

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

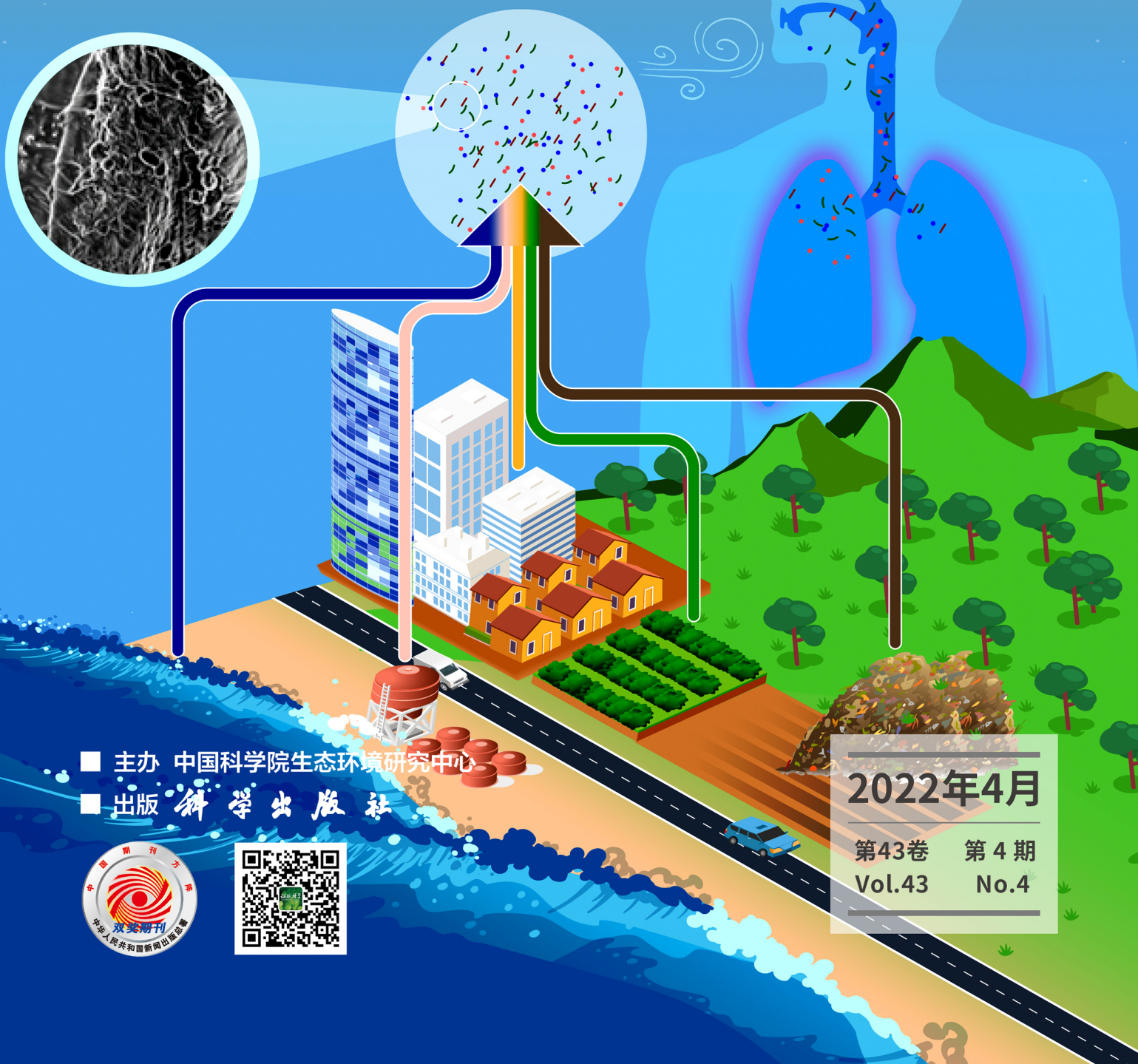
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征

王雪雯¹, 刘鸿雁^{1,2*}, 顾小凤³, 涂宇¹, 于恩江², 吴攀²

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 3. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550025)

摘要: 黔西北喀斯特地质高背景和历史遗留土法炼锌污染叠加, 导致土壤重金属污染严重. 为了解不同土地利用方式对土壤重金属分布的影响, 选择威宁县某在产锌粉厂小流域为研究区域, 共采集表层和剖面土壤样品 126 件, 对农用地、荒地和林地土壤重金属 (Cd、As、Pb、Cu 和 Zn) 的空间分布、来源和生态风险进行分析和评价. 结果表明, 研究区表层土壤 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 平均值为 8.14、45.07、263.97、41.36 和 716.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是背景值的 1.29~12.33 倍, 除 Zn 外, 土壤重金属表现为: 农用地 > 荒地 > 林地; 从空间分布上看, 重金属含量高的土壤集中分布在锌粉厂和矿渣堆放点周边; 在土壤剖面上, 表层重金属普遍高于底层, 荒地分布达显著差异水平, 底层土壤重金属均高于背景值, 表现出地质高背景的特征. 相关分析和主成分分析结果显示, 3 种土地利用方式下表层土壤的 Pb、Zn 和 As 主要受到矿业和交通等人类活动的影响, Cd 和 Cu 污染是地质高背景和人类活动共同作用的结果. 土壤重金属 Cd 的单项生态风险系数最高, 达到很强或极强风险, As、Zn、Cu 和 Pb 达轻微或中等风险, 研究区综合潜在生态风险指数总体表现为强生态风险, 农用地风险强度高, 荒地和林地相对较低. 在喀斯特地质高背景区, 铅锌冶炼对区域土壤重金属分布和累积的影响大于土地利用方式, 土壤重金属污染叠加严重, 生态风险高, 应加强对重金属污染土壤的严格管控.

关键词: 地质高背景; 铅锌冶炼; 土壤重金属; 土地利用方式; 潜在生态风险指数

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-0094-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202107112

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background

WANG Xue-wen¹, LIU Hong-yan^{1,2*}, GU Xiao-feng³, TU Yu¹, YU En-jiang², WU Pan²

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, China; 3. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550025, China)

Abstract: The high geological background and the residual pollution of historical zinc smelting in the karst area of northwest Guizhou has led to serious soil heavy metal pollution. In order to understand the characteristics of soil heavy metal pollution in agricultural land, wasteland, and forestland, 126 surface and profile soil samples were collected from a typical zinc powder factory-polluted small watershed in Weining County, Northwest Guizhou Province. The concentrations and distribution characteristics of Cd, As, Pb, Cu, and Zn in soils were studied. The results showed that the average $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Cu})$, and $\omega(\text{Zn})$ in the surface soil were 8.14, 45.07, 263.97, 41.36, and 716.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, which were 1.29-12.33 times higher than the background values. The content of heavy metals in soil of different land uses in descending order was agricultural land, wasteland, and forestland. From the perspective of spatial distribution, the soil with high heavy metal concentration was concentrated around the zinc smelting plant and slag, and the accumulation of heavy metals in soil was greatly affected by the pollution sources of mining activities but less affected by the land use mode. In soil profile, heavy metals in the surface layer were generally higher than those in bottom layers, showing a significant difference ($P < 0.05$) in wasteland. Five heavy metals in 80-100 cm soil were higher than the background value, reflecting the existence of a high geological background value. Correlation analysis and principal component analysis showed that Pb, Zn, and As in the surface soil were mainly affected by human activities such as mining and transportation, whereas Cd and Cu were both affected by high geological background and human activities. The single ecological risk coefficient of Cd in soil was the highest, which reached very strong or very strong risk, whereas As, Zn, Cu, and Pb reached slight or medium risk. The comprehensive potential ecological risk index indicated strong ecological risk, which in agricultural land was higher than that in wasteland and forestland. In the karst high geological background area, the influence of lead and zinc smelting on the distribution and accumulation of heavy metals in soils was greater than that of land use; soil heavy metal pollution was serious, and ecological risk was high in this area. Therefore, strict control of heavy metal-contaminated soil should be strengthened.

Key words: geological background; lead-zinc smelter; soil heavy metals; land use type; potential ecological risk coefficient

贵州碳酸盐山地面积为 $12.95 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省土地总面积的 73.6%^[1]. 有研究显示, 碳酸盐岩发育形成的土壤通常具有显著的重金属富集特征, 尤其是镉^[2]. Cd 元素的富集被认为是与地质高背景有关^[3~5]. 此外, 这一地区矿产资源十分丰富, 如广西北部部的铅锌矿、贵州西北部的煤矿和铅锌矿等, 有较长的矿业开采和冶炼历史. 矿山的长期开采和

尾渣随意堆弃加重了该地区局部土壤的重金属污染^[6]. 黔西北是我国土法炼锌活动最为典型的区域

收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42067028); 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府联合基金项目(U1612442); 贵州省科技计划项目(黔科合后补助[2020]3001)

作者简介: 王雪雯(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业资源与环境土壤学, E-mail: 2546355956@qq.com

* 通信作者, E-mail: hylu@gzu.edu.cn

之一,虽然土法炼锌活动已经停止,但其遗留下的炉渣对环境产生的影响却不可忽略^[7]。

西南碳酸盐岩地区还是我国农用地土壤重金属点位超标比例最高的地区^[8,9]。农用地安全是保障国家粮食安全的前提,因而地质高背景与矿区污染叠加区周边农用地的土壤重金属污染问题更值得关注。针对重金属含量高于农用地土壤污染风险筛选值(管制值)的土壤,文献^[10]中提到退耕还林这一管控措施。不同土地利用方式会对土壤重金属分布和积累产生较大的影响。已有研究证实,林地较耕地保持较高的土壤酶活性,同时林地作为重金属的巨大储存库,对重金属具有明显的消减作用^[11],是减轻重金属污染的最佳土地利用选择^[12]。对不同土地利用方式下的土壤重金属累积特征进行研究,能够了解重金属的动态变化以及土地利用方式合理性,同时对预防土壤退化及土地资源的可持续开发利用提供科学依据^[13]。

近年来,有大量国内外学者对地质高背景区^[14~21]、铅锌矿区^[22~28]和土法炼锌区^[29]等区域的土壤重金属污染特征进行了研究,部分学者针对城市^[13,30]、农用地^[31]和基于小流域尺度^[32]的不同土地利用方式下土壤重金属的空间分布和生态风险进行了分析。但目前对地质高背景区与矿区污染叠加下不同土地利用方式的土壤重金属污染分布特征的研究较少。工矿业排放、农业化学品投入和地质高背景叠加,造成这一地区土壤重金属富集和农产品超标,是区域突出的环境问题。因此,本文在地质高背景区域(威宁县)选取有长期土法炼锌历史和现存炼锌厂的小流域作为研究对象,为更清晰地了解农用地和林地与其它经历自然成土过程的土壤区别,选择了区域内的荒地利用类型加以比较。通过分析3种土地利用方式下土壤重金属的含量和空间分布特征,结合多元统计分析对污染来源进行探讨,使用潜在风险系数法进行综合评价,以期为该区域及周边土壤重金属污染防治以及安全利用提供理论依据及指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在贵州省威宁县,地处贵州省西北部,平均海拔2 200 m,属亚热带季风性湿润气候,年降雨量926 mm,年温差小,日温差大。境内主要有煤和铅锌等矿产资源,是典型的土法炼锌活动遗留场地。土壤类型主要为黄棕壤,其中农用地占整个流域的60%,居民建设用地和工矿业用地占流域面积的13.3%,其余为林地和荒地。主要作物有玉米、马铃

薯、豆类和少量蔬菜,耕作方式以坡耕地种植为主,有机质来源主要靠化肥和有机肥的施入。

1.2 样品采集与测定

综合考虑流域地形地貌与水文特征等实际情况,采用网格布点与随机取样相结合的方法在研究区范围内选择农用地、荒地和林地3种典型利用的土壤进行布设采集,在避开明显污染源的前提下,尽量使取样点基本分布均匀^[33]。共布设81个采样点,其中农用地45个、荒地18个和林地18个。采样深度为0~20 cm,在采样中心点周围30 m范围内3~5处多点采集,均匀混合后装袋,并利用GPS记录每个采样点的地理坐标。在此基础上,每种土地利用类型各选择3个采样点采集剖面土壤,分别采集0~20、20~40、40~60、60~80和80~100 cm不同深度土样,9条土壤剖面共45件土壤样品。共采集表层土样和剖面土样126件。土壤样品分布情况如图1所示。

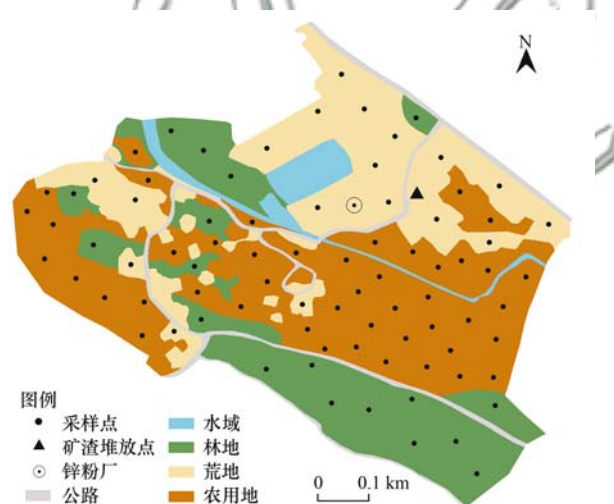


图1 土壤采样点及土地利用方式分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites and land use types

样品于室内风干,除去植物叶片、根系和石块等杂质,取出一份样品用于土壤pH值等理化性质检测(表1),其余样品用玛瑙研钵研磨过0.149 mm尼龙筛后用于土壤重金属的测定。

土壤pH采用pH计(pHS-3C)测定(土:水=1 g:2.5 mL)^[34],土壤重金属Cd、Cu、Zn、As和Pb的含量参照文献^[35],采用HNO₃-HF-HClO₄消解土样,用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICAP RQ)测定含量。本实验所用的药品均为优级纯,所用的玻璃器皿和塑料器皿均用10%的稀硝酸浸泡24 h,后用超纯水洗涤干净^[36]。样品分析过程中,采用国家土壤标准物质(GSS-5a)进行质量控制,实验全程做空白样和平行样,各种金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

表 1 表层土壤理化指标¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples

土地利用方式	ω (有机质)/g·kg ⁻¹	pH
农用地($n=45$)	45.34 ± 2.35a	7.25 ± 0.14
荒地($n=18$)	26.61 ± 1.23b	7.59 ± 0.21
林地($n=18$)	40.61 ± 3.74a	6.96 ± 0.30

1) 不同小写字母表示差异显著($P=0.05$)

1.3 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法由瑞典科学家 Hakanson^[37]于 1980 年提出,是目前评价土壤重金属污染程度和生态风险常用的方法.其计算公式如下^[37]:

$$E_r^i = T_r^i \times (C^i/C_n^i)$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i$$

式中, E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; C^i 为土壤中重金属 i 的实测值; C_n^i 为重金属 i 的背景值; T_r^i 为重金属 i 的毒性系数,重金属 Cd、Pb、As、Cu 和 Zn 的毒性系数分别为 30、5、10、5 和 1^[38]; RI 为土壤中重金属的综合潜在生态风险指数.潜在生态风险指数分级标准见表 2.

表 2 重金属潜在生态风险指数分级标准

Table 2 Classification criteria for the potential ecological risk index of heavy metals

E_r^i	生态风险等级	RI	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
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强		

表 3 不同土地利用方式的表层土壤重金属元素含量统计¹⁾

Table 3 Statistics of heavy metal elements in the surface soils of different land use patterns

土地利用方式	项目	重金属元素				
		Cd	As	Pb	Cu	Zn
农用地	范围	4.22 ~ 14.64	31.50 ~ 89.19	126.8 ~ 1 714.7	22.42 ~ 90.4	271 ~ 2 991.5
	均值 ± 标准差	8.69 ± 2.0a	46.61 ± 12.0a	361.83 ± 29.2a	43.78 ± 15.6a	751.28 ± 78.0a
	超筛选值/%	100	88.89	100	4.44	100
	超管制值/%	100	0	26.67	—	—
荒地	范围	1.94 ~ 13.65	26.03 ~ 51.89	86.42 ~ 581.30	29.00 ~ 42.99	216.50 ~ 2 084.80
	均值 ± 标准差	6.70 ± 4.4b	41.84 ± 9.1ab	274.60 ± 21.6a	34.47 ± 4.9b	779.73 ± 82.1a
	超筛选值/%	100	83.33	83.33	0	88.89
	超管制值/%	66.67	0	0	—	—
林地	范围	1.25 ~ 9.46	27.30 ~ 47.94	65.00 ~ 631.30	15.44 ~ 52.09	155.80 ~ 1 256.60
	均值 ± 标准差	6.61 ± 3.1b	39.78 ± 7.2b	221.8 ± 25.1a	30.84 ± 14.3b	478.53 ± 48.4a
	超筛选值/%	100	77.78	66.67	0	83.33
	超管制值/%	94.44	0	0	—	—
平均值		8.14	45.07	263.97	41.36	716.98
变异系数		0.33	0.26	0.85	0.35	0.81
贵州土壤背景值		0.66	20.00	35.20	32.00	99.50

1) 重金属单位为mg·kg⁻¹; 不同小写字母表示同列差异显著($P=0.05$); “—”表示无相关数据

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 23.0 进行土壤重金属含量、污染指数、生态风险指数、相关性和主成分的统计和分析;采用 ArcGIS 10.5 对土壤采样点和重金属空间分布进行分析和作图.

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用方式表层土壤重金属含量分析及空间分布特征

研究区的表层土壤重金属含量特征见表 3,土壤 ω (Cd)、 ω (As)、 ω (Pb)、 ω (Cu)和 ω (Zn)平均值分别为 8.14、45.07、263.97、41.36 和 716.98 mg·kg⁻¹,是贵州省土壤元素背景值的 12.33、2.25、7.50、1.29 和 7.20 倍.除 Cu 以外,其余元素超背景值点位的比例均为 100%,Cu 的样点超标率为 75.44%,说明这些元素在此处富集比较严重.进一步分析表明农用地的 Cd 和 Cu 含量均值显著大于荒地和林地的,As 含量为农用地显著大于林地,Pb 和 Zn 在 3 种土地利用方式下无显著差异.除 Zn 以外,其余元素含量平均值均为农用地最高,说明农业生产活动可能会导致土壤中重金属的增加.

与文献[10]给出的土壤污染风险筛选值进行比较发现,Cd、As、Pb、Cu 和 Zn 在农用地超筛选值的比例分别为 100%、88.89%、100%、4.44% 和 100%,在荒地超筛选值的比例分别为 100%、83.33%、83.33%、0% 和 88.89%,在林地超筛选值的比例分别为 100%、77.78%、66.67%、0% 和 83.33%.对比表 3 可知,农用地超筛选值和管制值的比例最高,林地最低,3 种土地利用方式下土壤

Cd、Pb 和 Zn 超筛选值比例都非常高,说明流域内的土壤受到严重的污染,农作物生长可能存在风险. 变异系数(CV)可以表征重金属元素在空间上的离散和变异程度,其值越大表明该污染特征受外界因素影响越大^[23]. $CV < 0.16$ 为弱变异, $0.16 \leq CV \leq 0.36$ 为中等变异, $CV > 0.36$ 为强变异^[39]. 5 种重金属的变异系数由大到小的顺序为 Pb(0.85) > Zn(0.81) > Cu(0.35) > Cd(0.33) > As(0.26). Pb 和 Zn 为强变异,Cu、Cd 和 As 为中等变异. 说明 Pb 和

Zn 受人类活动的影响较大. 利用反距离权重法对土壤重金属含量进行空间插值分析,结果如图 2 所示. Cd、As、Pb 和 Zn 含量的空间分布特征基本一致,含量高值区主要分布在锌粉厂和矿渣堆放点周围,受矿业活动影响较大; Cu 部分较高值区位于矿渣堆放处,受矿业活动影响较其它重金属小. 流域东北部的公路为 365 国道,车流量大,在该公路与锌粉厂中间,各土壤重金属含量都较高,有受矿业和交通叠加污染的趋势. 5 种重

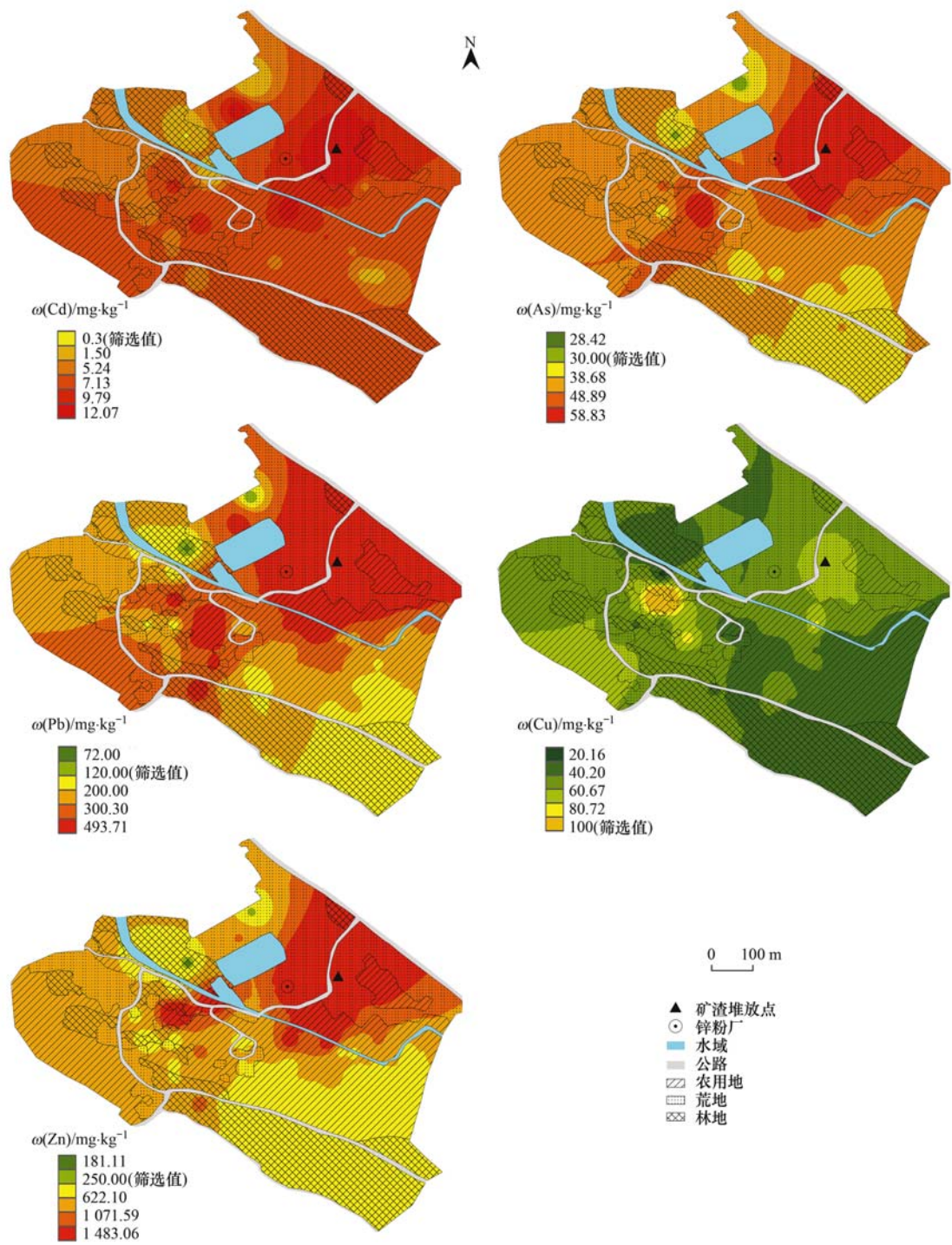


图2 土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil heavy metal content

金属的部分高值区位于流域中部偏西处,可能是由于该处有一个低洼,附近土壤的重金属受雨水冲刷在此处聚集. As、Pb、Cu 和 Zn 的低值区均分布在西北部和东南部的林地,表明林地可能通过树冠和较高的土壤酶活性来减缓重金属污染. 综上,重金属含量的空间分布受矿业活动和交通运输的影响较大,受土地利用方式的影响相对较小.

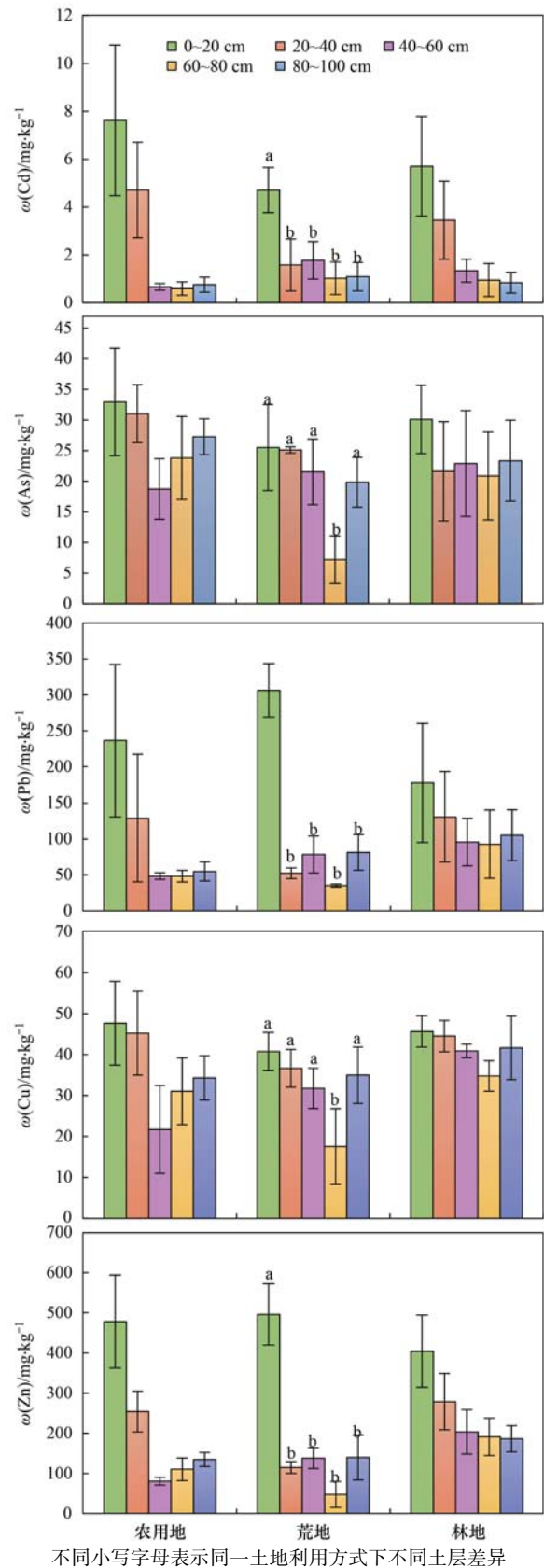
2.2 土壤剖面重金属分布特征

同一重金属在不同土地利用方式下的垂向分布规律不同,土壤剖面重金属分布特征见图 3. 受测的 5 种重金属中,Cd、Pb 和 Zn 的含量随深度变化明显,As 和 Cu 含量随深度变化差异性较小,元素自身的化学性质会影响其迁移的能力^[40]. 重金属含量随深度增加,大致呈现出先减少后增加的变化规律. 荒地的 Cd、Pb 和 Zn 含量 0~20 cm 层显著大于其余 4 层 ($P < 0.05$),农用地和林地的 0~20 cm 层高于 20~40 cm, 20~40 cm 明显高于其余 3 层,但差异未达显著. 出现这种情况的原因可能是 3 种土地利用方式的表层土壤均有外源的添加,但农用地的 Cd、Pb、Zn 受到人类的翻耕、灌溉等活动影响而向土壤深处迁移,且在当地调查时发现,当地居民有将废渣倒入土中进行翻垦的习惯,这可能也是农用地受污染比较严重的原因之一. 而林地植被大多为松林,酸性土壤下,重金属更容易迁移^[41],甚至在大型树木的根系影响下迁移得更深,这可能也是林地中间两层(40~80 cm)As、Pb、Cu 和 Zn 含量比农用地和荒地高的原因. 比较 3 种土地利用方式的剖面变化可知,荒地的变化最明显,其次为农用地,林地最平缓,说明土地利用方式会影响土壤重金属的垂直分布.

3 种土地利用方式下土壤最底层的 5 种重金属含量基本都高于贵州省背景值,一方面可能是以碳酸盐岩为代表的沉积岩发育地区土壤普遍存在地球化学高背景现象^[1],另一方面可能是受铅锌采矿区基岩铅锌矿化影响. 母质(岩)自身具有较高含量重金属,进而在风化成土过程中土壤继承母质(岩)中的重金属,是西南地球化学异常区土壤具有较高背景值(尤其是 Cd)的最主要自然因素^[42].

2.3 表层土壤重金属相关性分析

重金属相关性分析可以显示不同重金属之间的物源性并推测其可能的来源^[43]. 相关性高的重金属之间可能具有同源性^[31]. 由表 4 可知,农用地表层土壤 Cd、Zn、As 和 Pb 分别两两呈显著正相关($P < 0.01$),Cu 与其它元素无明显相关性. 荒地表层土壤 Pb 与其余 4 种元素间均分别呈显著正相关关系,Zn-As 也呈显著正相关关系($P < 0.01$). 林地土壤 Pb 与 Cu、Zn、As 分别呈显著正相关关系($P <$



不同小写字母表示同一土地利用方式下不同土层差异显著 ($P < 0.05$), 无字母表示差异不显著

图3 土壤重金属含量垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of soil heavy metal content in the study area

0.01), Cd-As 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$). 因此,推测农用地 Cd、Zn、As 和 Pb 有相似的来源,

而 Cu 有单独的来源. 荒地和林地 Cd、Cu、Zn、As 和 Pb 之间可能存在复合污染源. 土壤性质差异会对重金属在土壤中的迁移积累产生影响. 农用地土壤中有机质与 As 和 Pb 呈显著正相关关系 ($P < 0.01$), 荒地土壤有机质仅与 As 有显著正相关关系 ($P < 0.05$), 林地土壤有机质与 Cd 有显著正相关关系 ($P < 0.01$). 可以看出有机质含量对重金属

的影响不大. 在农用地上, 土壤 pH 与 Cd、Zn、As 和 Pb 都有较好的相关关系, 但在荒地和林地上 pH 与重金属无显著关系. 说明在不同土地利用方式下土壤 pH 对土壤重金属的影响不同. 为了更准确地判断影响不同土地利用方式重金属含量的因素, 接下来通过主成分分析对土壤中重金属来源进行解析.

表 4 不同土地利用方式的表层土壤重金属的相关性分析¹⁾
Table 4 Correlation analysis of soil heavy metals in different land use patterns

土地利用方式	指标	Cd	Cu	Zn	As	Pb	有机质	pH
农用地	Cd	1						
	Cu	0.048	1					
	Zn	0.596 **	0.117	1				
	As	0.401 **	0.038	0.625 **	1			
	Pb	0.463 **	0.085	0.810 **	0.848 **	1		
	有机质	0.113	-0.104	0.237	0.424 **	0.498 **	1	
	pH	0.466 **	0.037	0.327 *	0.379 *	0.328 *	0.191	1
荒地	Cd	1						
	Cu	0.462	1					
	Zn	-0.126	0.111	1				
	As	0.399	0.116	0.766 **	1			
	Pb	0.620 **	0.644 **	0.643 **	0.747 **	1		
	有机质	0.417	-0.092	-0.002	0.560 *	0.126	1	
	pH	-0.153	0.387	0.358	0.130	0.220	-0.256	1
林地	Cd	1						
	Cu	0.346	1					
	Zn	0.181	0.816 **	1				
	As	0.533 *	0.339	0.663 **	1			
	Pb	0.149	0.830 **	0.998 **	0.631 **	1		
	有机质	0.712 **	0.276	0.076	0.302	0.072	1	
	pH	-0.323	-0.110	0.282	0.061	0.265	-0.468	1

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

2.4 重金属主成分分析

土壤重金属含量主要受成土母质与人类活动的影响,主成分分析能够有效判别重金属元素的污染来源^[44]. 利用 SPSS 25.0 软件对土壤重金属含量进行 KMO 和 Bartlett 检验,得到的统计量值均大于 0.5, Bartlett 球度检验相伴概率均为 0.000,表明数据适合进行主成分分析. 各土地利用方式均分别提取到 2 个特征值大于 1 的主成分,农用地、荒地和林地的累计方差贡献率分别为 79.94%、84.83% 和 88.02%,可解释土壤重金属的大部分信息,分析结果见表 5.

农用地第一主成分载荷较高的是 Cd、Zn、As 和 Pb,荒地和林地第一主成分载荷较高的是 Cd、As、Pb、Cu 和 Zn. 研究区土壤 Cd、Pb 和 Zn 的平均含量远超过贵州省土壤背景值,且变异系数较大,表明这些元素可能主要是受人类活动的影响. 从图 2 中看出 Cd、As、Pb、Cu 和 Zn 含量的高值区和较高值区均主要分布在锌粉厂、矿渣堆放点和 365 国道

周围. 周艳等^[22]对铅锌矿周边土壤的研究表明,铅锌矿的冶炼和所产生的废渣废水废气等是 Cd、Zn、As 和 Pb 的主要来源. 土法炼锌会产生含 Cd、Zn 和 Pb 等元素的污染物^[45]. 机动车辆排放的尾气,使空气中 Cd、Zn、Cu 和 Pb 等重金属含量提升,继而利用大气传输并沉降到土壤中^[46]. 因此第一主成分可能来源于铅锌矿业活动、历史遗留土法炼锌矿渣和交通运输等人为源.

农用地的 Cu 在第二主成分上有较高的载荷,农用地的 Cu 含量显著大于荒地和林地,且仅有农用地的 Cu 含量有点位超筛选值. 农业生产中污水农灌、农药和化肥等不合理的施用会导致 Cu 含量升高^[15,22],因此,农用地第二主成分代表了农业活动. 荒地和林地上的 Cd 和 Cu 在第二主成分上有较高的载荷,前文已知 Cu 的污染最小,荒地和林地 Cu 的平均含量比较接近背景值,且底层含量只是略少于表层(图 3). 研究表明 Cu 主要受地质背景的影响^[15,20]. 图 2 显示, Cd 含量除矿点外在整个流域分

布较其它重金属均匀,即使是东南处林地 Cd 含量也较高,这可能是与当地为镉地质高背景有关.于元赫等^[47]对高青县研究和王乔林等^[20]对滇西地区的

研究均认为 Cd 含量在一定程度上受自然地质背景的影响.因此,荒地和林地的第二主成分可能来源于地质源.

表 5 不同土地利用方式表层土壤重金属主成分分析矩阵

Table 5 Matrix analysis of heavy metals in the surface soils of agricultural land

元素	农用地		荒地		林地	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Cd	0.704	0.322	0.608	0.640	0.437	0.846
As	0.848	-0.288	0.844	-0.393	0.758	0.318
Pb	0.927	-0.210	0.982	0.078	0.952	-0.293
Cu	0.207	0.916	0.586	0.579	0.854	0.509
Zn	0.901	0.024	0.682	-0.694	0.960	-0.253
初始特征值	2.928	1.069	2.856	1.385	3.322	1.079
方差贡献率/%	58.562	21.382	57.125	27.703	66.444	21.577
累积方差贡献率/%	58.562	79.944	57.125	84.828	66.444	88.021

2.5 潜在生态风险评价

土壤重金属污染可直接威胁食品安全,因此评价重金属污染土壤的潜在生态危害至关重要.各土地利用方式重金属的潜在生态风险系数(E_r^i)计算结果见图 4.农用地 5 种重金属 E_r^i 平均值从大到小依次为: Cd (389.99) > Pb (49.67) > As (22.98) > Cu (7.28) $\approx$ Zn (7.14), 土壤 As、Zn 和 Cu 的潜在生态风险系数平均值均小于 40, 表现为轻微生态风险. Pb 整体表现为中等生态风险, 但其中最大值点位达到了很强风险. Cd 的生态风险等级最高, 达到极强. 荒地和林地 5 种重金属 E_r^i 平均值从大到小依次为: Cd > Pb > As > Zn > Cu, 荒地土壤 As、Zn、Cu 和 Pb 的生态风险等级与农用地相同, Cd 的生态风险等级为很强. 林地土壤 As、Zn、Cu 和 Pb 的潜在生态风险系数平均值均小于 40, 表现为轻微生态风险, Cd 的生态风险等级达到极强. 3 种土地利用方式下 Cd 的生态风险等级均达到很强以上, 这与该流域为镉地质高背景区有一定关系.

图 5 为研究区土壤重金属综合潜在生态风险空间分布图, 及各土地利用方式下不同生态风险程度

等级所占的比例. 从中可以看出整个研究区总体表现为强生态风险, 流域内很强生态风险区基本与矿区点位吻合. 矿区较远处生态风险也比较高, 一方面可能是矿业活动污染扩散, 另一方面可能是研究区本身就处于地质高背景区. 农用地几乎全是强风险等级以上, 中等风险仅占 4.44%, 说明农用地的污染状况相当严重. 而荒地的强风险等级及以上也达到了 61.11%, 林地达到了 55.56%. 荒地和林地的生态风险相对农用地的较低, 但污染程度也比较严重.

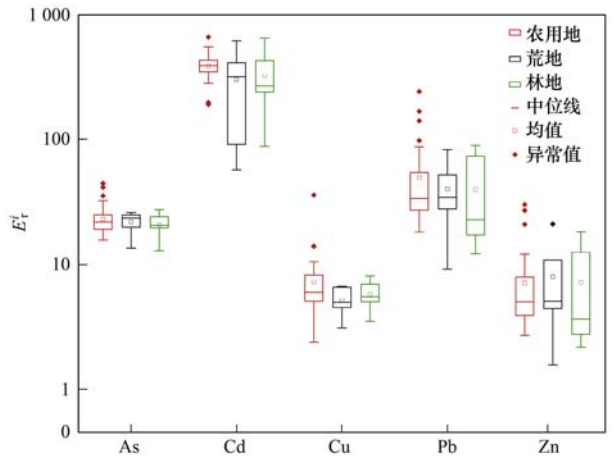


图 4 土壤重金属潜在生态风险系数

Fig. 4 Potential ecological risk coefficient of soil heavy metals

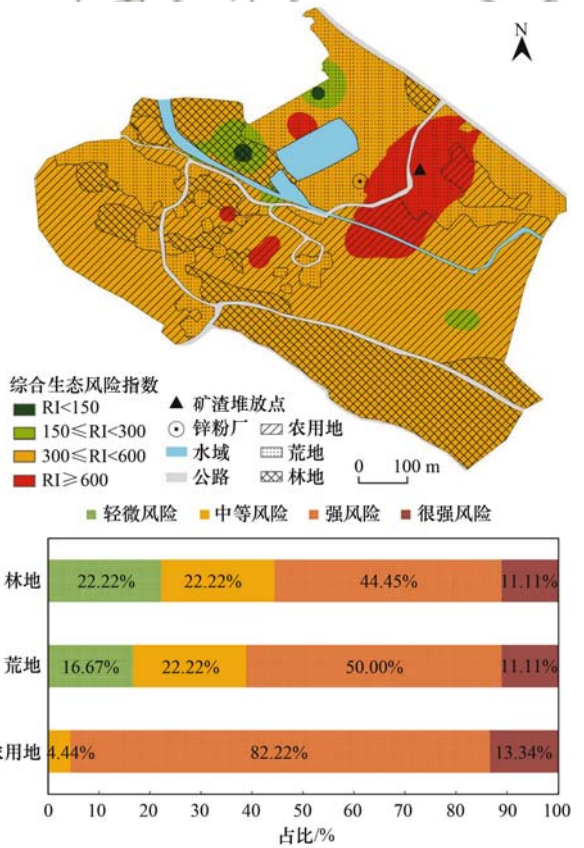


图 5 土壤重金属综合潜在生态风险评价结果

Fig. 5 Results of potential ecological risk assessment of soil heavy metals

表明虽然林地在土壤保持、净化环境方面有一定的作用,但在矿业活动的影响下作用并不明显,所以应加强对锌粉厂的监管,对已污染土壤采取修复管控措施。

3 结论

(1)研究区表层土壤 Cd、As、Pb、Cu 和 Zn 含量的平均值分别达背景值的 12.33、2.25、7.50、1.29 和 7.20 倍,表层土壤重金属总体表现为:农用地 > 荒地 > 林地。在空间分布上,重金属累积主要受污染源影响,土地利用方式对重金属累积的影响相对较小。在垂直分布上,随深度增加,3 种土地利用方式的土壤重金属含量大致呈现出先减少后增加的变化规律。底层重金属总体高于贵州省背景值,表现出地质高背景特征。

(2)结合土壤重金属含量分布特征及多元统计分析结果,3 种土地利用方式表层土壤重金属 As、Pb 和 Zn 含量主要受到铅锌矿业活动、历史遗留矿渣、生活垃圾污水和交通运输等人类活动的影响,农用地的 Cu 含量主要受农业活动的影响,荒地和林地的 Cd 和 Cu 含量同时受到地质背景和人类活动的影响。

(3)潜在生态风险指数法评价结果显示,3 种土地利用方式下土壤 Cd 的单项生态风险系数为最高,达到很强或极强风险,As、Zn、Cu 和 Pb 为轻微或中等风险。综合潜在生态风险为强风险水平,农用地强风险等级占比最高。应加强对农用地土壤重金属污染的严格管控和修复,以确保土壤安全利用。

参考文献:

- [1] 张莉,季宏兵,高杰,等. 贵州碳酸盐岩风化壳主元素、微量元素及稀土元素的地球化学特征[J]. 地球化学, 2015, 44(4): 323-336.
- Zhang L, Ji H B, Gao J, *et al.* Geochemical characteristics of major, trace and rare earth elements in typical carbonate weathered profiles of Guizhou Plateau[J]. *Geochimica*, 2015, 44(4): 323-336.
- [2] Wen Y B, Li W, Yang Z F, *et al.* Enrichment and source identification of Cd and other heavy metals in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China[J]. *Chemosphere*, 2020, 245, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125620.
- [3] 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.
- [4] 罗慧,刘秀明,王世杰,等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1538-1544.
- Luo H, Liu X M, Wang S J, *et al.* Pollution characteristics and sources of cadmium in soils of the karst area in South China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(5): 1538-1544.
- [5] 陈拙,吴攀,孟伟,等. 喀斯特地区清虚洞组地层风化对土壤重金属累积的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3747-3753.
- Chen Z, Wu P, Meng W, *et al.* Effects of weathering of Qingxudong formation on heavy metal accumulation in soil in Karst area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3747-3753.
- [6] 张健琳,瞿明凯,陈剑,等. 中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4414-4421.
- Zhang J L, Zhai M K, Chen J, *et al.* Meta-analysis of the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in Southwest China[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4414-4421.
- [7] 冯艳红,郑丽萍,应蓉蓉,等. 黔西北炼锌矿区土壤重金属形态分析及风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2): 142-149.
- Feng Y H, Zheng L P, Ying R R, *et al.* Forms of heavy metals in soils of zinc mining area in northwestern Guizhou Province and their environmental risk[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(2): 142-149.
- [8] 唐世琪,刘秀金,杨柯,等. 典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3913-3923.
- Tang S Q, Liu X J, Yang K, *et al.* Migration, transformation characteristics, and ecological risk evaluation of heavy metal fractions in cultivated soil profiles in a typical carbonate-covered area[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3913-3923.
- [9] 彭敏. 西南典型地质高背景区土壤-作物系统重金属迁移富集特征与控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [10] 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].
- [11] 何如海,薛中俊,刘娜,等. 两种土地利用方式下土壤重金属污染特征与评价[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1858-1864.
- He R H, Xue Z J, Liu N, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soil under two land use[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(8): 1858-1864.
- [12] Fang L C, Liu Y Q, Tian H X, *et al.* Proper land use for heavy metal-polluted soil based on enzyme activity analysis around a Pb-Zn mine in Feng County, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 28152-28164.
- [13] 李梦婷,沈城,吴健,等. 快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4889-4896.
- Li M T, Sheng C, Wu J, *et al.* Content characteristics and ecological risks of heavy metals in the soil of different land uses in rapid urbanization area[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(10): 4889-4896.
- [14] 秦旭芝,罗志祥,季文兵,等. 桂西北地质高背景区有色金属冶炼对周边土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2324-2333.
- Qin X Z, Luo Z X, Ji W B, *et al.* Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soil by nonferrous metal smelting with high geological background in Northwest Guangxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2324-2333.
- [15] 张富贵,彭敏,王惠艳,等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41

- (9): 4197-4209.
- Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, Southwestern, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [16] 贺灵, 吴超, 曾道明, 等. 中国西南典型地质背景区土壤重金属分布及生态风险特征[J]. *岩矿测试*, 2021, **40**(3): 384-396.
- He L, Wu C, Zeng D M, *et al.* Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of southwest China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, **40**(3): 384-396.
- [17] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River draining of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [18] 刘南婷, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 典型喀斯特地区土壤重金属累积特征及环境风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, **38**(5): 797-809.
- Liu N T, Liu H Y, Wu P, *et al.* Accumulation characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in typical karst soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, **38**(5): 797-809.
- [19] 汪花, 刘秀明, 刘方, 等. 喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2895-2903.
- Wang H, Liu X M, Liu F, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of As at a small scale in agricultural soils of the Karst region[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2895-2903.
- [20] 王乔林, 宋云涛, 王成文, 等. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(8): 3693-3703.
- Wang Q L, Song Y T, Wang C W, *et al.* Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in western Yunnan [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8): 3693-3703.
- [21] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- Zhao D J, Wang X Q. Distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in the floodplain soils of the karst area of Yunnan, Guizhou, Guangxi [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1609-1619.
- [22] 周艳, 陈楠, 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.
- [23] Li P Z, Lin C Y, Cheng H G, *et al.* Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **113**: 391-399.
- [24] Wang L J, Lu X W, Li L Y, *et al.* Content, speciation and pollution assessment of Cu, Pb and Zn in soil around the lead-zinc smelting plant of Baoji, NW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(9): 5281-5288.
- [25] 冯乾伟, 王兵, 马先杰, 等. 黔西北典型铅锌矿区土壤重金属污染特征及其来源分析[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2020, **39**(4): 863-870.
- Feng Q W, Wang B, Ma X J, *et al.* Pollution Characteristics and source analysis of heavy metals in soils of typical lead-zinc mining areas in Northwest Guizhou, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2020, **39**(4): 863-870.
- [26] 刘智峰, 呼世斌, 宋凤敏, 等. 陕西某铅锌冶炼区土壤重金属污染特征与形态分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(4): 818-826.
- Liu Z F, Hu S B, Song F M, *et al.* Pollution characteristics and speciation analysis of heavy metals in soils around a lead-zinc smelter area in Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 818-826.
- [27] 张云霞, 宋波, 杨子杰, 等. 广西某铅锌矿影响区农田土壤重金属污染特征及修复策略[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(2): 239-249.
- Zhang Y X, Song B, Yang Z J, *et al.* Characteristics and remediation strategy of heavy-metal polluted agricultural soil near a lead and zinc mine in Guangxi [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(2): 239-249.
- [28] Van Hoang N, Shakirov R B, Thu T H, *et al.* Characteristics of sediment heavy metal levels in lead-zinc ore Cho Don district area, Bac Kan Province, Vietnam[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2021, **56**(3): 278-292.
- [29] Li S, Bi X Y, Li Z G, *et al.* Heavy metal(loid)s contamination in ground dust and associated health risks at a former indigenous zinc smelting area[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(3), doi: 10.3390/IJERPH18030893.
- [30] 赵靛, 梁云平, 陈倩, 等. 中国北方某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]. *Environment Science*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [31] Zhang Y B, Wu F Q, Zhang X S, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in three land-use types on the southern Loess Plateau, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, **189**(9), doi: 10.1007/s10661-017-6140-y.
- [32] 李清良, 吴倩, 高进波, 等. 基于小流域尺度的土壤重金属分布与土地利用相关性研究——以厦门市坂头水库流域为例[J]. *生态学报*, 2015, **35**(16): 5486-5494.
- Li Q L, Wu Q, Gao J B, *et al.* Distribution of heavy metals in topsoils affected by land use patterns at a small watershed scale: a case study in the Bantou Reservoir watershed in Xiamen, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(16): 5486-5494.
- [33] 刘芳枝, 胡俊良, 刘劲松, 等. 南岭泡金山矿产集采区土壤重金属空间分布及风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(1): 86-95.
- Liu F Z, Hu J L, Liu J S, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil in the metal mining area of Paojinshan, Hunan, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(1): 86-95.
- [34] Shen Z J, Xu D C, Li L L, *et al.* Ecological and health risks of heavy metal on farmland soils of mining areas around Tongling City, Anhui, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(15): 15698-15709.
- [35] HJ 803-2016, 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提

- 取-电感耦合等离子体质谱法[S].
- [36] 张连科,李海鹏,黄学敏,等.包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析[J].环境科学,2016,37(3):1139-1146.
- Zhang L K, Li H P, Huang X M, *et al.* Soil heavy metal spatial distribution and source analysis around an aluminum plant in Baotou[J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 1139-1146.
- [37] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [38] 王锐,邓海,贾中民,等.汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J].环境科学,2021,42(6): 3018-3027.
- Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 3018-3027.
- [39] 张丁,黄容,高雪松.山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析[J].环境科学,2022,43(2): 946-956.
- Zhang D, Huang R, Gao X S. Spatial characteristics and potential ecological risk factors of heavy metals in cultivated land in transition zone of mountain plain[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 946-956.
- [40] 孙子媛,文雪峰,吴攀,等.喀斯特地区典型风化剖面重金属超标程度及元素迁移特征研究[J].地球与环境,2019,47(1): 50-56.
- Sun Z Y, Wen X F, Wu P, *et al.* Excessive degrees and migration characteristics of heavy metals in typical weathering profiles in Karst areas[J]. Earth and Environment, 2019, 47(1): 50-56.
- [41] 宋波,刘畅,陈同斌.广西土壤和沉积物砷含量及污染分布特征[J].自然资源学报,2017,32(4): 654-668.
- Song B, Liu C, Chen T B. Contents and pollution distribution characteristics of arsenic in soils and sediments in Guangxi Zhuang autonomous region[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 654-668.
- [42] 王佛鹏,肖乃川,周浪,等.桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(2): 876-885.
- Wang F P, Xiao N C, Zhou L, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals on farmland of geochemical anomaly area in Southwest Guangxi[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 876-885.
- [43] 张又文,韩建华,涂棋,等.天津市郊农田土壤重金属积累特征及评价[J].生态与农村环境学报,2019,35(11): 1445-1452.
- Zhang Y W, Han J H, Tu Q, *et al.* Accumulation characteristics and evaluation of heavy metals in suburban farmland soils of Tianjin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(11): 1445-1452.
- [44] 韩培培,谢俭,王剑,等.丹江口水库新增淹没区农田土壤重金属源解析[J].中国环境科学,2016,36(8): 2437-2443.
- Han P P, Xie J, Wang J, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil from new submerged area in Danjiangkou Reservoir[J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2437-2443.
- [45] 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.
- [46] 王洪涛,张俊华,丁少峰,等.开封城市河流表层沉积物重金属分布、污染源及风险评估[J].环境科学学报,2016,36(12): 4520-4530.
- Wang H T, Zhang J H, Ding S F, *et al.* Distribution characteristics, sources identification and risk assessment of heavy metals in surface sediments of urban rivers in Kaifeng[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(12): 4520-4530.
- [47] 于元赫,吕建树,王亚梦.黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J].环境科学,2018,39(6): 2865-2874.
- Yu Y H, Lv J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the lower Yellow River[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2865-2874.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)