

目次

疫情期间人为源减排对城市大气氧化性的影响	朱剑蓝, 秦墨梅, 朱嫣红, 胡建林 (617)
不同天气形势对南京地区双高污染的输送及潜在源区分析	秦阳, 胡建林, 孔海江 (626)
不同方法判定南京臭氧生成敏感区的差异	陈柑羽, 李勋, 李琳, 秦墨梅, 谢鸣捷, 王鸣, 李婧祺, 胡建林 (635)
2006~2021 年夏半年上海臭氧浓度特征及其大气环流背景分析	郑庆峰, 梁萍, 段玉森, 林燕芬, 张宋嘉, 徐卫忠 (645)
基于大气成分观测网的山西省近地面 O ₃ 体积分数分布特征	李莹, 王淑敏, 裴坤宁, 闫世明, 孙鸿博, 张逢生, 高兴艾 (655)
伊宁市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	王文婷, 谷超, 李丽明, 李新琪, 郑镇森, 耿春梅, 王晓丽, 杨文 (668)
运城市四季 VOCs 特征、来源及臭氧形成敏感物种	阴世杰, 刘新翌, 刘亚非, 李晨露, 张晨, 张欢, 王正, 程强 (678)
郑州市秋冬季污染过程中大气 VOCs 污染特征、来源解析及活性分析	赖梦洁, 张栋, 于世杰, 宋鑫帅, 李晚, 张瑞芹 (689)
郑州市 PM _{2.5} 中有机酸的污染特征、来源解析及二次生成	李子涵, 董喆, 尚瑞琪, 孔梓涵, 李晚, 张瑞芹 (700)
中国三大城市群 PM _{2.5} 浓度非线性变化分析	吴舒祺, 顾杨旸, 张天岳, 赵文吉 (709)
基于 LEAP 模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析	吴琰, 马昊, 任洪波, 郭明星, 陈鹏, 李琦芬 (721)
碳交易背景下中国华北地区碳代谢格局变化	郑宏媚, 沈方, 许光耀, 关欣 (732)
考虑区域特点和车型差异的氢燃料电池汽车全生命周期减碳预测分析	马菁, 蔡旭, 张春梅, 兰利波, 陈轶嵩, 付佩 (744)
我国主要河流水系硝态氮污染特征及定量源解析	韦英怀, 胡敏鹏, 陈丁江 (755)
不同时空尺度下土地利用结构与空间格局对苏州水质的影响	谭娟, 熊丽君, 王卿, 任志文, 朱丹丹, 王敏 (768)
深圳市 2015~2021 年雨源型河流水质时空变化及其对降雨的响应	韦必颖, 成建梅, 苏晓煜, 程天舜 (780)
河南黄河改道区浅层地下水化学特征与主控污染源解析	王帅, 任宇, 郭红, 曹文庚, 李祥志, 肖舜禹 (792)
北京西山岩溶地下水化学特征及成因分析	郭高轩, 代垠东, 许亮, 朱琳, 欧志亮, 戚琦, 辛宝东 (802)
店埠河流域地表水-地下水水化学特征及其成因分析	郑涛, 秦先燕, 吴剑雄 (813)
张家口地区枯水期地下水水化学特征及其成因机制分析	金爱芳, 殷秀兰, 李长青, 李文娟, 庞菊梅, 金晓媚 (826)
黄河中下游典型抗性细菌及抗性基因污染分布	闵威, 高明昌, 孙绍芳, 宋茜茜, 邱立平 (837)
制药废水中抗生素抗性的污染特征、检测手段和控制方法	彭安萍, 高虎, 张新波 (844)
水体组分对聚苯乙烯纳米颗粒聚沉行为的影响	汤端阳, 郑文丽, 陈关潼一, 陈思莉, 陈尧, 赵晓丽, 汪浩 (854)
富磷废弃钙基生物炭对水体中铅的去除	刘天, 吕思璐, 杜兴国, 程敏, 谢燕华 (862)
壳聚糖改性生物炭的制备及其对水溶液中 Cd ²⁺ 的吸附机制	姜凌, 安靖玥, 岳小琼, 李亚雄, 夏秋乐, 祝婷文佳, 柴丽红 (873)
硼掺杂介孔炭吸附四环素的效能与机制	邹震, 许路, 乔伟, 唐茂森, 金鹏康 (885)
磁性含磷油茶壳生物炭对水中磺胺甲噁唑的吸附特性	韩帅鹏, 唐李文, 刘勤, 林家亮, 李晓慢, 程建华, 胡勇有 (898)
广东省高分辨率温室气体排放清单及特征	卢清, 唐明双, 廖彤, 黄志炯, 钟庄敏, 宋佩珊, 沈劲, 张智胜, 梁小明, 孙家仁, 陈来国 (909)
辽河口“退塘还湿”修复区生态系统 CO ₂ 交换及其环境调控	刘思琪, 陈虹, 邢庆会, 程浩, 韩建波, 徐雪梅 (920)
生物炭施用两年后对热带地区稻菜轮作土壤 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	胡煜杰, 唐瑞杰, 胡天怡, 陈琦琦, 汤水荣, 阮延正, 孟磊 (929)
生物炭改良盐碱地研究与应用进展	魏盈, 焦乐, 张鹏, 刘福德, 肖辉, 董昱辰, 代红文 (940)
免耕对农田土壤团聚体的影响研究: Meta 分析	徐艺萍, 饶越悦, 孟艳, 温媛, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (952)
黔中喀斯特地区典型县域碳储量时空演变及多情景模拟预测: 以普定县为例	李月, 罗红芬 (961)
不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响	李越, 徐曼, 谢永红, 王颖, 黄容, 谢军, 王子芳, 高明 (974)
Ca 改性生物炭对土壤磷赋存形态影响及稳定化机制	张超, 翟付杰, 单保庆 (983)
秦岭中段不同恢复阶段弃耕农田植物多样性变化及其驱动因素	闫成龙, 薛悦, 王艺菲, 康海斌, 王得祥 (992)
我国典型制药厂污染场地中抗生素的污染特征及生态风险	杨炯彬, 黄争, 赵建亮, 何良英, 刘有胜, 胡立新, 石义静, 应光国 (1004)
广州市土壤多环芳烃污染特征及风险评估	邹子航, 陈莲, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (1015)
基于源导向的土壤重金属风险评价及管控因子分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (1026)
基于 Monte-Carlo 模拟的湖南省典型工厂周边农田土壤重金属区域潜在生态风险特征及来源解析	罗豪杰, 潘俊, 陈小霞, 张敏, 沈良辰, 李歆, 丁平, 蔡丹, 蔡立梅, 胡国成 (1038)
基于参数优化和蒙特卡罗模拟的砷污染地块健康风险评估	袁贝, 刘虎鹏, 杜平, 陈娟, 张云慧, 张昊 (1049)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析	沈智杰, 李杰芹, 李彩霞, 廖泽源, 梅楠, 罗程钟, 王定勇, 张成 (1058)
PE-Cd 复合污染土壤中 Cd 释放迁移特征及机制	王迪, 徐绍辉, 邵明艳, 林青 (1069)
氯代乙烯的厌氧微生物还原脱氯特性	李伟, 刘贵平, 刘峻, 吕良华, 乔文静, 余欣, 张晓旻, 蒋建东 (1080)
昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析	张好, 董春雨, 杨海婵, 孙思静, 韩宇, 黄祖志, 张乃明, 包立 (1090)
钝化剂对轻中度镉污染农田的安全利用效果	王晓晶, 张东明, 曹阳, 吕家琰, 代允超 (1098)
氧化石墨烯负载铁锰复合材料对镉污染土壤的钝化修复	袁婧, 吴骥子, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣, 赵科理 (1107)
关键生育期施加外源灌溉水对水稻镉吸收转运的影响	周霞, 胡雨丹, 周航, 陈琼, 谭文韬, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (1118)
外源锌对镉胁迫下玉米幼苗生长及根系构型分级的影响	张辉红, 魏畅, 柳海涛, 张静静, 刘芳, 赵颖, 张雪海, 李鸽子, 姜瑛 (1128)
稀土元素铈对镉胁迫下小麦幼苗生长的缓解效应	张静静, 徐正阳, 焦秋娟, 范丽娜, 刘芳, 赵颖, 宋佳, 化党领, 李鸽子, 柳海涛 (1141)
根施伯克氏菌对小麦镉吸收转运的两段式阻控作用	郭佳佳, 王常荣, 刘仲齐, 黄青青, 张长波, 黄永春, 薛卫杰, 孙约兵 (1150)
高密度聚乙烯微塑料与氯噻磺隆对大豆生长和根际细菌群落的复合胁迫效应	胡晓玥, 滑紫微, 姚伦广, 杜丽, 牛秋红, 李玉英, 闫路, 陈兆进, 张浩 (1161)
微塑料的人体富集及毒性机制研究进展	包亚博, 王成尘, 彭吾光, 依代倩, 向萍 (1173)
机器学习在微塑料识别与环境风险评估中的应用研究进展	白润昊, 范瑞琪, 刘琪, 刘勤, 严昌荣, 崔吉晓, 何文清 (1185)
微塑料与农田土壤中典型污染物的复合污染研究进展	侯宇晴, 李冰, 王金花, 宋文慧, 王兰君, 王军, 朱鲁生 (1196)
水中微/纳塑料电化学检测及去除的研究进展	郑伟康, 刘振中, 项晓方 (1210)
基于分布式认知理论的农户面源污染治理支付意愿影响因素	郭晨浩, 李林霏, 夏显力 (1222)

基于APCS-MLR和PMF模型的赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染源解析

沈智杰¹, 李杰芹¹, 李彩霞¹, 廖泽源¹, 梅楠², 罗程钟², 王定勇¹, 张成^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市固体废物管理中心, 重庆 401147)

摘要: 为探究重庆某赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染特征和来源, 分析土壤中8种重金属元素(Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、As、Cu和Zn)含量和空间分布特征, 利用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对土壤重金属污染特征进行评价, 并在相关性分析的基础上采用APCS-MLR和PMF模型定量解析重金属来源。结果表明, 除土壤Cr外, 其他7种重金属元素含量均值均高于重庆市土壤背景值。土壤重金属整体处于中度污染水平, 其中Cd、Hg和As为中度污染, Pb、Cu、Ni和Zn为轻度污染。土壤Cr、Ni、Pb、Cu和Zn空间分布格局相似, 相互间呈极显著正相关($P < 0.01$); Cd、Hg和As空间分布特征有较大差异, 且相互间相关性不显著($P > 0.05$)。源解析表明, 研究区土壤重金属来源较为复杂, APCS-MLR和PMF模型均能解析出4种相同的污染源, 分别为赤泥堆场渗滤排放和自然来源、火力发电排放源、农业活动与自然来源和有色金属冶炼排放源。两种模型源解析结果差异较小, APCS-MLR模型中4种污染源贡献率分别为51.8%、18.0%、15.9%和14.3%, 而在PMF模型中分别为45.9%、12.8%、21.5%和19.8%。

关键词: 赤泥堆场; 耕地土壤; 重金属; 空间分布; 源解析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)02-1058-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212191

Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models

SHEN Zhi-jie¹, LI Jie-qin¹, LI Cai-xia¹, LIAO Ze-yuan¹, MEI Nan², LUO Cheng-zhong², WANG Ding-yong¹, ZHANG Cheng^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Municipal Solid Waste Management Center, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to explore the characteristics and sources of heavy metal pollution in cultivated soil around a red mud yard in Chongqing, the content and spatial distribution characteristics of eight heavy metal elements (Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, As, Cu, and Zn) in the soil were analyzed, and the single factor pollution index method and Nemerow comprehensive pollution index method were used to evaluate the characteristics of heavy metal pollution in soil. On the basis of correlation analysis, the APCS-MLR and PMF models were used to quantitatively analyze the sources of heavy metals. The results showed that the average contents of the other seven heavy metal elements were higher than the background values of Chongqing soil, except for that of Cr. The heavy metals Cd, Hg, and As were moderately polluted, and Pb, Cu, Ni, and Zn were mildly polluted. The spatial distribution pattern of Cr, Ni, Pb, Cu, and Zn in the soil was similar, and there was a very significant positive correlation between them ($P < 0.01$). The spatial distribution characteristics of Cd, Hg, and As were significantly different, and there was no significant correlation between them ($P > 0.05$). The source apportionment showed that the sources of heavy metals in the soil in the study area were relatively complex, and the APCS-MLR and PMF models could identify the same four pollution sources, namely red mud yard percolation emission and natural sources, thermal power generation emission sources, agricultural activities and natural sources, and non-ferrous metal smelting emission sources. There was little difference in the results of source apportionment between the two models. The contribution rates of the four pollution sources in the APCS-MLR model were 51.8%, 18.0%, 15.9%, and 14.3%, respectively, whereas those in the PMF model were 45.9%, 12.8%, 21.5%, and 19.8%, respectively.

Key words: red mud yard; cultivated soil; heavy metals; spatial distribution; source apportionment

赤泥是铝土矿提炼氧化铝过程中产生的高碱性固体废物,随着铝工业的迅速发展,赤泥的积累正成为一个日益严峻的环境问题^[1]。中国是世界上最大的氧化铝生产国^[2],2021年我国氧化铝产量7 747.5万t^[3],伴随产生的赤泥高达10 846.2万t^[4]。赤泥的巨大产量使得赤泥处理成为一个挑战,但仅有10%的赤泥得到重复利用^[5],大部分赤泥直接堆放或通过筑坝堆存^[6]。这种堆存方式不仅占用了大量土地资源,而且由于赤泥碱度高、腐蚀性强以及富集重金属等有毒物质,对周边生态环境具有潜在危害。若堆场内防渗和防洪措施不规范,易在雨水冲刷和岩溶发育等自然条件下发生局部破损,赤泥中Cr、Ni、Zn和Cu

等重金属元素在降雨淋溶等作用下不断溶出,通过渗漏或直接溢出等方式进行迁移,对堆场周边环境造成影响^[7,8]。近年来频发的赤泥堆场重金属污染事件引起人们的广泛关注^[9,10],国内外学者对赤泥堆场周边环境展开了重金属污染评价和健康风险评估等相关研究^[11,12],但缺乏对污染来源的认识。因此,准确识别并量化赤泥堆场周边耕地土壤重金属来源,有利于后续针对性地开展污染防治工作。

收稿日期: 2022-12-25; 修订日期: 2023-04-18

基金项目: 重庆市生态环境局重点项目(2021-113);重庆市科技局绩效激励引导专项(cstc2022jxjl20005)

作者简介: 沈智杰(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制, E-mail: shenzhijie2022@126.com

* 通信作者, E-mail: zhcheng@126.com

当前土壤重金属污染源解析方法较多,其中绝对主成分得分-多元线性回归受体模型(APCS-MLR)和正定矩阵因子分解模型(PMF)等受体模型近年来在多种环境介质的污染物溯源中得到广泛应用^[13~15].相较于相关性分析和主成分分析这类传统多元统计方法仅能定性识别污染来源,APCS-MLR和PMF模型还能定量计算出相应贡献率,且不需要准确的源成分谱信息,在污染源分配上更加方便高效^[16,17].APCS-MLR模型是在主成分分析基础上改进得到的,通过重金属含量与APCS间的多元线性回归分析获取源贡献率^[18].而PMF模型利用不确定性对数据进行加权,并基于最小迭代二乘法将数据矩阵分解为因子贡献和因子成分谱矩阵^[19].APCS-MLR和PMF模型在源分配上各有优势,前者可以确定因子的数目,后者通过对源贡献进行非负约束得到更准确的分配结果.但是由于不同受体模型在具体原理上存在差异,源解析结果往往不同,单一受体模型的应用可能会导致结果的误判^[14,17,20].因此,APCS-MLR和PMF模型的联合使用有利于获得更准确可靠的源解析结果.

重庆直辖以来,经济发展迅速,对铝土矿等工业原料的需求量不断增大.重庆市铝土矿保有资源储量约1.3亿t,充足的铝土矿资源为氧化铝生产提供了便利条件,但因低品位矿石比重大、可利用率低,同时也造成了赤泥的大量排放和堆积.本文以重庆市某赤泥堆场周边耕地土壤为研究对象,该区域耕地和鱼塘曾长期受到赤泥堆场附近溶洞涌水影响,粮食作物和蔬菜均出现减产现象.同时,随着赤泥堆场存量的增加以及周边工业生产活动的加剧,耕地土壤可能面临更加严峻的污染风险.因此,开展赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染特征和污染来源分析,以期为重金属源头防控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于重庆市南部,属亚热带季风湿润气候,主要风向为西南风和东南风,海拔高度540~750 m,年平均气温16.5℃,年平均降雨量1245 mm^[21].研究区总面积约1430 hm²(图1),区内东北部有一个运行近20年的赤泥堆场,其东、西、北三侧均为山坡林地,南侧地势相对平坦,为一处面积约46 hm²的工业用地,场内赤泥来源于工业园区内重庆最大的氧化铝厂,年新增堆存量约占重庆当年赤泥生产量的40%^[4],现存储赤泥约300万 m³,占地面积约77 hm².堆场四周及场外均修筑有截洪沟,主要截留山坡雨水,在强降雨条件下防渗膜易发生破损,致使渗滤液透过边坡坝体进入截洪沟中,与雨水一同汇入堆场南侧河流,同时截洪沟也易发生局部破损,渗滤液在排泄途中部分外泄,直接影响沿途的耕地,且沟内水位持续上涨,也可能直接淹没沿途和下游耕地.堆场西南侧有一面积约227 hm²的集中成片耕地,主要种植水稻和玉米等作物.区内以喀斯特地貌为主,多陡岩、峡谷和溶洞,距堆场西南侧约1 km处有一地下溶洞,洞内积水呈黄褐色,主要来源于堆场内下渗的渗滤液,2018年前无引流措施,溶洞涌水直接外泄至下方耕地,2018年后修建了一条贯通耕地的沟渠用于引流,在旱季时由于堆场内渗滤液不断下渗,沟渠中渗滤液始终保持较高水位,在雨季时沟渠中渗滤液量不断增多,容易溢流,导致周边耕地被淹.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集和测定

采样前利用ArcGIS 10.8加载卫星影像,并在采样区绘制300 m×300 m的矢量网格,于网格中心位置

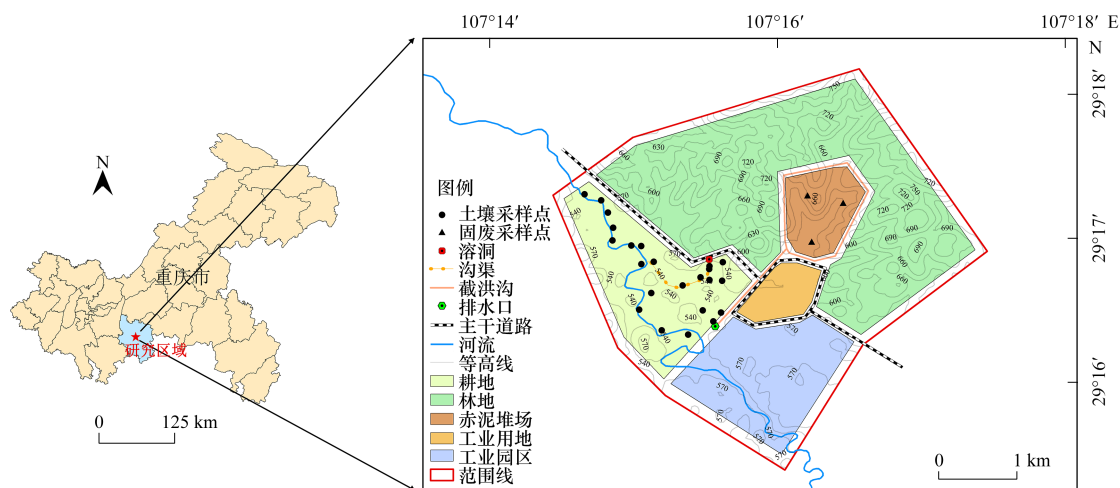


图1 研究区概况及采样点分布示意

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of sampling sites

布设采样点. 实际采样过程中, 结合前期调查资料和现场踏勘结果, 对布设点位进行合理调整, 在可能受到溶洞和截洪沟中渗滤液影响的耕地区域加密布点, 共计 23 个表层采样点, 利用 GPS 进行定位并详细记录样品和样点相关信息. 研究区采样点分布见图 1, 每个采样点依照四分法取 2 kg 的表层 (0 ~ 20 cm) 土壤装入聚乙烯塑料袋中. 所有土样运回实验室后放置在室内阴干, 待风干后剔除掉植物根系、砾石等杂物, 研磨后分别用 10 目 (2 mm) 和 100 目 (0.15 mm) 尼龙筛各自截取一部分土壤, 分别测定 pH 和重金属元素含量. 此外, 在堆场东北部、西北部和南部各采集 1 个表层赤泥样品 (图 1).

1.2.2 测定项目及方法

土壤和赤泥样品 pH 在水土比 2.5:1 的条件下使用 pH 计 (雷磁 PHB-4) 进行测定. 土壤和赤泥样品 Cd、Cr、Ni、Pb、As、Cu 和 Zn 经 HNO_3 -HF- HClO_4 前处理后用电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent 7900 ICP-MS) 进行测定. 土壤样品 Hg 含量使用直接测汞仪 (DMA-80) 进行测定; 赤泥样品 Hg 先经王水和 BrCl 前处理, 测定前 30 min 加入 200 μL 盐酸羟胺和 2 mL SnCl_2 , 然后用冷原子吸收测汞仪 (F732-VJ 型) 测定. 为了确保实验结果的准确性, 样品测试过程中实验用水均为超纯水, 试剂均为优级纯, 设置空白样, 随机选取 10% 的样品进行平行样测定, 并使用国家标准物质 GBW07405 进行质量控制, 平行样间的相对标准偏差均小于 10%, 所有样品重金属元素的加标回收率均在 90% ~ 110% 范围内.

1.3 重金属污染评价方法

采用单因子污染指数法 (P_i) 和内梅罗综合污染指数法 (P_N) 对赤泥堆场周边耕地土壤重金属污染进行全面评价. 单因子污染指数法主要对单项重金属的累积污染程度进行衡量, 而内梅罗综合污染指数法主要凸显高浓度污染物对土壤环境质量的影响^[21], 两种方法参比值均选用重庆市土壤背景值^[22], 具体计算公式和污染指数分级标准见文献^[21].

1.4 重金属源解析方法

1.4.1 绝对主成分得分-多元线性回归受体模型 (APCS-MLR)

APCS-MLR 受体模型是将主成分得分转化为绝对主成分得分 (APCS), 再以 APCS 为自变量, 各重金属含量为因变量进行多元线性回归, 利用回归系数计算出各个绝对主成分对重金属含量的贡献量, 最后求出不同来源对重金属含量的贡献率^[18]. 具体步骤如下.

首先, 对重金属含量进行标准化, 计算公式为:

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

其次, 各重金属元素引入一个含量为 0 的人为样本, 计算各重金属 0 含量样本的因子得分并转化为主成分得分, 公式如下:

$$(Z_0)_i = -\frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} = -\frac{\bar{C}_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

用标准化后的数据进行 PCA 降维, 将获取的因子得分转化为主成分得分, 减去 0 含量样本的主成分得分, 得到各重金属的 APCS, 用各重金属含量与 APCS 进行多元线性回归分析, 得到如下的回归方程:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{k=1}^p b_{ki} \times \text{APCS}_k \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 中, C_{ij} 为第 j 个样本中重金属 i 的含量; $\bar{C}_i$ 为重金属 i 的平均含量; σ_i 为重金属 i 的标准差; b_{i0} 为回归方程的常数项; b_{ki} 为源 k 对重金属 i 的回归系数; $b_{ki} \times \text{APCS}_k$ 表示源 k 对 C_i 的贡献量; 所有样本 $b_{ki} \times \text{APCS}_k$ 的平均值表示源 k 对 C_i 的平均绝对贡献量.

在计算污染源贡献过程中可能会出现负值, 影响污染源贡献率分配的准确性^[23]. 为了解决该问题, 本研究采用绝对值法, 将所有负值转化为积极贡献^[24]. 源 k 对重金属 i 贡献率的计算公式为:

$$\text{RC}_{ki} = \frac{|b_{ki} \times \overline{\text{APCS}_k}|}{\sum_{k=1}^p |b_{ki} \times \overline{\text{APCS}_k}|} \quad (4)$$

1.4.2 正定矩阵因子分解模型 (PMF)

PMF 是美国环境保护署 (USEPA) 推荐的一种源分配工具, 最早由 Paatero 等在 1994 年开发^[19]. 该模型基于最小二乘法将样本浓度数据矩阵 (X) 分解为因子贡献矩阵 (G) 和因子成分谱矩阵 (F), 再根据测量得到的成分谱信息和受体周边污染物的排放清单确定对样本有贡献的源类型. 基本公式如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (5)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个重金属元素的含量; g_{ik} 为源 k 对第 i 个样品的贡献; f_{kj} 为源 k 中第 j 个重金属元素的含量; e_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个重金属元素的残差.

因子贡献和因子成分谱可以通过最小化 PMF 模型中的目标函数 Q 来确定, 计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (6)$$

式中, u_{ij} 为第 i 个土壤样品中重金属元素 j 的不确定度, 不确定度 u_{ij} 计算公式如下:

$$u_{ij} = \frac{5}{6} \times \text{MDL}, X_{ij} \leq \text{MDL} \tag{7}$$

$$u_{ij} = \sqrt{\left(\text{RSD} \times X_{ij}\right)^2 + \left(0.5 \times \text{MDL}\right)^2}, X_{ij} > \text{MDL} \tag{8}$$

式中,RSD为重金属元素含量的相对标准偏差;MDL为重金属含量测定的方法检出限,本研究Cd、Cr、Hg、Ni、Pb、As、Cu和Zn方法检出限分别为0.01、3.0、0.002、1.5、2.0、2.0、1.5和2.0 mg·kg⁻¹.

1.5 数据处理与分析

数据统计分析由 Microsoft Excel 2016 完成,相关性分析、PCA 和 APCS-MLR 模型由 SPSS 26.0 软件完成,图件绘制由 ArcGIS 10.8 和 Origin 2018 软件完成,PMF 源解析由 EPA PMF 5.0 软件完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤及赤泥重金属含量

研究区土壤 pH 和重金属含量统计结果见表 1. 研究区土壤以弱碱性为主,pH 介于 5.59~8.30 之间. 土壤 ω(Cd)、ω(Cr)、ω(Hg)、ω(Ni)、ω(Pb)、ω(As)、ω(Cu)和 ω(Zn)平均值分别为 0.29、73.8、0.13、34.2、31.8、11.0、30.9 和 82.3 mg·kg⁻¹,与重庆市土壤背景值^[22]相比,除 Cr 以外,Cd、Hg、Ni、Pb、As、Cu 和 Zn 平均值分别为背景值的 2.61、2.22、1.07、1.22、2.20、1.19 和 1.03 倍,其中 Cd、Hg 和 As 存在明显富集. 与文献[25]的风险筛选值相比,Cd 存在超标现象,超标率为 21.7%,大部分超标点位为稻

田且 pH>7,可能与淹水条件下 Cd 容易形成难溶于水的 CdS,难以发生迁移而在原地沉淀有关^[26]. 表明研究区土壤 Cd 存在一定的环境风险,是需要重点关注的污染物. 与国内其他赤泥堆场周边土壤重金属含量(表 1)相比,研究区大部分土壤重金属含量较高. 其中,研究区土壤 Cd、Pb、As、Cu 和 Zn 含量均高于河南赤泥堆场^[27]和山西赤泥堆场^[28] 周边土壤,Cr、Hg 和 Ni 含量低于河南赤泥堆场,高于山西赤泥堆场. 变异系数可以反映土壤元素在空间上的变化程度与均匀性,其大小与人类活动干扰程度成正比^[29]. 研究区土壤重金属变异系数大小依次为: Cd>Ni>Hg=Cu>As>Pb>Zn>Cr,其中 Cd、Ni、Hg 和 Cu 的变异系数相比其他重金属较高,可能受人为因素影响更大.

赤泥中 Cd、Cr 和 As 含量均高于土壤(表 1),其他 5 种重金属含量低于土壤. 有研究表明,在酸性雨水淋溶条件下赤泥中的重金属元素更容易浸出且具有较高的迁移率^[30,31]. Yao 等^[20]研究也发现,历史遗留煤矸石和矿渣 Cd 含量虽然显著低于周边耕地土壤,但通过同位素示踪表明土壤 Cd 累积明显受到遗留固废的长期渗漏影响. 重庆夏季雨水较多,普遍呈弱酸性,赤泥中的重金属不断浸出,随地表径流迁移至土壤中. 研究区土壤曾长达近 20 年时间受溶洞涌水影响,可能导致重金属在土壤中不断积累,甚至会高于赤泥.

表 1 研究区土壤及赤泥重金属含量统计¹⁾/mg·kg⁻¹

Table1 Statistics of heavy metal content in soil and red mud of the study area/mg·kg ⁻¹											
统计值		pH	Cd	Cr	Hg	Ni	Pb	As	Cu	Zn	文献
土壤 (n = 23)	最小值	5.59	0.14	61.1	0.06	16.2	20.7	6.71	16.7	55.9	本研究
	最大值	8.30	0.57	90.6	0.25	58.0	45.5	17.9	52.2	112	
	平均值	—	0.29	73.8	0.13	34.2	31.8	11.0	30.9	82.3	
	标准差	—	0.11	8.14	0.04	12.5	8.16	3.06	10.0	18.6	
	变异系数/%	—	37.4	11.0	32.5	36.6	25.7	27.8	32.5	22.6	
赤泥 (n = 3)	最小值	12.2	0.50	259	0.08	15.5	26.3	9.40	25.9	9.30	
	最大值	12.9	0.70	317	0.12	19.1	30.8	17.3	30.3	12.8	
	平均值	—	0.60	287	0.10	16.7	28.7	12.1	27.7	11.2	
重庆市土壤背景值		—	0.11	80	0.06	32	26	5	26	80	[22]
风险筛选值	≤ 5.5	0.3	250	0.5	60	80	30	50	200	[25]	
		0.3	150	1.3		70	40				
	5.5 ~ 6.5	0.4	250	0.5	70	100	30	50	200		
		0.3	150	1.8		90	40				
	6.5 ~ 7.5	0.6	300	0.6	100	140	25	100	250		
		0.3	200	2.4		120	30				
	> 7.5	0.8	350	1.0	190	240	20	100	300		
		0.6	250	3.4		170	25				
河南某赤泥堆场土壤		—	0.05	118	0.16	37.0	14.1	7.97	24.0	74.0	[27]
山西某赤泥堆场土壤		—	0.07	55.4	0.06	29.2	18.2	3.38	26.4	67.8	[28]

1) “—”表示无相关数据,水田 Cu 和旱地所有重金属评价按照风险筛选值中“其他”标准执行,不同 pH 范围下两行风险筛选值分别对应水田和旱地

2.2 土壤重金属元素含量空间分布

利用反距离权重插值法(IDW)获取的研究区土壤pH和重金属含量空间分布见图2. 土壤pH高值区主要分布在区域中部、南部和西北部,其中位于中部的高值区主要分布在沟渠相邻两侧,可能与雨季受到沟渠溢流淹没影响有关;位于南部的高值区主要分布在沟渠南侧低地势区域及堆场外截洪沟西侧区域,可能与堆场防渗防洪设施破损,导致渗滤液直接外泄并通过地表径流持续对下游造成影响有关.

土壤Cr、Ni、Pb、Cu和Zn空间分布格局相似,高值在区域内呈东北至西南方向的条带状分布,其中明显的高值聚集区分布于沟渠相邻两侧、沟渠南侧低地势区域以及堆场外截洪沟中渗滤液汇入河流的下游区域. 有研究表明,渗滤液中的重金属随地表径流进入土壤后,Cr、Ni、Pb、Cu和Zn由于能被土壤当中的一些组分还原、结合或吸附,从而在土壤中固定下来^[32-34]. 因此研究区土壤Cr、Ni、Pb、Cu和Zn的高

值区与渗滤液地表径流作用有关. Cd、Hg和As空间分布特征各不相同,说明这3种元素的来源可能有较大差异. Cd的高值区主要分布在区域西北部和南部, Hg的高值区主要分布在区域西部, As的高值区主要分布在区域西北部、中部和南部,且As的空间分布特点与其他重金属相比具有明显的连续性.

2.3 土壤重金属污染评价

研究区土壤重金属污染评价结果如图3所示. 8种重金属单因子污染指数(P_i)均值从大到小依次为: Cd(2.61) > Hg(2.22) > As(2.20) > Pb(1.22) > Cu(1.19) > Ni(1.07) > Zn(1.03) > Cr(0.92), Cd、Hg和As表现为中度污染($2 < P_i \leq 3$), Pb、Cu、Ni和Zn表现为轻度污染($1 < P_i \leq 2$), Cr表现为无污染($P_i \leq 1$). 其中, Cd处于重度、中度和轻度污染水平的点位分别为30.4%、47.8%和21.7%; Hg、As处于重度、中度和轻度污染水平的点位分别为13.0%、47.8%和39.1%; Cu处于中度、轻度和无污染水平的采样点占

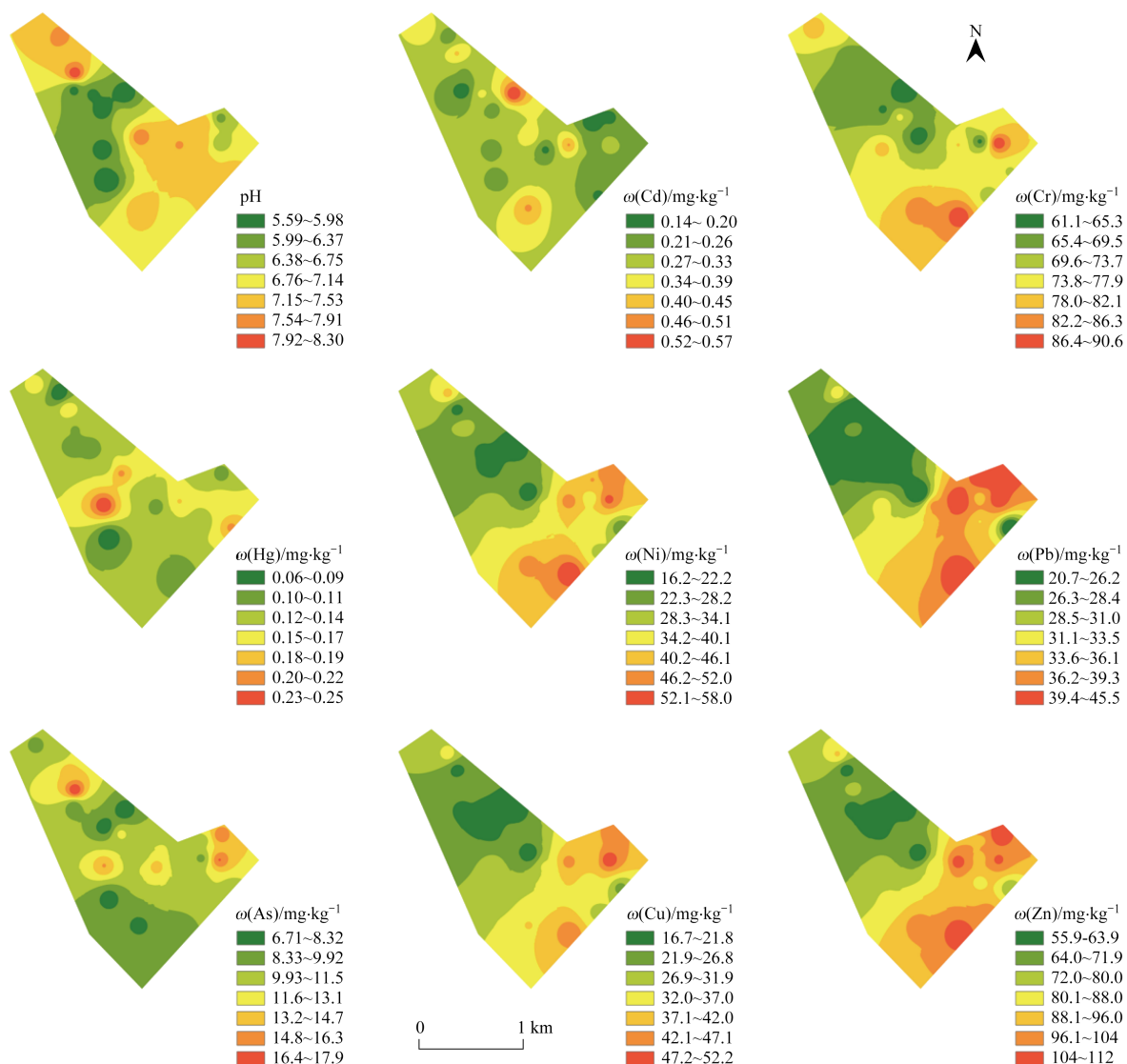


图2 土壤pH和重金属元素含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil pH and heavy metal content

比分别为 4.3%、60.9% 和 34.8%；Pb 处于轻度 and 无污染水平的采样点占比分别为 65.2% 和 34.8%，Ni 为 60.9% 和 39.1%，Zn 为 52.2% 和 47.8%，Cr 为 21.7% 和 78.3%。内梅罗综合污染评价结果表明，所

有采样点 P_N 介于 1.47 ~ 3.86 之间， P_N 均值为 2.43，表明研究区土壤整体处于中度污染水平。其中，处于重度、中度和轻度污染水平的采样点占比分别为 17.4%、52.2% 和 30.4%。

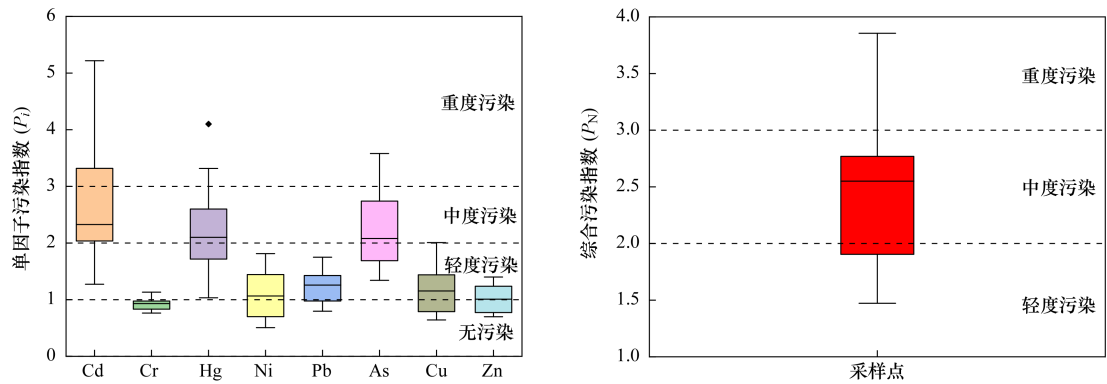


图 3 单因子污染指数法和内梅罗污染指数法评价结果
Fig. 3 Evaluation results of single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index

总体而言，研究区耕地土壤重金属已出现明显累积，除直接受到赤泥堆场渗滤液排放影响外，还可能与周边密集的工业布局有关。土壤样点处于常年主导风向（东南风）的下风向，可能受到工业园区内有色金属冶炼厂和燃煤电厂等企业生产活动的影响。目前赤泥堆场仍在使⽤，园区内不断新建或迁入工业企业，后续随着赤泥堆存量的增加以及工业活动的加剧，耕地土壤可能面临更加严峻的环境风险。因此，亟需对耕地土壤重金属进行溯源，为受污染耕地土壤重金属源头防控提供理论依据。

2.4 土壤重金属来源解析

2.4.1 相关性分析

有研究表明，来源相同或相似的重金属元素之间相关性较为显著^[35]。研究区土壤重金属 Pearson 相关性分析结果表明（图 4），土壤 Cr、Ni、Pb、Cu 和 Zn 相互间呈极显著正相关（ $P < 0.01$ ），说明这些元素具有相似污染来源。Cd、Hg 和 As 相互间相关性不显著（ $P > 0.05$ ），与其它重金属也无显著相关性（ $P > 0.05$ ），且前文发现 Cd、Hg 和 As 空间分布特征也存在较大差异，进一步说明土壤 Cd、Hg 和 As 来源可能各不相同。

2.4.2 APCS-MLR 模型

将原始数据标准化处理后进行 KMO 检验和 Bartlett 检验，结果分别为 0.75 和 0.00，说明数据适合进行主成分分析（PCA）。结合相关性分析结果，采用 Varimax 法提取 4 个主成分，累积贡献率高达 94.37%（表 2），旋转后各重金属元素在各主成分上的因子载荷如图 5 所示，其中因子载荷 > 0.75 、 $0.75 \sim 0.5$ 和 $0.5 \sim 0.3$ 分别对应强载荷、中等载荷和弱载荷^[36]。第

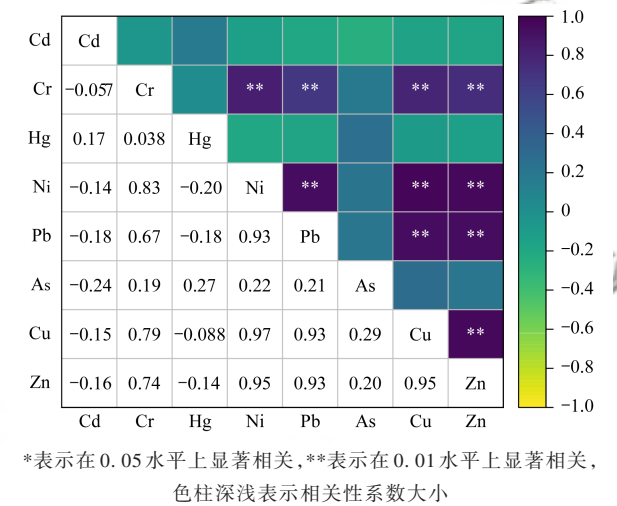


图 4 土壤重金属含量 Pearson 相关系数
Fig. 4 Pearson correlation coefficient of heavy metal contents

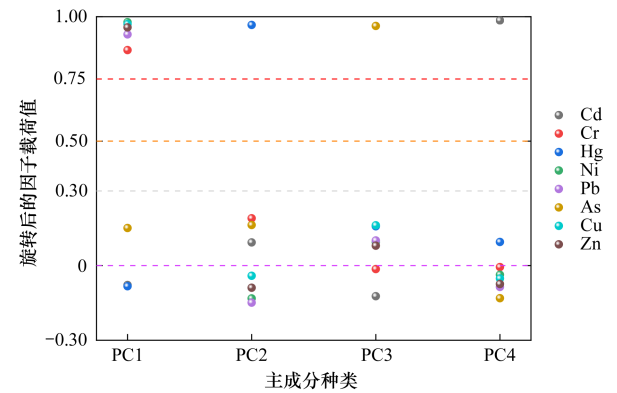


图 5 旋转后的因子载荷矩阵
Fig. 5 Factor loading matrix after rotation

一主成分（PC1）的贡献率为 55.78%，其中 Cr、Ni、Pb、Cu 和 Zn 均为强载荷。第二主成分（PC2）、第三主成分（PC3）和第四主成分（PC4）的贡献率分别为

表2 土壤重金属特征值和累积贡献率¹⁾

Table2 Characteristic values and cumulative contribution of heavy metals in soil

主成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.61	57.60	57.60	4.61	57.60	57.60	4.46	55.78	55.78
2	1.29	16.08	73.68	1.29	16.08	73.68	1.06	13.20	68.97
3	1.12	14.02	87.71	1.12	14.02	87.71	1.02	12.73	81.71
4	0.53	6.67	94.37	0.53	6.67	94.37	1.01	12.66	94.37
5	0.33	4.15	98.52	—	—	—	—	—	—
6	0.07	0.84	99.36	—	—	—	—	—	—
7	0.04	0.43	99.79	—	—	—	—	—	—
8	0.02	0.21	100.00	—	—	—	—	—	—

1) “—”表示无相关数据

13.20%、12.73%和12.66%, Hg、As和Cd分别在PC2、PC3和PC4上为强载荷。

在PCA识别潜在污染源的基础上,利用APCS-MLR模型计算出各重金属元素的贡献率(图6)。Cr、Ni、Pb、Cu和Zn主要受PC1影响,贡献率分别为80.5%、78.8%、73.5%、79.2%和79.8%。相关性分析结果也表明这些元素具有相似污染来源。从重金属含量空间分布上看,这些元素的高值区均分布于沟渠相邻两侧、沟渠南侧低地势区域以及堆场外截洪沟中渗滤液汇入河流的下游区域,且含量普遍高于重庆市土壤背景值。有研究表明,赤泥中Pb、Cr和Ni等重金属部分存在于交换态和碳酸盐结合态中,易随pH下降从赤泥中释放出来进入环境^[37]。重庆雨水较多,且降雨常为弱酸性,赤泥中Pb、Cr和Ni等重金属稳定性较差,容易被雨水溶出,迁移至周边环境。同时,现场调查发现,在未修建沟渠前渗滤液直接外泄至下方耕地,修建沟渠后雨季仍然存在渗滤液溢流进入耕地等情况,且堆场运行近20年,渗滤液长期持续渗入可能导致土壤中重金属含量增加^[21]。此外Cr等元素在渗滤液影响之外的西北部区域分布比较均匀,且均低于重庆市土壤背景值,可能与土壤成土母质有关。因此,综合判定PC1为赤泥堆场渗滤液排放与自然来源。

PC2对Hg的贡献率较高,为74.2%。Hg平均含量是重庆市土壤背景值的2.22倍,有研究表明工矿企业附近土壤中汞累积主要与煤燃烧有关^[38]。孙雪菲等^[39]研究了某典型石化工业城市土壤重金属的空间分布和污染来源,发现Hg主要来自于煤炭燃烧。黄华斌等^[40]的研究也显示,燃煤汞释放是土壤中Hg富集的重要来源。研究区的主要风向为东南风,在其上风向分布有火力发电企业,工业锅炉和电厂锅炉等燃烧设施在燃煤过程中释放出大量的Hg,经大气沉降和降雨溶解等途径进入土壤,且Hg具有易挥发和长距离传输等特点,进入大气界面发生扩散,进而通

过沉降作用形成面源污染^[41],导致了研究区Hg含量空间离散程度较大。因此,PC2主要为火力发电排放源。

PC3对As的贡献率较高,为68.4%。As平均含量是重庆市土壤背景值的2.20倍,空间分布特征相较于其他重金属具有明显的连续性,且与其他重金属无显著相关性,污染来源有一定差异。据调查,研究区曾大量使用化肥(主要为氮肥、磷肥和复合肥)和农药(主要为杀虫剂和除草剂),且施用量超过全国平均水平^[42]。有研究表明,含砷的氮肥、磷肥及杀虫剂、除草剂长期施用后剩余的残留物在土壤中滞留并逐渐积累,造成土壤As累积^[43,44]。同时,研究区属于喀斯特地貌,该地区岩石中As含量显著高于其他岩石,在成土过程中可能会导致土壤As含量偏高^[45,46]。因此,推测土壤As含量可能跟当地农业活动和成土母质有关,PC3主要为农业活动与自然来源。

PC4对Cd的贡献率相对较高,为77.0%。Cd变异系数最高,平均含量是重庆市背景值的2.61倍,与其他重金属均无显著相关性,可能有不同的污染来源。有研究表明,工矿企业的“三废”排放对土壤Cd累积有重要影响^[47]。周亚龙等^[48]研究了雄安新区农田土壤重金属的污染来源,发现Cd主要来源于有色金属熔炼厂等工业源。Yang等^[49]研究也发现土壤Cd主要来自工业排放。研究区耕地处于工业园区下风向,园区内建有重庆最大的氧化铝厂和数家小型有色金属冶炼厂,在焙烧、熔炼和电解等工艺流程中产生大量废气,通过气流扩散和沉降等作用进入土壤。因此,土壤Cd累积可能与附近的工业生产活动有关,PC4主要为有色金属冶炼排放源。

2.4.3 PMF模型

为了进一步验证APCS-MLR模型源解析结果,采用PMF模型对土壤中8种重金属进行定量源解析。选择3~5个因子数分别进行100次起点随机的迭代运算,最终确定因子数为4时, Q_{Robust} 和 Q_{True} 最为

接近(Q_{True} 为计算的拟合优度参数, Q_{Robust} 为不包括模型不拟合点的计算的拟合优度参数),所有样本残差均在 $-3 \sim 3$ 之间,表明模型解析结果具有较好的可信度。

根据 PMF 模型计算出各污染源对土壤重金属的贡献率(图 6)。Cr、Ni、Pb、Cu 和 Zn 主要受第一主因子(F1)影响,贡献率分别为 44.2%、69.0%、58.1%、63.8% 和 56.3%。有研究表明,赤泥中 Pb、Cr 和 Cu 等重金属在酸雨淋溶下容易解吸和迁移^[50]。土壤 Cr 和 Cu 等元素的高值区主要分布在沟渠相邻两侧、沟渠南侧低地势区域以及堆场外截洪沟中渗滤液汇入河流的下游区域,主要受赤泥堆场渗滤液影响,其他区域 Cr 等元素含量低于重庆市土壤背景值,主要与土壤母质有关。因此,F1 主要为赤泥堆场渗滤排放和自然来源。第二主因子(F2)对 Hg 的贡献率较高,为 42.5%。王越等^[51]研究了粤北某典型工矿区土壤重金

属的富集特征和污染来源,发现 Hg 主要来源于火力发电等工业活动。研究区内火力发电厂在燃煤过程中产生的废气含有大量的 Hg,导致 Hg 在土壤中富集。因此,F2 可以被确定为火力发电排放源。第三主因子(F3)对 As 的贡献率较高,为 51.5%。含 As 的金属离子具有杀灭和抑制病原体活性的作用,其配合物是农药制备中应用最多的无机抗菌剂,另外,有机砷农药也在农业生产中被广泛应用,农药在土壤中残留是 As 的主要来源^[52,53]。同时,研究区成土母质主要为石灰岩,可能导致成土过程中 As 含量较高^[54]。因此,综合判定 F3 为农业活动与自然来源。第四主因子(F4)对 Cd 的贡献率相对较高,为 51.8%。有研究表明,Cd 是工业“三废”排放的标志性元素^[55],工业园区内有规模较大的有色金属冶炼企业,工业活动中排放的“三废”可能造成土壤中 Cd 含量积累。因此,将 F4 判定为有色金属冶炼排放源。

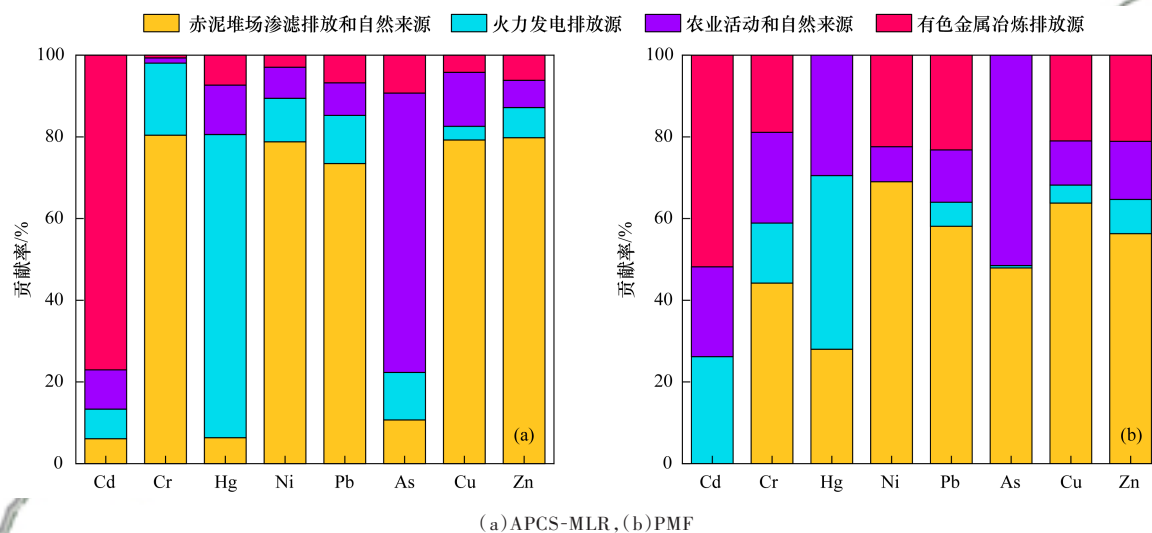


图 6 土壤重金属污染源贡献率

Fig. 6 Contribution rate of soil heavy metal pollution sources

2.4.4 两种模型源解析结果比较

为评估 APCS-MLR 和 PMF 模型在土壤重金属源解析中的适用性,进一步分析重金属预测值与实测值的比值(P/O)以及决定系数(R^2)(表 3),当 P/O 接近 1 且 R^2 大于 0.5 时,源分配结果被认为是可靠的^[56]。结果表明两种模型预测值与实测值拟合良好,除 Cr

外,其他重金属 R^2 均大于 0.9,说明源解析结果可靠性较高。

采用 APCS-MLR 和 PMF 模型进一步计算出不同污染源对土壤重金属的平均贡献率(图 7)。两种模型均得到了相同的源识别结果(赤泥堆场渗滤排放和自然来源、火力发电排放源、农业活动与自然来源

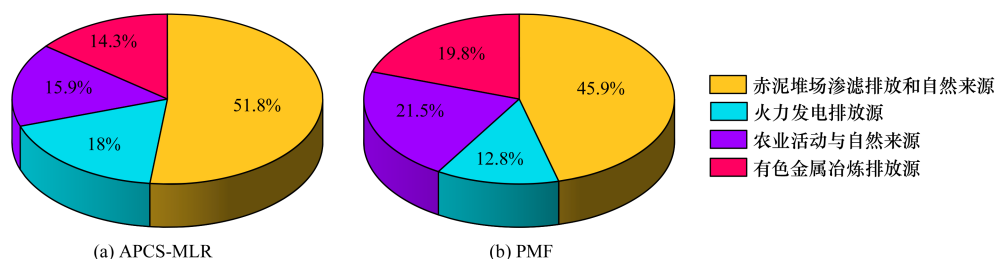


图 7 土壤重金属污染源平均贡献率

Fig. 7 Average contribution rate of soil heavy metal pollution sources

和有色金属冶炼排放源),但在各污染源贡献率量化上存在一定差异. 在APCS-MLR模型中,赤泥堆场渗滤排放和自然来源、火力发电排放源、农业活动与自然来源和有色金属冶炼排放源的平均贡献率分别为51.8%、18.0%、15.9%和14.3%;而在PMF模型中,4种污染源的贡献率分别为45.9%、12.8%、21.5%和19.8%. 这主要是因为两种模型基本原理不

同,APCS-MLR模型是通过降维手段获取少数能够解释数据集主要信息的独立因子(污染源),再通过线性回归计算出各污染源的贡献率;而PMF模型是通过评估数据集中每个点的误差,以此来确定最优的污染源数目及相应贡献率. 总体来看,两种模型源解析结果差异较小,可以相互补充和验证,能为后期管理部门制定土壤重金属源头管控措施提供理论支撑.

表3 APCS-MLR与PMF模型的实测值与预测值
Table3 Observed and predicted values of APCS-MLR and PMF models

重金属	实测值(O)	APCS-MLR			PMF		
		预测值(P)	P/O	R ²	预测值(P)	P/O	R ²
Cd	0.29±0.11	0.29±0.11	1.00	1.00	0.29±0.10	1.00	1.00
Cr	73.76±8.14	73.76±7.22	1.00	0.79	73.02±11.41	0.99	0.57
Hg	0.13±0.04	0.13±0.04	1.00	0.98	0.13±0.04	1.00	0.99
Ni	34.23±12.54	34.23±12.44	1.00	0.99	33.77±11.37	0.99	0.97
Pb	31.80±8.16	31.80±7.75	1.00	0.90	31.53±8.03	0.99	0.91
As	11.02±3.06	11.02±3.05	1.00	0.99	10.99±2.88	1.00	1.00
Cu	30.95±10.05	30.95±9.90	1.00	0.97	30.57±8.85	0.99	0.96
Zn	82.34±18.64	82.34±18.04	1.00	0.94	82.20±19.23	1.00	0.94

3 结论

(1)研究区土壤除Cr外,其他7种重金属均存在一定的累积. 研究区土壤重金属整体处于中度污染水平,其中,Cd、Hg和As为中度污染,Pb、Cu、Ni和Zn为轻度污染.

(2)土壤Cr、Ni、Pb、Cu和Zn空间分布特征相似,且相互间具有极显著相关关系,具有相似的污染来源;土壤Cd、Hg和As存在不同的空间分布特征,且相互间相关性不显著,具有不同的污染来源.

(3)研究区土壤重金属来源较为复杂,APCS-MLR和PMF模型均识别出4种相同的污染源,分别为赤泥堆场渗滤排放和自然来源、火力发电排放源、农业活动与自然来源和有色金属冶炼排放源,两种模型源解析结果差异较小,可以相互补充和验证.

参考文献:

- [1] Wang M F, Liu X M. Applications of red mud as an environmental remediation material: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **408**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124420.
- [2] Liu W C, Chen X Q, Li W X, *et al.* Environmental assessment, management and utilization of red mud in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, **84**: 606-610.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [4] Wang K, Dou Z H, Liu Y, *et al.* Summary of research progress on separation and extraction of valuable metals from Bayer red mud [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29** (60): 89834-89852.
- [5] Ujaczki É, Feigl V, Molnár M, *et al.* Re-using bauxite residues: benefits beyond (critical raw) material recovery [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2018, **93** (9): 2498-2510.
- [6] Agrawal S, Dhawan N. Evaluation of red mud as a polymetallic source - a review [J]. *Minerals Engineering*, 2021, **171**, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107084.
- [7] Ren J, Chen J, Han L, *et al.* Spatial distribution of heavy metals, salinity and alkalinity in soils around bauxite residue disposal area [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 1200-1208.
- [8] Xue S G, Kong X F, Zhu F, *et al.* Proposal for management and alkalinity transformation of bauxite residue in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23** (13): 12822-12834.
- [9] Renforth P, Mayes W M, Jarvis A P, *et al.* Contaminant mobility and carbon sequestration downstream of the Ajka (Hungary) red mud spill: The effects of gypsum dosing [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 253-259.
- [10] Uzingier N, Anton Á D, Ötvös K, *et al.* Results of the clean-up operation to reduce pollution on flooded agricultural fields after the red mud spill in Hungary [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22** (13): 9849-9857.
- [11] 郭颖, 李玉冰, 薛生国, 等. 广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (7): 3349-3357.
- [12] Zhang R Y, Zhang Z, Wu J, *et al.* Spatial characteristics and risk assessment of heavy metals in the soil-vegetation system of a red mud slag yard, SW China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, **109** (1): 122-129.
- [13] Jain S, Sharma S K, Vijayan N, *et al.* Investigating the seasonal variability in source contribution to PM_{2.5} and PM₁₀ using different receptor models during 2013-2016 in Delhi, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28** (4): 4660-4675.
- [14] Proshad R, Kormoker T, Al M A, *et al.* Receptor model-based source apportionment and ecological risk of metals in sediments of an urban river in Bangladesh [J]. *Journal of Hazardous Materials*,

- 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127030.
- [15] Hua C Y, Zhuo H M, Kang A L, *et al.* Contamination, risk assessment and source apportionment of the heavy metals in the soils of apple orchard in Qixia City, Shandong Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2022, **36**(9): 2581-2595.
- [16] Cao Y X, Xin M, Wang B D, *et al.* Spatiotemporal distribution, source, and ecological risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the urbanized semi-enclosed Jiaozhou Bay, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137224.
- [17] Li Y Y, Gao B, Xu D Y, *et al.* Hydrodynamic impact on trace metals in sediments in the cascade reservoirs, North China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **716**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136914.
- [18] Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston [J]. *Atmospheric Environment*, 1987, **21** (1): 257-259.
- [19] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [20] Yao C, Shen Z J, Wang Y M, *et al.* Tracing and quantifying the source of heavy metals in agricultural soils in a coal gangue stacking area: Insights from isotope fingerprints and receptor models [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **863**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160882.
- [21] 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 等. 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矿山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2192-2203.
- Ma J, Shen Z J, Zhang P P, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in farmland soils around the gangue heap of coal mine based on APCS-MLR and PMF receptor model [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2192-2203.
- [22] Li S Y, Jia Z M. Heavy metals in soils from a representative rapidly developing megacity (SW China): levels, source identification and apportionment [J]. *CATENA*, 2018, **163**: 414-423.
- [23] Li N, Li Y, Wang G M, *et al.* The sources risk assessment combined with APCS/MLR model for potentially toxic elements in farmland of a first-tier city, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(33): 50717-50726.
- [24] 李军, 李旭, 高世刚, 等. 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的燃煤电厂周边土壤潜在有毒元素(PTEs)污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(10): 5689-5703.
- Li J, Li X, Gao S G, *et al.* Contamination characteristics and source apportionment of potentially toxic elements in soil around the coal-fired power plant based on APCS-MLR and PMF models [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(10): 5689-5703.
- [25] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S].
- [26] 汪鹏, 赵方杰. 土壤-水稻系统中镉迁移与阻控[J]. *南京农业大学学报*, 2022, **45**(5): 990-1000.
- Wang P, Zhao F J. The transfer and control of cadmium in the soil-rice systems [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2022, **45**(5): 990-1000.
- [27] 孙鑫, 宁平, 唐晓龙, 等. 河南陕县赤泥库周边土壤重金属污染评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, **43** (5): 122-128.
- Sun X, Ning P, Tang X L, *et al.* Heavy metals pollution assessment in soil surrounding red mud ponds in Shaanxian, Henan [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, **43**(5): 122-128.
- [28] 王芮. 赤泥库周边土壤重金属含量测定及生态环境风险评价探讨[J]. *节能与环保*, 2020, (7): 26-28.
- Wang R. Determination of heavy metal content in soil around red mud reservoir and discussion on ecological environment risk assessment [J]. *Energy Conservation and Environmental Protection*, 2020, (7): 26-28.
- [29] 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. *环境化学*, 2015, **34**(12): 2248-2256.
- Chen X M, Zhu B H, Yang W, *et al.* Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun Reservoir upstream, Beijing, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(12): 2248-2256.
- [30] Anton A, Rékási M, Uzinger N, *et al.* Modelling the potential effects of the Hungarian red mud disaster on soil properties [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2012, **223**(8): 5175-5188.
- [31] Burke I T, Mayes W M, Peacock C L, *et al.* Speciation of arsenic, chromium, and vanadium in red mud samples from the Ajka spill site, Hungary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(6): 3085-3092.
- [32] Luo L Q, Chu B B, Liu Y, *et al.* Distribution, origin, and transformation of metal and metalloid pollution in vegetable fields, irrigation water, and aerosols near a Pb-Zn mine [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(13): 8242-8260.
- [33] Kim J, Hyun S. Nonequilibrium leaching behavior of metallic elements (Cu, Zn, As, Cd, and Pb) from soils collected from long-term abandoned mine sites [J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 150-158.
- [34] Ruyters S, Mertens J, Vassilieva E, *et al.* The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(4): 1616-1622.
- [35] 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 186-193.
- Mao Z G, Gu X H, Lu X M, *et al.* Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 186-193.
- [36] Huang F, Wang X Q, Lou L P, *et al.* Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques [J]. *Water Research*, 2010, **44**(5): 1562-1572.
- [37] Townsend T G, Jang Y C, Tolaymat T. Leaching tests for evaluating risk in solid waste management decision making [M]. Florida: Florida Department of Environmental Protection, 2003.
- [38] 李娇, 陈海洋, 滕彦国, 等. 拉林河流域土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(19): 226-233.
- Li J, Chen H Y, Teng Y G, *et al.* Contamination characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Lalin River basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(19): 226-233.
- [39] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical

- petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [40] 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 等. 基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 430-437.
- Huang H B, Lin C Q, Hu G R, *et al.* Source appointment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong River basin based on positive matrix factorization[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 430-437.
- [41] 卫晓锋, 孙紫坚, 陈自然, 等. 基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3585-3599.
- Wei X F, Sun Z J, Chen Z R, *et al.* Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in mineral resource base based on soil parent materials[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3585-3599.
- [42] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [43] Jiang H H, Cai L M, Wen H H, *et al.* Characterizing pollution and source identification of heavy metals in soils using geochemical baseline and PMF approach[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-63604-5.
- [44] Liu H W, Zhang Y, Zhou X, *et al.* Source identification and spatial distribution of heavy metals in tobacco-growing soils in Shandong province of China with multivariate and geostatistical analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(6): 5964-5975.
- [45] Micó C, Recatalá L, Peris M, *et al.* Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis[J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5): 863-872.
- [46] 曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 等. 贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(1): 102-113.
- Zeng Q Q, Fu T L, Zou H Q, *et al.* Spatial distribution characteristics and sources of heavy metals in soil in a pepper growing area of county in Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(1): 102-113.
- [47] 赵靓, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- Zhao L, Liang Y P, Chen Q, *et al.* Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in North China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [48] 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 等. 雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- Zhou Y L, Yang Z B, Wang Q L, *et al.* Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong'an New district [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2003-2015.
- [49] Yang S Y, He M J, Zhi Y Y, *et al.* An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities [J]. *Environment International*, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105239.
- [50] Ghosh I, Guha S, Balasubramaniam R, *et al.* Leaching of metals from fresh and sintered red mud [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **185**(2-3): 662-668.
- [51] 王越, 莫莉, 余新晓, 等. 粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1636-1645.
- Wang Y, Mo L, Yu X X, *et al.* Enrichment characteristics, source apportionment, and risk assessment of heavy metals in the industrial and mining area of northern Guangdong Province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1636-1645.
- [52] Xu C L, Shan Y P, Bilal M, *et al.* Copper ions chelated mesoporous silica nanoparticles via dopamine chemistry for controlled pesticide release regulated by coordination bonding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **395**, doi: 10.1016/j.cej.2020.125093.
- [53] Li Z, Wang Y, Ni Y N, *et al.* Unmodified silver nanoparticles for rapid analysis of the organophosphorus pesticide, dipterex, often found in different waters[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, **193**: 205-211.
- [54] 郑武. 广西桂东北地区农业土壤环境若干重金属元素背景值的调查[J]. *农村生态环境*, 1993, (4): 39-42.
- Zheng W. Study on background values of some heavy metal in agricultural soils of Northeast Guangxi province [J]. *Rural Eco-environment*, 1993, (4): 39-42.
- [55] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 163-178.
- [56] Shi W C, Li T, Feng Y, *et al.* Source apportionment and risk assessment for available occurrence forms of heavy metals in Dongdake Wetland sediments, southwest of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **815**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152837.

CONTENTS

Impacts of Anthropogenic Emission Reduction on Urban Atmospheric Oxidizing Capacity During the COVID-19 Lockdown	ZHU Jian-lan, QIN Mo-mei, ZHU Yan-hong, <i>et al.</i> (617)
Transport and Potential Sources Regions of Double High Pollution in Nanjing by Different Synoptic Situations	QIN Yang, HU Jian-lin, KONG Hai-jiang (626)
Differences of Three Methods in Determining Ozone Sensitivity in Nanjing	CHEN Gan-yu, LI Xun, LI Lin, <i>et al.</i> (635)
Characteristics of Ozone Concentration in Shanghai and Its Associated Atmospheric Circulation Background During Summer Half-years from 2006 to 2021	ZHENG Qing-feng, LIANG Ping, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (645)
Distribution Characteristics of Near Surface Ozone Volume Fraction in Shanxi Province Based on Atmospheric Composition Observation Network	LI Ying, WANG Shu-min, PEI Kun-ning, <i>et al.</i> (655)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in Yining City	WANG Wen-ting, GU Chao, LI Li-ming, <i>et al.</i> (668)
Characteristics, Sources, and Ozone-sensitive Species of VOCs in Four Seasons in Yuncheng	YIN Shi-jie, LIU Xin-gang, LIU Ya-fei, <i>et al.</i> (678)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Activity Analysis of Atmospheric VOCs During Winter and Summer Pollution in Zhengzhou	LAI Meng-jie, ZHANG Dong, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (689)
Pollution Characteristics, Sources, and Secondary Generation of Organic Acids in PM _{2.5} in Zhengzhou	LI Zi-han, DONG Zhe, SHANG Lu-qi, <i>et al.</i> (700)
Nonlinear Variations in PM _{2.5} Concentration in the Three Major Urban Agglomerations in China	WU Shu-qi, GU Yang-yang, ZHANG Tian-yue, <i>et al.</i> (709)
Medium and Long-term Carbon Emission Projections and Emission Reduction Potential Analysis of the Lingang Special Area Based on the LEAP Model	WU Qiong, MA Hao, REN Hong-bo, <i>et al.</i> (721)
Dynamic Analysis on Carbon Metabolism of the Northern Region of China Under the Background of Carbon Emission Trading Policy	ZHENG Hong-mei, SHEN Fang, XU Guang-yao, <i>et al.</i> (732)
Carbon Reduction Analysis of Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Considering Regional Features and Vehicle Type Differences	MA Jing, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, <i>et al.</i> (744)
Nitrate Pollution Characteristics and Its Quantitative Source Identification of Major River Systems in China	WEI Ying-huai, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (755)
Effects of Land Use Structure and Spatial Pattern at Different Temporal and Spatial Scales on Water Quality in Suzhou Creek	TAN Juan, XIONG Li-jun, WANG Qing, <i>et al.</i> (768)
Spatial-temporal Variation in Water Quality of Rain-source Rivers in Shenzhen from 2015 to 2021 and Its Response to Rainfall	WEI Bi-ying, CHENG Jian-mei, SU Xiao-yu, <i>et al.</i> (780)
Chemical Characteristics of Shallow Groundwater in the Yellow River Diversion Area of Henan Province and Identification of Main Control Pollution Sources	WANG Shuai, REN Yu, GUO Hong, <i>et al.</i> (792)
Chemical Characteristics and Genetic Analysis of Karst Groundwater in the Beijing Xishan Area	GUO Gao-xuan, DAI Yin-dong, XU Liang, <i>et al.</i> (802)
Hydrochemical Characteristics and Its Origin of Surface Water and Groundwater in Dianbu River Basin	ZHENG Tao, QIN Xian-yan, WU Jian-xiong (813)
Hydrochemical Characteristics and Genesis Mechanism of Groundwater in the Dry Period in the Zhangjiakou Area	JIN Ai-fang, YIN Xiu-lan, LI Chang-qing, <i>et al.</i> (826)
Distribution of Typical Resistant Bacteria and Resistance Genes in Source Water of the Middle and Lower Reaches of the Yellow River	MIN Wei, GAO Ming-chang, SUN Shao-fang, <i>et al.</i> (837)
Contamination Characteristics, Detection Methods, and Control Methods of Antibiotic Resistance in Pharmaceutical Wastewater	PENG An-ping, GAO Hu, ZHANG Xin-bo (844)
Effect of Water Components on Aggregation and Sedimentation of Polystyrene Nano-plastics	TANG Duan-yang, ZHENG Wen-li, CHEN Guan-tong-yi, <i>et al.</i> (854)
Lead Removal from Water by Calcium-containing Biochar with Saturated Phosphate	LIU Tian, LÜ Si-lu, DU Xing-guo, <i>et al.</i> (862)
Preparation of Chitosan-modified Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ in Aqueous Solution	JIANG Ling, AN Jing-yue, YUE Xiao-qiong, <i>et al.</i> (873)
Efficacy and Mechanism of Tetracycline Adsorption by Boron-doped Mesoporous Carbon	ZOU Zhen, XU Lu, QIAO Wei, <i>et al.</i> (885)
Adsorption Properties of Magnetic Phosphorous Camellia Oleifera Shells Biochar to Sulfamethoxazole in Water	HAN Shuai-peng, TANG Li-wen, LIU Qin, <i>et al.</i> (898)
High Resolution Emission Inventory of Greenhouse Gas and Its Characteristics in Guangdong, China	LU Qing, TANG Ming-shuang, LIAO Tong, <i>et al.</i> (909)
Ecosystem CO ₂ Exchange and Its Environmental Regulation of a Restored Wetland in the Liaohe River Estuary	LIU Si-qi, CHEN Hong, XING Qing-hui, <i>et al.</i> (920)
Effects of Biochar Application Two Years Later on N ₂ O and CH ₄ Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region of China	HU Yu-jie, TANG Rui-jie, HU Tian-yi, <i>et al.</i> (929)
Research and Application Progress of Biochar in Amelioration of Saline-Alkali Soil	WEI Ying, JIAO Le, ZHANG Peng, <i>et al.</i> (940)
Effect of No-tillage on Soil Aggregates in Farmland: A Meta Analysis	XU Yi-ping, RAO Yue-yue, MENG Yan, <i>et al.</i> (952)
Spatio-temporal Evolution and Multi-scenario Simulation of Carbon Storage in Karst Regions of Central Guizhou Province; Taking Puding County as An Example	LI Yue, LUO Hong-fen (961)
Effects of Different Modifiers on Aggregates and Organic Carbon in Acidic Purple Soil	LI Yue, XU Man, XIE Yong-hong, <i>et al.</i> (974)
Effect of Ca Modified Biochar on the Chemical Speciation of Soil Phosphorus and Its Stabilization Mechanism	ZHANG Chao, ZHAI Fu-jie, SHAN Bao-qing (983)
Plant Diversity Changes and Its Driving Factors of Abandoned Land at Different Restoration Stages in the Middle of the Qinling Mountains	YAN Cheng-long, XUE Yue, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (992)
Contamination Characteristics and Ecological Risk of Antibiotics in Contaminated Sites of Typical Pharmaceutical Factories in China	YANG Jiong-bin, HUANG Zheng, ZHAO Jian-liang, <i>et al.</i> (1004)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Guangzhou	ZOU Zi-hang, CHEN Lian, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (1015)
Quantifying the Contribution of Soil Heavy Metals to Ecological and Health Risk Sources	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (1026)
Potential Ecological Risk Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils around Typical Factories in Hunan Province Based on Monte-Carlo Simulation	LUO Hao-jie, PAN Jun, CHEN Xiao-xia, <i>et al.</i> (1038)
Health Risk Assessment for an Arsenic-contaminated Site Based on Monte Carlo Simulation and Parameters Optimization	YUAN Bei, LIU Hu-peng, DU Ping, <i>et al.</i> (1049)
Pollution Source Apportionment of Heavy Metals in Cultivated Soil Around a Red Mud Yard Based on APCS-MLR and PMF Models	SHEN Zhi-jie, LI Jie-qin, LI Cai-xia, <i>et al.</i> (1058)
Characteristics and Mechanism of Cd Release and Transport in Soil Contaminated with PE-Cd	WANG Di, XU Shao-hui, SHAO Ming-yan, <i>et al.</i> (1069)
Characterization of Reductive Dechlorination of Chlorinated Ethylenes by Anaerobic Consortium	LI Wei, LIU Gui-ping, LIU Jun, <i>et al.</i> (1080)
Analysis of Heavy Metal Pollution Evaluation and Correlation of Farmland Soil and Vegetables in Zhaotong City	ZHANG Hao, DONG Chun-yu, YANG Hai-chan, <i>et al.</i> (1090)
Safe Utilization Effect of Passivator on Mild to Moderate Cadmium Contaminated Farmland	WANG Xiao-jing, ZHANG Dong-ming, CAO Yang, <i>et al.</i> (1098)
Simultaneous Immobilization of Cadmium and Arsenic in Paddy Soils with Novel Fe-Mn Combined Graphene Oxide	YUAN Jing, WU Ji-zi, LIAN Bin, <i>et al.</i> (1107)
Effects of the Application of Irrigation Water Containing Zn at the Key Growth Period on the Uptake and Transport of Cd in Rice	ZHOU Xia, HU Yu-dan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (1118)
Effects of Exogenous Zinc on Growth and Root Architecture Classification of Maize Seedlings Under Cadmium Stress	ZHANG Hui-hong, WEI Chang, LIU Hai-tao, <i>et al.</i> (1128)
Mitigative Effect of Rare Earth Element Cerium on the Growth of Zinc-stressed Wheat (<i>Triticum aestivum</i> L.) Seedlings	ZHANG Jing-jing, XU Zheng-yang, JIAO Qiu-juan, <i>et al.</i> (1141)
Two-stage Inhibition Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 Application on Cadmium Uptake and Transport in Wheat	GUO Jia-jia, WANG Chang-rong, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (1150)
Effects of Combined Stress of High Density Polyethylene Microplastics and Chlorimuron-ethyl on Soybean Growth and Rhizosphere Bacterial Community	HU Xiao-yue, HUA Zi-wei, YAO Lun-guang, <i>et al.</i> (1161)
Human Accumulation and Toxic Effects of Microplastics: A Critical Review	BAO Ya-bo, WANG Cheng-chen, PENG Wu-guang, <i>et al.</i> (1173)
Overview of the Application of Machine Learning for Identification and Environmental Risk Assessment of Microplastics	BAI Run-hao, FAN Rui-qi, LIU Qi, <i>et al.</i> (1185)
Research Process on the Combined Pollution of Microplastics and Typical Pollutants in Agricultural Soils	HOU Yu-qing, LI Bing, WANG Jin-hua, <i>et al.</i> (1196)
Research Progress in Electrochemical Detection and Removal of Micro/Nano Plastics in Water	ZHENG Wei-kang, LIU Zhen-zhong, XIANG Xiao-fang (1210)
Factors Influencing Willingness of Farmers to Pay for Agricultural Non-point Source Pollution Control Based on Distributed Cognitive Theory	GUO Chen-hao, LI Lin-fei, XIA Xian-li (1222)