

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
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	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析

张传华¹, 王钟书², 刘力^{1*}, 刘燕^{1,3}

(1. 重庆理工大学管理学院, 重庆 400054; 2. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042; 3. 重庆市规划和自然资源调查监测院, 重庆 401120)

摘要: 为探明矿区周边土壤重金属来源, 为地区土壤污染防治提供有效建议, 在重庆市黔江区五里乡北部采集表层土壤(0~20 cm)样品 118 件, 分析了土壤中重金属(Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn 和 Ni)含量及土壤 pH, 利用地统计法和 APCS-MLR 受体模型对土壤重金属空间分布和来源进行了研究。结果表明, 土壤重金属含量明显高于重庆市背景值, 存在明显的表层累积。Hg、Pb、Cd、As 和 Zn 均表现为极强变异。土壤 Cd、Hg、Pb、As 和 Zn 超过风险筛选值的比例分别为 47.11%、6.61%、4.96%、5.79% 和 7.44%, 土壤 Cd、Hg、Pb 和 As 超过风险管制值的比例分别为 0.83%、4.13%、0.83% 和 0.83%, 土壤重金属超标问题显著。土壤 Cd、As、Cr、Cu 和 Ni 主要受到成土母质的影响, 对土壤元素总量的贡献率分别为 77.65%、68.55%、71.98%、90.83% 和 82.19%, 土壤 Hg、Pb 和 Zn 主要受到汞矿和铅锌矿开采的影响, 贡献率分别为 86.59%、88.06% 和 91.34%。此外, 农业活动也会影响土壤 Cd 和 As 的含量。建议加强农产品和农业投入品安全监测, 种植重金属低累积品种, 减少禽畜粪肥的使用, 在超过重金属污染风险管制值的区域, 种植非食用农产品。

关键词: 矿区; 土壤重金属; APCS-MLR 受体模型; 来源解析; 风险管控建议

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3500-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202207242

Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method

ZHANG Chuan-hua¹, WANG Zhong-shu², LIU Li^{1*}, LIU Yan^{1,3}

(1. College of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 3. Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 401120, China)

Abstract: In order to identify the source of heavy metals in the soil around a mining area and provide effective suggestions for the prevention and control of regional soil pollution, 118 topsoil samples (0-20 cm) were collected in the northern part of Wuli Township, Qianjiang District, Chongqing. The heavy metal (Cd, Hg, Pb, As, Cr, Cu, Zn, and Ni) contents in the soil and soil pH were analyzed, and the spatial distribution and sources of heavy metals in the soil were studied using the geostatistical method and APCS-MLR receptor model. The results showed that the content of heavy metals in the soil was significantly higher than the background value in Chongqing; there was obvious surface accumulation; and Hg, Pb, Cd, As, and Zn showed strong variation. The proportions of soil Cd, Hg, Pb, As, and Zn exceeding the risk screening values were 47.11%, 6.61%, 4.96%, 5.79%, and 7.44%, respectively, and the proportions of soil Cd, Hg, Pb, and As exceeding the risk control values were 0.83%, 4.13%, 0.83%, and 0.83%; thus, the problem of excessive heavy metals in the soil was significant. Soil Cd, As, Cr, Cu, and Ni were mainly affected by soil parent materials, and their contribution rates to the total soil elements were 77.65%, 68.55%, 71.98%, 90.83%, and 82.19%, respectively. Soil Hg, Pb, and Zn were mainly affected by the mining of mercury mines and lead-zinc mines, with the contribution rates of 86.59%, 88.06%, and 91.34%, respectively. In addition, agricultural activities also affected soil Cd and As contents. It is recommended to strengthen the safety monitoring of agricultural products and agricultural inputs, plant varieties with a low accumulation of heavy metals, reduce the use of livestock manure, and grow non-edible agricultural products in areas that exceed the control value of heavy metal pollution risk.

Key words: mining area; soil heavy metals; APCS-MLR receptor model; source analysis; risk management suggestions

土壤是岩石圈表面的疏松表层, 不仅为植物提供必需的营养和水分, 也是人类生产生活的重要场所, 是一种不可再生的宝贵资源^[1~3]。随着经济的快速发展, 各类工农业活动造成的重金属等污染物输入对其所在生态系统, 尤其是土壤环境的影响不断加剧^[4~6], 其中矿业活动是土壤重金属的主要来源之一^[7,8], 在矿石开采、选矿、冶炼和矿渣堆放等生产过程中产生的重金属等污染物会随着大气沉降和地表径流等途径, 进入周边农田系统, 对农产品安全及人体健康造成一定风险^[9,10]。李志涛等^[11]对四川某硫铁矿周边土壤环境质量进行研究发现, 矿区周

边农田土壤中 Cr、Ni、Cu 和 Cd 含量主要受工矿业活动影响, 农田土壤重金属整体以中度污染为主。卢鑫等^[12]对云南省会泽县铅锌矿区周边农田土壤进行了污染评价, 结果显示, 铅锌矿的开采造成了周边农田土壤中 Pb、Zn 和 Cd 明显富集, 含量平均值分别超过国家土壤环境质量标准的 4.5、11.4 和 44.6 倍, 重金属污染问题显著。黄钟霆等^[13]对湖南某锰

收稿日期: 2022-07-26; 修订日期: 2022-08-24

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(20AJY005); 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-gksb0241)

作者简介: 张传华(1978~), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为土壤污染防治, E-mail: 2091948438@qq.com

* 通信作者, E-mail: liuli428@cqu.edu.cn

矿区周边主栽农作物的安全性进行评价发现,研究区玉米、水稻和蔬菜均出现了一定程度的超标问题,超标率最高可到 37.3%,主要超标因子为 Pb 和 Cd。据不完全统计,中国因矿业开发造成的污染土地约有 300 万 hm^2 ,每年因采矿造成的废弃土地达 53.3 万 hm^2 ,而研究区大厂矿田的前期不合理的资源开发利用已导致超过 300 hm^2 农田受到污染,减产超过 1 000 t,对经济发展造成了很大影响^[14],因此,矿区周边土壤重金属污染风险管控势在必行。

本文选择在重庆市黔江区五里乡北部汞矿和铅锌矿周边耕地土壤开展重金属来源解析,利用 APCS-MLR 受体模型进行土壤重金属来源定量分析,结合地统计法对土壤重金属空间分布与矿产开采、地质背景和农业活动的相关性进行空间分析,针对不同来源与土壤重金属含量的相关关系和贡献率给出风险管控建议,以期对地区土壤重金属污染防治及矿山周边耕地安全利用工作提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市黔江区金洞乡北部,处于旗号岭和五湖岭两座南北走向的山脉之间。金洞乡属亚热带季风气候,多年平均气温 15.4℃。有细沙河和金洞河横穿全境,流经 6 个行政村,最后注入黔江区阿蓬江。区内已探明地下矿藏有铅锌矿、汞矿、铜矿和铁矿等。出露地层包括寒武系、奥陶系、志留系和二叠系,岩性以灰岩、页岩和砂岩为主,土壤类型以黄壤为主,紫色土次之。耕地主要分布在志留系地层区。研究区农用地主要包括耕地和林地,耕地主要种植水稻、玉米和红薯,人均粮食生产量为 467 kg。主要经济作物为蔬菜。林地主要种植有银杏、水杉和香樟等树种。金洞乡目前主要开采的矿产为铅锌矿、汞矿和铁矿等。

1.2 样品采集与分析

以耕地土壤为主,林地土壤为辅,按 4 ~ 6 点· km^{-2} 的密度采集 0 ~ 20 cm 的表层土壤样品 118 件(图 1)。土壤样品在自然条件下阴干,在样品干燥过程中要经常揉搓样品,以免胶结,并去除土壤中的砾石以及植物根系。干燥后的样品在过筛前用木槌轻轻敲打,以便使土壤样品恢复至自然粒级状态。样品晾干需进行初步处理,用尼龙筛截取 10 目(2 mm)粒级的样品送至实验室分析,由实验室用玛瑙研钵将样品研磨至 100 目(0.149 mm)作为测试样。

土壤 pH 采用 1:2.5 的土壤-水悬浮液(质量浓度),用 pH 计直接测定;土壤 Cd、Pb 和 Cu 含量测定时,用硝酸、氢氟酸、高氯酸分解溶样,硝酸提

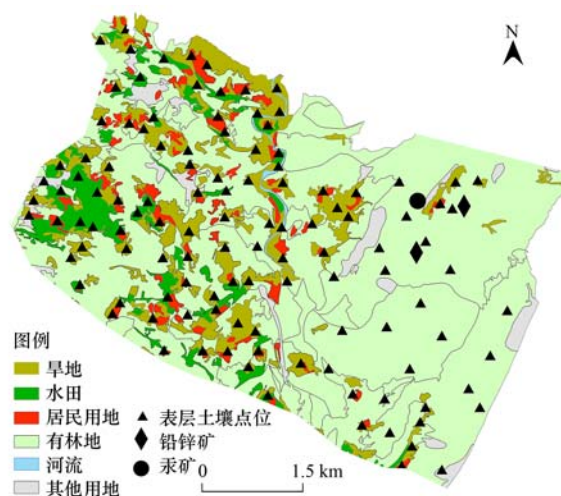


图 1 研究区采样点位示意

Fig. 1 Bitmap of sampling sites in the study area

取,最后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行检测;土壤 Cr、Ni 和 Zn 含量测定时,用盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸分解溶样,盐酸提取,并用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)进行检测;土壤 As 含量测定时,用王水溶解样品,盐酸提取,并用原子荧光光谱法(AFS)进行含量测定;土壤 Hg 含量测定时,用王水溶解样品,并用原子荧光光谱法(AFS)进行含量测定^[15]。

土壤 Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn 和 Ni 的检出限分别为: 0.03、0.0005、2.0、1.0、5.0、1.0、4.0 和 2.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤 pH 的检出限为 0.1。土壤样品采用土壤成分分析标准物质(GSS-4、GSS-7、GSS-8、GSS-9、GSS-12、GSS-17 和 GSS-21)的方法控制准确度(相对误差,RE 检验)。随机抽样分析(数量为每批次试样数的 20% ~ 30%)进行精密度检验。精密度控制:采用重复分析的方法控制样品分析的精密度,每件样品进行重复分析,双份分析的相对双差 $\leq 15\%$ 。

样品分析测试结果和检出限符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[16]要求。

1.3 土壤重金属来源解析

1.3.1 地统计法

普通克里格法(OK)以变异函数理论模型和结构分析为基础,在局部区域内对区域变量进行无偏最优估计,不仅考虑了距离远近的影响,还考虑了已知点的位置和属性值整体的空间分布和格局,是地统计学的主要插值方法之一^[17]。普通克里格法(OK)权重使用半方差函数模型,半变异函数计算公式如下^[18]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半变异函数; h 为滞后距离或步

长; $N(h)$ 为距离等于 h 的样点对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为区域化变量 $Z(x)$ 在位置 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值. 半变异函数常用的拟合模型有: 线性模型、球类模型、指数模型和高斯模型, 选择适宜的函数模型及参数有利于提高插值结果的精度.

1.3.2 APCS-MLR 受体模型

主成分分析(PCA)是用少数几个因子去描述许多指标或因素之间的联系,按照各指标间的关联度,将其转化为少数几个综合指标来反映整体的特点,经常被用于各介质中元素的来源研究,相关性显著的元素可能有同源性^[19]. APCS-MLR 受体模型是通过传统的主成分分析(PCA)进行改进得来的用于元素来源定量分析的方法,可以给出不同来源对同一元素的贡献率^[20]. 具体步骤如下^[21]:

对各元素引入一个 0 含量因子,计算公式为:

$$Z_{i0} = (0 - \bar{C}_i) / \sigma_i \quad (2)$$

用 PCA 得到的归一化因子分数减去 0 含量因子,得到各元素的 APCS,用各元素含量的实测值与 APCS 进行多元回归分析,得到如下的回归方程:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{p=1}^n (b_{pi} \times \text{APCS}_p) \quad (3)$$

式中, $\bar{C}_i$ 为元素 i 含量的平均值, σ_i 为元素 i 含量的标准差, C_i 为元素 i 含量的实测值, b_{i0} 为回归方程的常数项, b_{pi} 为源 p 对元素 i 的回归系数, APCS _{p}

为调整后的因子 p 的分数, $b_{pi} \times \text{APCS}_p$ 为源 p 对该元素含量的贡献量,所有样本的 $b_{pi} \times \text{APCS}_p$ 的平均值就表示了源平均绝对贡献量.

1.4 数据处理方法

利用 Excel 2010 进行数据整理,利用 ArcGIS 10.2 完成进行地统计分析,利用 SPSS 25.0 进行 APCS-MLR 受体模型拟合分析,图件绘制利用 ArcGIS 10.2 和 CorelDRAW X8 完成.

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征

利用 SPSS 25.0 软件对土壤重金属进行正态分布检验发现,研究区土壤重金属含量不服从正态分布,经对数变换后的数据基本符合正态分布,因此,采用几何平均值对数据进行描述,统计结果见表 1. 土壤 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的中位值分别为: 0.32、0.10、35.30、8.05、75.53、28.51、97.53 和 37.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与重庆土壤背景的比值分别为 1.21、2.14、1.46、1.39、0.99、1.12、1.26 和 1.11,土壤重金属存在明显累积现象. 土壤 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 的最大值分别为 31.66、3 629.40 和 6 680.83 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均远远高于研究区平均值及重庆背景值,可能和研究区汞矿及铅锌矿的开采有关.

表 1 土壤重金属元素含量描述性统计¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of soil heavy metal element contents

元素	最小值	最大值	中位值	几何平均值	标准差	变异系数	重庆土壤背景值 ^[22]	K
Cd	0.09	11.44	0.32	0.34	1.05	3.05	0.28	1.21
Hg	0.02	31.66	0.10	0.15	2.98	20.04	0.07	2.14
Pb	23.90	3 629.40	35.30	41.14	326.61	7.93	28.10	1.46
As	3.21	142.71	8.05	9.20	15.39	1.67	6.62	1.39
Cr	31.80	149.21	75.53	74.09	12.91	0.17	74.40	0.99
Cu	9.75	74.23	28.51	27.70	8.19	0.30	24.60	1.12
Zn	44.75	6 680.83	97.53	102.52	600.77	5.86	81.90	1.26
Ni	13.33	59.23	37.24	35.39	7.41	0.21	31.60	1.11

1) 土壤重金属元素的计量单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数无量纲, K 表示土壤元素含量平均值与重庆土壤背景值的比值

土壤重金属的变异系数表现为: $\text{Hg} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr}$, 其中, Hg、Pb、Cd、As 和 Zn 均表现为极强变异,说明其含量空间分布不均匀,受到人为扰动的概率较大^[23].

参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[24] 给出的土壤环境质量标准,对研究区土壤重金属超标情况进行评价,结果显示 Cd、Hg、Pb、As 和 Zn 超过风险筛选值的比例分别为: 47.11%、6.61%、4.96%、5.79% 和 7.44%,其中 Cd、Hg、Pb 和 As 超过风险管制值的

比例分别为: 0.83%、4.13%、0.83% 和 0.83%. 说明研究区存在较明显的土壤重金属超标问题,结合各重金属描述性统计结果,研究区土壤 Cd 表现为面状超标,而 Hg、Pb 和 Zn 表现为点状超标.

土壤 pH 的变化范围为 4.42 ~ 8.27, $\text{pH} \leq 5.5$ 、 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 、 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$ 和 $\text{pH} > 7.5$ 的点位比例分别为: 38.84%、19.01%、23.97% 和 18.18%,土壤以酸性为主.

2.2 土壤重金属空间分布

利用 GS+9.0 软件进行半方差函数拟合和空间

结构分析,结果见表 2. 土壤 Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn 和 Ni 块金系数分别为: 0.26、0.69、0.58、0.10、0.20、0.20、0.61 和 0.20,说明土壤 As、Cr 和 Ni 空间变异性主要受到自然因素的控制^[25],土壤 Cd、Hg、Zn 和 Pb 的空间分布同时受到人为因素和自然因素的控制^[26],其中 Cd 的块金系数接近 0.25,自然因素对含量影响占比较大,而 Hg、Zn 和 Pb 的块金系数接近 0.75,人为因素所占比例较大^[27].

表 2 土壤重金属元素半方差函数分析结果

Table 2 Results of semi-variance function analysis of heavy metal elements in soil							
元素	函数模型	块金值 (C_0)	基台值 ($C_0 + C$)	块金系数 [$C_0 / (C_0 + C)$]	变程/m	R^2	RSS
Cd	球类函数	0.25	0.95	0.26	9 110	0.959	0.011
Hg	高斯函数	1.44	2.08	0.69	6 784	0.981	0.097
Pb	指数函数	1.04	1.79	0.58	6 057	0.795	0.038
As	高斯函数	0.17	1.69	0.10	6 292	0.956	0.022
Cr	球类函数	0.01	0.05	0.20	9 200	0.879	0.009
Cu	指数函数	0.03	0.15	0.20	7 281	0.832	0.018
Zn	指数函数	1.08	1.77	0.61	4 566	0.862	0.023
Ni	指数函数	0.01	0.05	0.20	2 868	0.868	0.002

利用普通克里格法和表 3 中各重金属的空间参数,绘制土壤重金属含量空间分布,结果见图 2. 土壤 Cd 和 As 的空间分布特征相近,高含量区分布在研究区东北部及西部部分区域;土壤 Hg、Pb 和 Zn 的空间分布特征相近,高值区分布在研究区东北部,呈点状分布;土壤 Cr、Cu 和 Ni 的空间分布特征相近,高值区分布在东部和南部地区. 各土壤重金属的空间分布特征相近,可能指示其存在相似的来源^[28].

2.3 土壤重金属来源

利用 SPSS 25 软件对数据进行 KMO 检验,得到的统计量值为 0.761, Bartlett 球度检验相伴概率为 0.000,因此,本次数据可以开展主成分分析(PCA)^[29],分析结果见表 3. 利用最大方差法进行旋转后,得到了两个特征值大于 1 的主成分,累计方差为 80.211%,可解释土壤重金属元素的大部分信息^[30]. 第一主成分(F1)载荷较高的重金属元素为 Cd、As、Cr、Cu 和 Ni,第二主成分(F2)载荷较高的重金属元素为 Hg、Pb 和 Zn.

表 3 土壤重金属主成分分析矩阵

Table 3 Principal component analysis matrix of heavy metals in soil		
元素	F1	F2
Cd	0.873	0.105
Hg	0.115	0.974
Pb	0.042	0.972
As	0.880	0.029
Cr	0.799	0.207
Cu	0.822	0.120
Zn	0.106	0.917
Ni	0.888	0.188
初始特征值	4.655	2.014
方差贡献率/%	49.348	30.863

利用式(2)计算土壤 Cd、Hg、Pb、As、Cr、Cu、Zn 和 Ni 的 0 浓度因子,再利用 SPSS 25 进行回归分析,得到各重金属元素的 APCS-MLR 受体模型(表 4). 土壤重金属的受体模型均表现为很好的显著性;除 As、Cr 和 Ni 外,其余重金属的 R 值均大于 0.9;利用受体模型计算的各土壤重金属含量预测值与实测值的比值均接近于 1,说明受体模型拟合较好^[28].

表 4 土壤重金属 APCS-MLR 受体模型

受体模型	R	Sig.	预测值/实测值
$C_{Cd} = 1.039 \times APCS_{F1} + 0.013 \times APCS_{F2} + 0.137$	0.979	0.000	1.054
$C_{Hg} = 0.460 \times APCS_{F1} + 2.996 \times APCS_{F2} + 0.152$	0.970	0.000	1.098
$C_{Pb} = 36.344 \times APCS_{F1} + 300.814 \times APCS_{F2} + 1.024$	0.984	0.000	1.031
$C_{As} = 13.280 \times APCS_{F1} + 3.188 \times APCS_{F2} + 2.297$	0.888	0.000	1.148
$C_{Cr} = 7.686 \times APCS_{F1} + 2.914 \times APCS_{F2} + 0.514$	0.896	0.000	1.117
$C_{Cu} = 7.299 \times APCS_{F1} + 0.446 \times APCS_{F2} + 1.036$	0.910	0.000	0.999
$C_{Zn} = 52.593 \times APCS_{F1} + 561.6 \times APCS_{F2} + 0.196$	0.988	0.000	1.004
$C_{Ni} = 7.959 \times APCS_{F1} + 1.180 \times APCS_{F2} + 2.030$	0.876	0.000	1.053

利用受体模型计算不同来源对各土壤重金属的含量贡献率,结果见图 3. 土壤 Cd、As、Cr、Cu 和 Ni 主要受到 F1 的影响,贡献率分别为 77.65%、68.55%、71.98%、90.83% 和 82.19%,土壤 Hg、Pb 和 Zn 主要受到 F2 的影响,贡献率分别为 86.59%、88.06%、91.34%. 此外,其他来源(F3)对 Cd 和 As

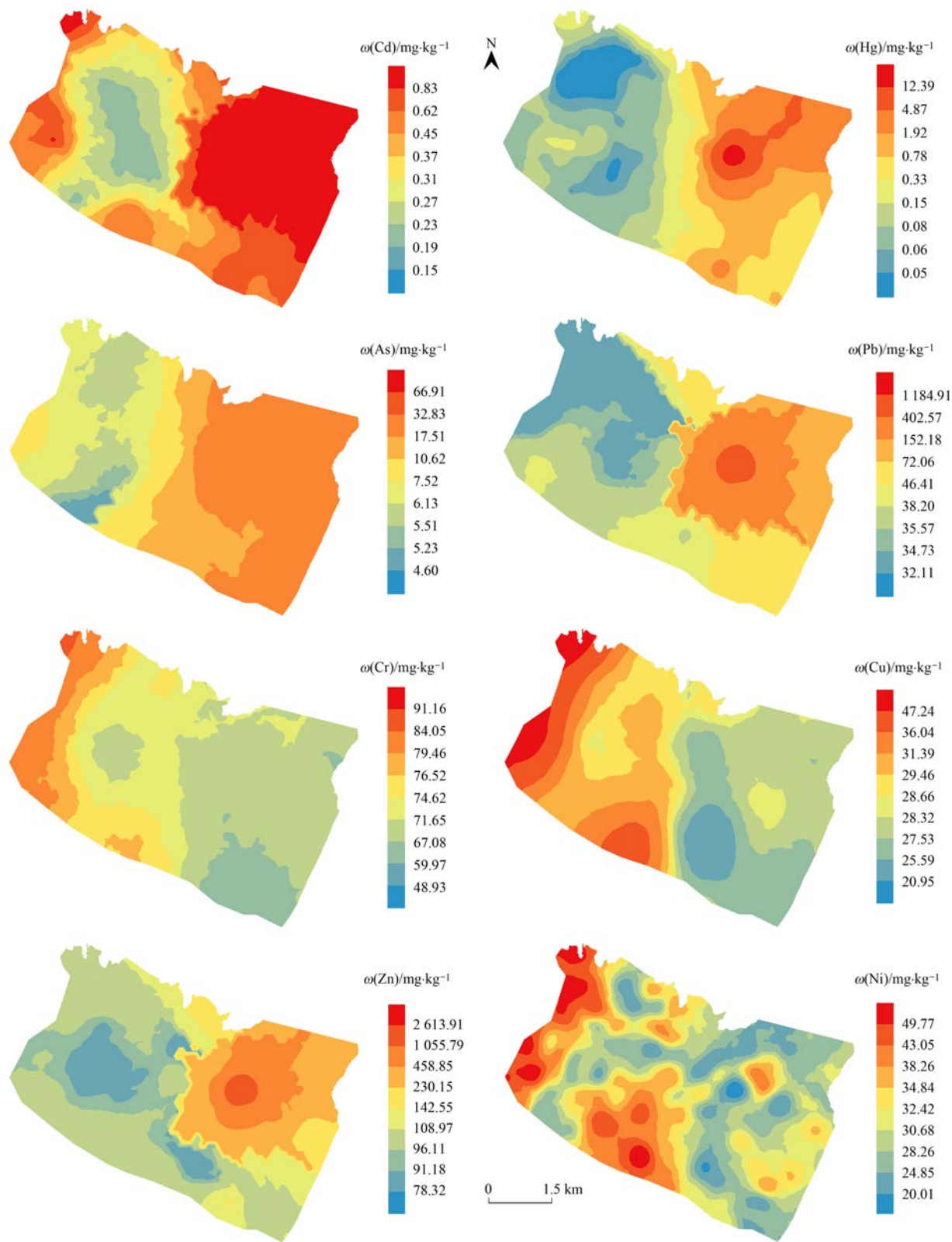


图2 土壤重金属空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of heavy metals in soil

含量也存在一定程度的影响,贡献率分别为21.41%和15.00%.

为了进一步探究不同主成分代表的具体来源,选择Cd、Cu和Hg为代表元素,利用普通克里格法分别计算F1~F3贡献率的空间分布,并与研究区

地层及矿点分布情况进行对比(图4和图5),可以看出,F1对Cd贡献率较高的区域和寒武系地层区基本吻合,其次是奥陶系和二叠系,对Hg贡献率较高的区域位于寒武系和奥陶系地层区,对Cu贡献率较高的区域分布在二叠系和奥陶系地层分布区.

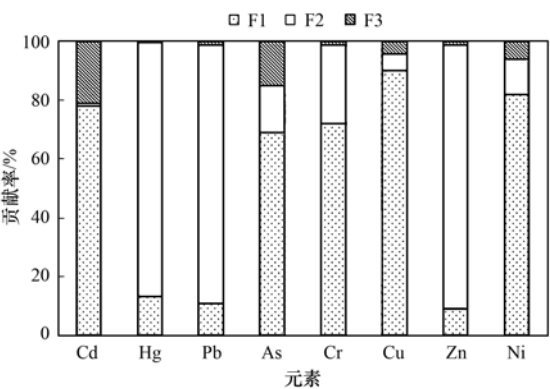


图 3 不同来源对各土壤重金属含量的贡献率
Fig. 3 Contribution rates of different sources to the heavy metal content of each soil sample

F2 对 Hg、Cu 和 Cd 贡献率较高的区域均位于汞矿及铅锌矿周边. 因此,主成分分析结果中,F1 可能代表地质背景,F2 可能代表汞矿及铅锌矿.

研究区出露的寒武系地层为寒武系下统杷榔组 (C_{1p}),主要岩性为:灰绿、黄绿、深灰色钙质粘土页岩、钙质页岩不等厚互层,上覆土壤中黏土矿物含量丰富,对土壤 Cd 和 As 具有较强的吸附能力,由于 Cd^{2+} 和 Ca^{2+} 半径相似,二者易发生类质同象作用,导致 Cd 进入碳酸岩矿物中,在原地不断积累^[31],虽然二叠系和奥陶系同样分布有灰岩,易发生上述现象,但由于寒武系地层区形成的土壤发育时间更久,为 Cd 的积累提供了更长的时间,使得 Cd 在寒武系

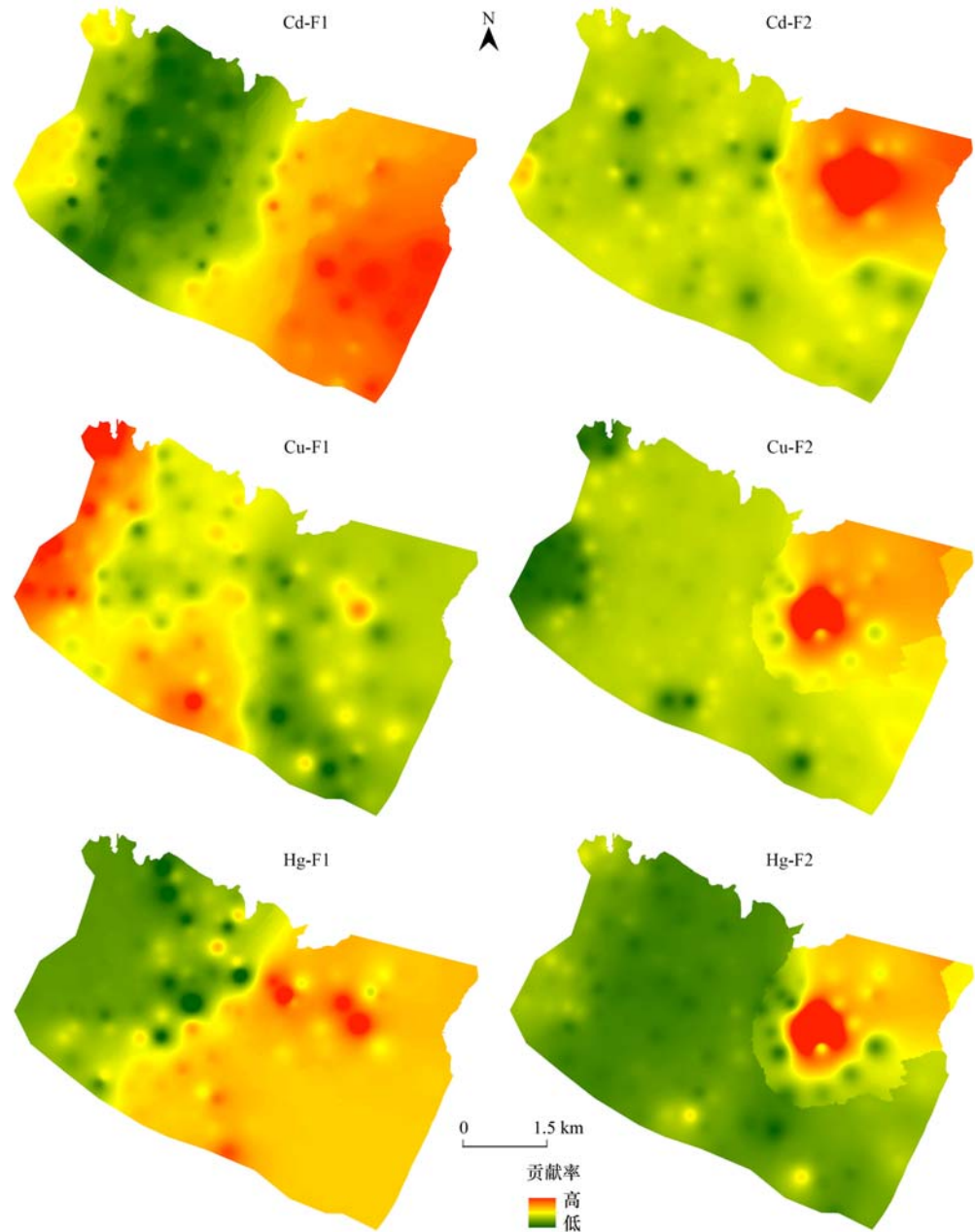


图 4 不同来源对土壤 Cd、Cu 和 Hg 贡献率
Fig. 4 Contribution rate of soil Cd, Cu, and Hg from different sources

地层区表现得尤为富集^[32]. 研究区奥陶系(O_2g)和二叠系(P_2m)岩性以灰岩为主,在风化成土过程中,易形成铁锰氧化物和粘土矿物等难溶物质堆积在原地,对重金属有着明显的固定作用^[33,34]. 因此,研究区 Cd、As 和 Cu 等重金属主要和地层分布有关. 研究表明, Hg、Pb 和 Zn 等元素的地球化学性质相似,且在成矿过程中,存在明显的伴生关系^[35,36],汞矿和铅锌矿的开采会导致土壤中 Hg、Pb 和 Zn 等重金属的输入和积累^[37],因此,矿产开采是研究区土壤高 Hg、Pb 和 Zn 含量的主要原因.

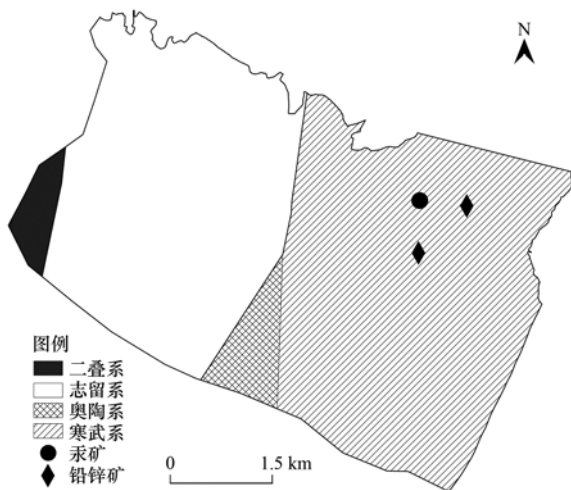


图5 地层与矿点分布

Fig. 5 Distribution of strata and ore sites

前文已述,土壤 Cd 和 As 均受到其他因素 F3 的影响,贡献率超过 15%. 从图 2 可以看出,8 种重金属在志留系地层分布区含量均较低,说明该区域土壤重金属含量受到地层及矿点分布的影响较小,因此,单独对该区域土壤点位进行研究,结果见图 6. 可以看出,志留系分布区耕地和林地土壤 Cd 和 As 含量存在显著差异,耕地土壤 Cd 和 As 含量明显高于林地土壤,说明 F3 可能指示农业活动.

有研究表明 As 常作为禽畜饲料的添加剂,用以提高禽畜对营养物质的吸收效率,促进生长,但大部分重金属元素会随粪便排出动物体外^[38],而研究

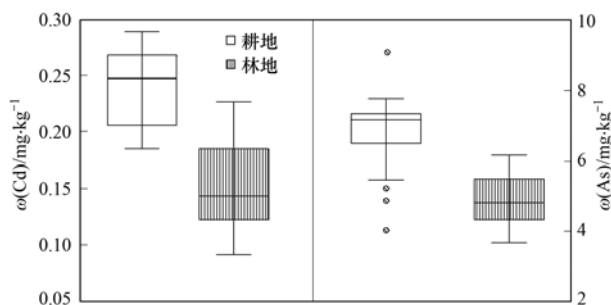


图6 志留系分布区土壤 Cd 和 As 在不同用地类型中的含量

Fig. 6 Contents of soil Cd and As in different land types in Silurian distribution area

区农业活动中禽畜粪肥作为农家肥使用十分广泛,因此,农业活动对土壤 As 含量,尤其是耕地集中分布区影响显著. 王美等^[39]研究表明,耕地土壤中施用有机肥较空白对照组土壤 Cd 含量增加 496%,说明土壤 Cd 的累积与施用有机肥存在明显的相关关系. 因此,土壤 As 可能与土壤施用禽畜粪肥有关,而 Cd 主要和施用商品有机肥有关.

基于上述分析结果,建议加强研究区农产品安全监测,在寒武系、奥陶系和二叠系地层分布区,种植重金属低累积品种,减少农作物对重金属的吸收,进行土壤酸化治理,降低农作物超标风险^[40]. 在志留系地层分布区,加强对农业投入品的监测,防止由于化肥、农药的施用造成的土壤重金属输入,并减少禽畜粪肥的使用^[41]. 在汞矿和铅锌矿区周边,开展专项研究,查明重金属迁移途径和影响范围,对超过重金属污染风险管制值的区域,采取种植结构调整等措施,种植非食用农产品^[42],在保障农民健康的前提下,不降低农民收入.

3 结论

(1) 研究区土壤 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Ni})$ 的中位值分别为: 0.32、0.10、35.30、8.05、75.53、28.51、97.53 和 37.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤重金属含量明显高于重庆市背景值,存在明显的表层累积. Hg、Pb、Cd、As 和 Zn 均表现为极强变异,其含量空间分布不均匀,受到人为扰动的概率较大.

(2) 土壤 Cd、Hg、Pb、As 和 Zn 超过风险筛选值的比例分别为: 47.11%、6.61%、4.96%、5.79% 和 7.44%,其中 Cd、Hg、Pb 和 As 超过风险管制值的比例分别为 0.83%、4.13%、0.83% 和 0.83%,存在较明显的土壤重金属超标问题.

(3) 土壤 Cd、As、Cr、Cu 和 Ni 主要受到寒武系、奥陶系及二叠系地层分布的影响,贡献率分别为: 77.65%、68.55%、71.98%、90.83% 和 82.19%,土壤 Hg、Pb 和 Zn 主要受到汞矿和铅锌矿开采的影响,贡献率分别为: 86.59%、88.06% 和 91.34%. 农业活动对土壤 Cd 和 As 含量贡献率分别为 21.41% 和 15.00%.

(4) 在寒武系、奥陶系和二叠系地层分布区,建议种植重金属低累积品种,进行土壤酸化治理,降低农作物超标风险. 在志留系地层分布区,加强对农业投入品的监测,减少禽畜粪肥的使用. 在汞矿和铅锌矿区周边,查明重金属迁移途径和影响范围,对超过重金属污染风险管制值的区域,采取种植结构调整等措施,种植非食用农产品.

参考文献:

- [1] 蔡祖聪. 土壤在植物多样性形成中的作用及其研究意义[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 1-9.
- Cai Z C. The role of soil in the formation of plant biodiversity and its research significance[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(1): 1-9.
- [2] 孙燕瓷, 张学雷, 陈杰, 等. 土壤多样性的概念、方法与研究进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 954-958.
- Sun Y C, Zhang X L, Chen J, *et al.* Pedodiversity: its concept, methodology and research practice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 954-958.
- [3] 龚子同. 中国土壤系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Gong Z T. *Chinese soil taxonomy*[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [4] 陈雪, 许丹丹, 钱雅慧, 等. 淮北矿区煤矸石多环芳烃污染特征及毒性评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 753-760.
- Chen X, Xu D D, Qian Y H, *et al.* Pollution characteristics and toxicity assessment of PAHs in coal gangue from mine area in HuaiBei[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(2): 753-760.
- [5] Jiang X, Lu W X, Zhao H Q, *et al.* Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, 14(6): 1599-1610.
- [6] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2219-2238.
- Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2219-2238.
- [7] 周艳, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2884-2892.
- [8] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1054-1063.
- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3): 1054-1063.
- [9] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌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.
- [10] 赵永红, 张静, 周丹, 等. 赣南某钨矿区土壤重金属污染状况研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2477-2484.
- Zhao Y H, Zhang J, Zhou D, *et al.* Mixed heavy metals contamination of tungsten mine area soil in south of Jiangxi Province[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8): 2477-2484.
- [11] 李志涛, 王夏晖, 何俊, 等. 四川省江安县某硫铁矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1272-1279.
- Li Z T, Wang X H, He J, *et al.* Source identification and pollution assessment of heavy metals in farmland soils around a pyrite mining area in Jiang'an County, Sichuan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1272-1279.
- [12] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1421-1429.
- Lu X, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3): 1421-1429.
- [13] 黄钟霆, 易盛伟, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 975-984.
- Huang Z T, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 975-984.
- [14] 张爽. 广西大厂矿集区土壤重金属元素分布特征与污染程度评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- Zhang S. *Distribution characteristics and pollution degree assessment of heavy metals in soil in Dachang mining of Guangxi*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [15] Yan M S, Ding X L, Lei J L, *et al.* Potential ecological and health risk assessment of different kiwifruit orchards in Qianjiang district, Chongqing city, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(3): 3088-3105.
- [16] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- DZ/T 0295-2016, *Determination of land quality geochemical evaluation*[S].
- [17] 王锐, 邓海, 梁绍标, 等. 重庆市两不同地貌及地质背景区土壤 Cd、Se 元素含量空间插值方法研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(6): 1332-1341.
- Wang R, Deng H, Liang S B, *et al.* Spatial interpolation method of soil Cd and Se element contents in two different landforms and geological background areas in Chongqing City[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(6): 1332-1341.
- [18] 张金兰, 欧阳婷萍, 黄铁兰, 等. 农田表层土壤镉的典型空间插值方法对比研究[J]. 生态科学, 2017, 36(6): 130-136.
- Zhang J L, Ouyang T P, Huang T L, *et al.* Comparison of typical interpolation methods for spatial distribution of Cd in soil[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(6): 130-136.
- [19] 王锐, 邓海, 严明书, 等. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4749-4756.
- Wang R, Deng H, Yan M S, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in southern Youyang County, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10): 4749-4756.
- [20] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. 土壤, 2018, 50(6): 1119-1125.
- Yu T, Yang Z F, Wang R, *et al.* Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. *Soils*, 2018, 50(6): 1119-1125.
- [21] 廖书林, 郎印海, 王延松, 等. 辽河口湿地表层土壤中 PAHs 的源解析研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(3): 490-497.
- Liao S L, Lang Y H, Wang Y S, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the topsoil of Liaohu estuarine wetlands[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(3): 490-497.

- [22] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- Bao L R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- [23] Jiang F, Ren B Z, Hursthouse A, *et al.* Distribution, source identification, and ecological-health risks of potentially toxic elements (PTEs) in soil of thallium mine area (southwestern Guizhou, China) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(16): 16556-16567.
- [24] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- GB 15618-2018, Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- [25] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(5): 1501-1511.
- [26] 吴正祥, 周勇, 木合塔尔·艾买提, 等. 鄂西北山区耕层土壤 pH 值空间变异特征及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(2): 488-498.
- Wu Z X, Zhou Y, AMAT M, *et al.* Spatial variability of soil pH value and its influencing factors in the soil layer of northwestern Hubei Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(2): 488-498.
- [27] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- Ma H H, Yu T, Yang Z F, *et al.* Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- [28] 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.
- [29] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 507-515.
- Dai B, Lv J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [30] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报, 2017, **48**(2): 474-480.
- Zhan T L, Huang Y, Teng Y, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan mining areas, Guizhou Province [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(2): 474-480.
- [31] 杨琼. 广西岩溶区土壤 Cd 等元素次生富集、生态风险与防控[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- Yang Q. Secondary enrichment, ecological risk, prevention and control of Cd and other elements in karstic soils in Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [32] Yang Q, Yang Z F, Filippelli G M, *et al.* Distribution and secondary enrichment of heavy metal elements in karstic soils with high geochemical background in Guangxi, China[J]. *Chemical Geology*, 2021, **567**, doi: 10.1016/j.chemgeo.2021.120081.
- [33] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, *et al.* Soil acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(3): 399-408.
- [34] Li J Y, Xu R K, Zhang H. Iron oxides serve as natural anti-acidification agents in highly weathered soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, **12**(6): 876-887.
- [35] 高月, 孙荣国, 叶彩, 等. 贵州省丹寨县某铅锌矿区土壤重金属污染生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(3): 928-936.
- Gao Y, Sun G R, Ye C, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metal pollution in soil of a lead-zinc mine area in Danzhai County, Guizhou Province, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(3): 928-936.
- [36] 余飞, 张永文, 严明书, 等. 重庆汞矿区耕地土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J]. 环境化学, 2022, **41**(2): 536-548.
- Yu F, Zhang Y W, Yan M S, *et al.* Heavy metal pollution and human health risks assessment of soil and crops near the mercury ore in Chongqing[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(2): 536-548.
- [37] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 886-894.
- Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 886-894.
- [38] 姚丽贤, 李国良, 何兆桓, 等. 施用禽畜粪对两种土壤 As、Cu 和 Zn 有效性的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(1): 127-135.
- Yao L X, Li G L, He Z H, *et al.* Bioavailability of As, Cu and Zn in two soils as affected by application of two types of animal manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, **46**(1): 127-135.
- [39] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 63-74.
- Wang M, Li S T, Ma Y B, *et al.* Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(1): 63-74.
- [40] 沈欣, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(8): 1449-1454.
- Shen X, Zhu Q H, Zhu H H, *et al.* Effects of agronomic measures on accumulation of Cd in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, **34**(8): 1449-1454.
- [41] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2469-2479.
- Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2469-2479.
- [42] 李玉峰, 赵中秋, 祝培甜, 等. 基于土壤重金属污染风险管控的土壤质量评价: 以某县级市为例[J]. 地学前缘, 2019, **26**(6): 207-215.
- Li Y F, Zhao Z Q, Zhu P T, *et al.* Soil quality assessment based on risk control of heavy metal pollution in soil: a case study of an industrial city in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 207-215.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)