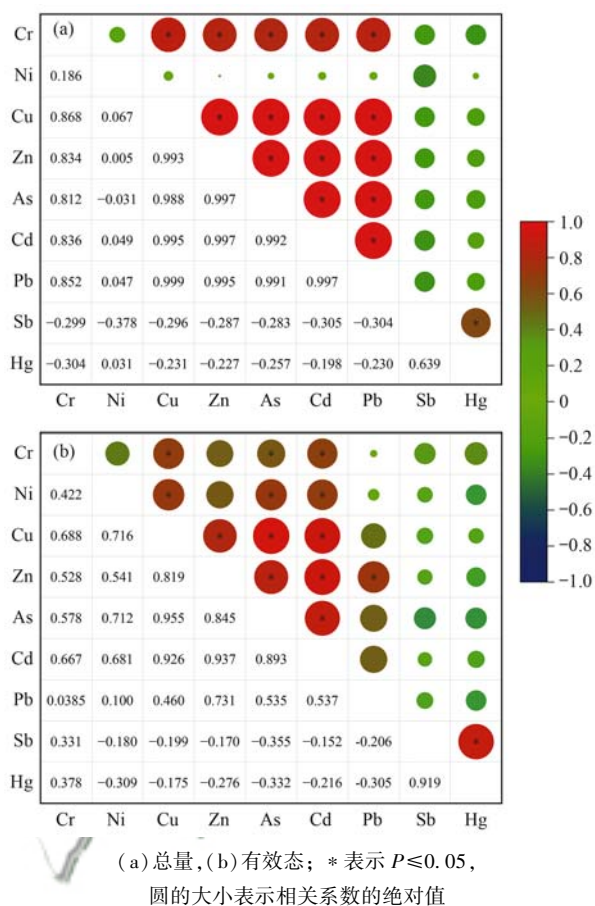


图4 土壤重金属总量和有效态的 Pearson 相关矩阵

Fig. 4 Pearson correlation matrix of total heavy metals and bioavailable form content in the soil

由前文相关性分析可知, Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 元素之间的相关性较好, 适合进行主成分分析. 采用 KMO 和 Bartlett 法对土壤中重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 总量和有效态含量数据进行检验, 得到 KMO 分别为 0.747 和 0.670, Bartlett 球度检验的相伴概率均为 0.000, 满足主成分分析的数据要求. 土壤重金属总量和有效态的因子载荷分布如图 5 所示, 各提取 2 个特征值较大的因子, 分别可解释变量总方差的 96.6% 和 87.0%, 因子 1 和因子 2 能反映原始数据的大部分信息.

重金属总量第一因子载荷较高的元素是 Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb, 方差贡献率可达 81.8%, 表明 Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 具有同源性. 余志等^[14]、Cheng 等^[36]和罗谦等^[37]都对铅锌采矿和冶炼活动对土壤中的重金属的污染进行了研究, 结果

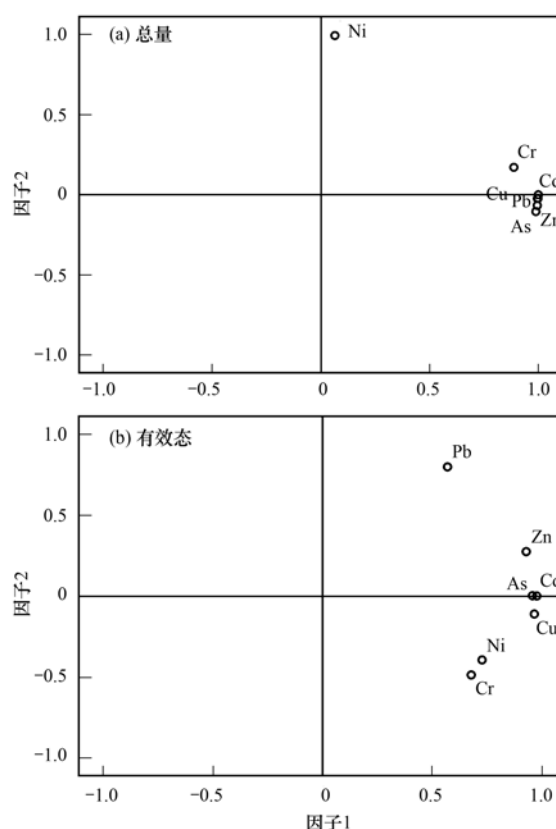


图5 土壤重金属总量和有效态的因子载荷分布

Fig. 5 Loading plots of the total heavy metals and bioavailable form content in the soil

表明重金属含量较高的主要是 As、Cd、Pb、Zn 和 Cu, 其来源主要是采矿冶炼工业活动. 国内的金属冶炼的主要产排环节分别有: 原料准备、熔炼过程、熔铸、电解过程和尾气吸收, 主要污染物为冶炼过程中产生的烟气、污水和废渣, 其主要成分中的重金属会进入土壤. 结合重金属统计分析和空间分布规律可知, Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 主要来源为工业生产活动的输入. 第二因子载荷较高的元素依次是 Ni 和 Cr, 方差贡献率为 14.8%. 结合前文对生态风险及空间分布的研究, Ni 和 Cr 的生态风险较低、变异系数较小, 且 Cr 通常以残渣态为主要赋存形态^[34,38], 因此第二因子的主要来源更符合自然输入的规律. 该结果符合文献^[39,40]的研究结论, 即 Ni 和 Cr 更多地来源于成土母质和背景, 属于自然源金属.

有效态含量第一因子载荷较高的元素是 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb, 方差贡献率可达 70.9%, 表明 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的有效形态具有一定的同源性. 其中, Cu、Zn、As 和 Cd 为具有较高载荷的重金属元素, 结合前文内容可知, 第一因子的主要来源为工业人为活动的输入. 第二因子载荷较高的元素依次是 Pb 和 Zn, 方差贡献率为 16.0%. 由于该研究区属于铅锌冶炼厂内, Pb 和 Zn 为最主

要的工业原料,且研究区土壤Pb的有效态质量分数较高,因此第二因子的来源更符合工业原材料的输入。

3 结论

(1)各元素的单因子污染指数在0.01~5.58之间,Cd和As的单因子指数分别为1.50和2.13,评价结果分别为轻微污染和轻度污染;Pb的单因子指数超过5,属于重度污染。As、Hg和Zn的富集因子为3.73、10.4和22.4,分别属于中度污染、重度污染和严重污染;Cd和Pb的富集因子超过40,属于极重污染,受人为污染程度明显。

(2)Pb和Cd的有效态占总量的质量分数较高,分别在0.57%~46.0%和0.87%~69.2%之间。其次为Zn和Cu,有效态质量分数分别在0.13%~37.9%和0.41%~11.7%之间。Hg、Sb、Ni、As和Cr的有效态质量分数均在5%以下。

(3)研究区域重金属潜在生态风险指数的空间分布由西向东整体呈由低到高再降低的变化趋势,其中北部红色区域点位的指数显著高于其他点位。Hg和Sb的空间分布与其他元素不同,呈现中部区域较高和东西部区域较低的特点;Ni的空间分布无明显特征。

(4)土壤重金属总量和有效态的相关性和主成分分析结果表明,Cu、Zn、As、Cd和Pb元素之间的相关性显著,主要来源为工业生产活动的输入;Hg和Sb元素之间具有显著的正相关性,但与其他元素无相关性;Ni的主要来源更符合自然输入的规律。

参考文献:

- [1] Zhou Y T, Wang L L, Xiao T F, *et al.* Legacy of multiple heavy metal(loid)s contamination and ecological risks in farmland soils from a historical artisanal zinc smelting area[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137541.
- [2] 李恒江, 杨亚军, 吕会民. 铜冶炼中间废渣回收铜的工艺研究与应用[J]. *世界有色金属*, 2018, (4): 30-31.
- Li H J, Yang Y J, Lv H M. Process research and application of indium waste residue in indium smelting[J]. *World Nonferrous Metals*, 2018, (4): 30-31.
- [3] Peng Y S, Yang R D, Jin T, *et al.* Risk assessment for potentially toxic metal(loid)s in potatoes in the indigenous zinc smelting area of northwestern Guizhou Province, China[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, **120**: 328-339.
- [4] Zhang K, Chai F H, Zheng Z L, *et al.* Size distribution and source of heavy metals in particulate matter on the lead and zinc smelting affected area[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **71**: 188-196.
- [5] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 铅冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, *et al.* Heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4360-4369.
- [6] 薛小娟. 金属冶炼过程中大气污染物排放状况及防治措施[J]. *世界有色金属*, 2018, (6): 38-39.
- Xue X J. Emission and control measures of air pollutants in metal smelting process[J]. *World Nonferrous Metals*, 2018, (6): 38-39.
- [7] 李强, 何连生, 王耀锋, 等. 中国冶炼行业场地土壤污染特征及分布情况[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(3): 586-595.
- Li Q, He L S, Wang Y F, *et al.* The characteristics and distribution of soil pollution in smelting industry sites in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(3): 586-595.
- [8] 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 等. 有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3547-3555.
- Feng Y Y, Shi J W, Zhong Y Q, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in road dust from non-ferrous smelting parks[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3547-3555.
- [9] Du B Y, Zhou J X, Zhang C, *et al.* Environmental and human health risks from cadmium exposure near an active lead-zinc mine and a copper smelter, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137585.
- [10] Wei X D, Zhou Y T, Jiang Y J, *et al.* Health risks of metal(loid)s in maize (*Zea mays* L.) in an artisanal zinc smelting zone and source fingerprinting by lead isotope[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140321.
- [11] 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 等. 典型再生铜冶炼厂周边土壤中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1141-1151.
- Hu J C, Wu J, Xu C Y, *et al.* Characterization and health risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the soil around a typical secondary copper smelter[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1141-1151.
- [12] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 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[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 437-444.
- Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 437-444.
- [13] Cai L M, Wang Q S, Luo J, *et al.* Heavy metal contamination and health risk assessment for children near a large Cu-smelter in central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 725-733.
- [14] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 铅冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- Yu Z, Chen F, Zhang J F, *et al.* Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 2086-2094.
- [15] 杨文聪, 祁士华, 邢新丽, 等. 大冶冶炼厂对周边土壤重金属贡献机制研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(S1): 110-115.
- Yang W C, Qi S H, Xing X L, *et al.* Study on the contribution mechanism of Daye Smelter to the heavy metals in the surrounding soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(S1):

- 110-115.
- [16] 赵振, 史烨弘, 毛小晶, 等. 某冶炼厂周边土壤重金属污染评价分析及源解析研究 [J]. 中国无机分析化学, 2020, **10** (4): 22-27.
Zhao Z, Shi Y H, Mao X J, *et al.* Characteristics assessment and source analysis of heavy metal pollution in soil surrounding a smelter [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, **10** (4): 22-27.
- [17] 李宝磊. 某有色冶炼企业周围土壤中汞等重金属分布的特征研究 [J]. 环境工程, 2017, **35** (2): 180-183, 179.
Li B L. Distribution features of mercury and other heavy metal in soil around a non-ferrous smelting enterprise [J]. Environmental Engineering, 2017, **35** (2): 180-183, 179.
- [18] 郑影怡, 刘杰, 蒋萍萍, 等. 河池市某废弃冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征及风险评价 [J]. 环境工程, 2021, **39** (5): 238-245.
Zheng Y Y, Liu J, Jiang P P, *et al.* Pollution assessment of heavy metals in farmland soils around an abandoned smelter in Hechi, China [J]. Environmental Engineering, 2021, **39** (5): 238-245.
- [19] Li L P, Zhang Y Q, Ippolito J A, *et al.* Lead smelting effects heavy metal concentrations in soils, wheat, and potentially humans [J]. Environmental Pollution, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113641.
- [20] Shi T R, Ma J, Zhang Y Y, *et al.* Status of lead accumulation in agricultural soils across China (1979-2016) [J]. Environment International, 2019, **129**: 35-41.
- [21] Liu J J, Ma Y L, Zhang S L, *et al.* Health risk assessment of heavy metal pollution in farmland downstream of lead-zinc smelter [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **687**, doi: 10.1088/1755-1315/687/1/012057.
- [22] Guo G H, Zhang D G, Wang Y T. Probabilistic human health risk assessment of heavy metal intake via vegetable consumption around Pb/Zn smelters in southwest China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**, doi: 10.3390/ijerph16183267.
- [23] Lee P K, Yu S, Jeong Y J, *et al.* Source identification of arsenic contamination in agricultural soils surrounding a closed Cu smelter, South Korea [J]. Chemosphere, 2019, **217**: 183-194.
- [24] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准 (试行) [S].
- [25] DB 4402/T 08-2021, 土壤环境背景值 [S].
- [26] 范晓婷, 蒋艳雪, 崔斌, 等. 富集因子法中参比元素的选取方法——以元江底泥中重金属污染评价为例 [J]. 环境科学学报, 2016, **36** (10): 3795-3803.
Fan X T, Jiang Y X, Cui B, *et al.* Selection of a reference element for enrichment factor: a case study on the pollution evaluation of heavy metals in the sediment of Yuan River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36** (10): 3795-3803.
- [27] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39** (6): 611-627.
- [28] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14** (8): 975-1001.
- [29] 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.
- [30] Krachler M, Zheng J, Koerner R, *et al.* Increasing atmospheric antimony contamination in the northern hemisphere: snow and ice evidence from Devon Island, Arctic Canada [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2005, **7** (12): 1169-1176.
- [31] DB11/T 811-2011, 场地土壤环境风险评价筛选值 [S].
- [32] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 湖南省某冶炼厂周边农田土壤重金属污染及生态风险评价 [J]. 中国环境监测, 2015, **31** (3): 77-83.
Lu S J, Wang Y Y, He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils near a smelting area in Hunan Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31** (3): 77-83.
- [33] 牛学奎, 吴学勇, 侯娟, 等. 典型铅冶炼鼓风炉周边土壤重金属含量及化学形态研究 [J]. 四川环境, 2018, **37** (4): 25-28.
Niu X K, Wu X Y, Hou J, *et al.* Study on heavy metal content and chemical forms of soil around typical lead smelting blast furnace [J]. Sichuan Environment, 2018, **37** (4): 25-28.
- [34] Fan S X, Wang X D, Lei J, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in a typical Pb/Zn smelter in an arid area of northwest China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2019, **25** (7): 1661-1687.
- [35] 田刚. 清洁生产在铜冶炼行业中的应用研究 [J]. 山西冶金, 2018, **41** (3): 111-112, 118.
Tian G. Research on the application of clean production in copper smelting industry [J]. Shanxi Metallurgy, 2018, **41** (3): 111-112, 118.
- [36] Cheng X F, Danek T, Drozdova J, *et al.* Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, Southwest China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, **190** (4), doi: 10.1007/s10661-018-6574-x.
- [37] 罗谦, 李英菊, 秦樊鑫, 等. 铅锌矿区周边耕地土壤团聚体重金属污染状况及风险评估 [J]. 生态环境学报, 2020, **29** (3): 605-614.
Luo Q, Li Y J, Qin F X, *et al.* Contamination status and risk assessment of heavy metals in soil aggregates of Pb-Zn mining area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29** (3): 605-614.
- [38] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 [J]. 环境科学, 2020, **41** (12): 5410-5418.
Jiang T, Lin W W, Cao Y J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin [J]. Environmental Science, 2020, **41** (12): 5410-5418.
- [39] 孙慧, 毕如田, 郭颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析 [J]. 环境科学学报, 2018, **38** (2): 704-714.
Sun H, Bi R T, Guo Y, *et al.* Source apportionment analysis of trace metal contamination in soils of Guangdong province, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38** (2): 704-714.
- [40] Rodríguez-Salazar M T, Morton-Bermea O, Hernández-álvarez E, *et al.* The study of metal contamination in urban topsoils of Mexico City using GIS [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, **62** (5): 899-905.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)