

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

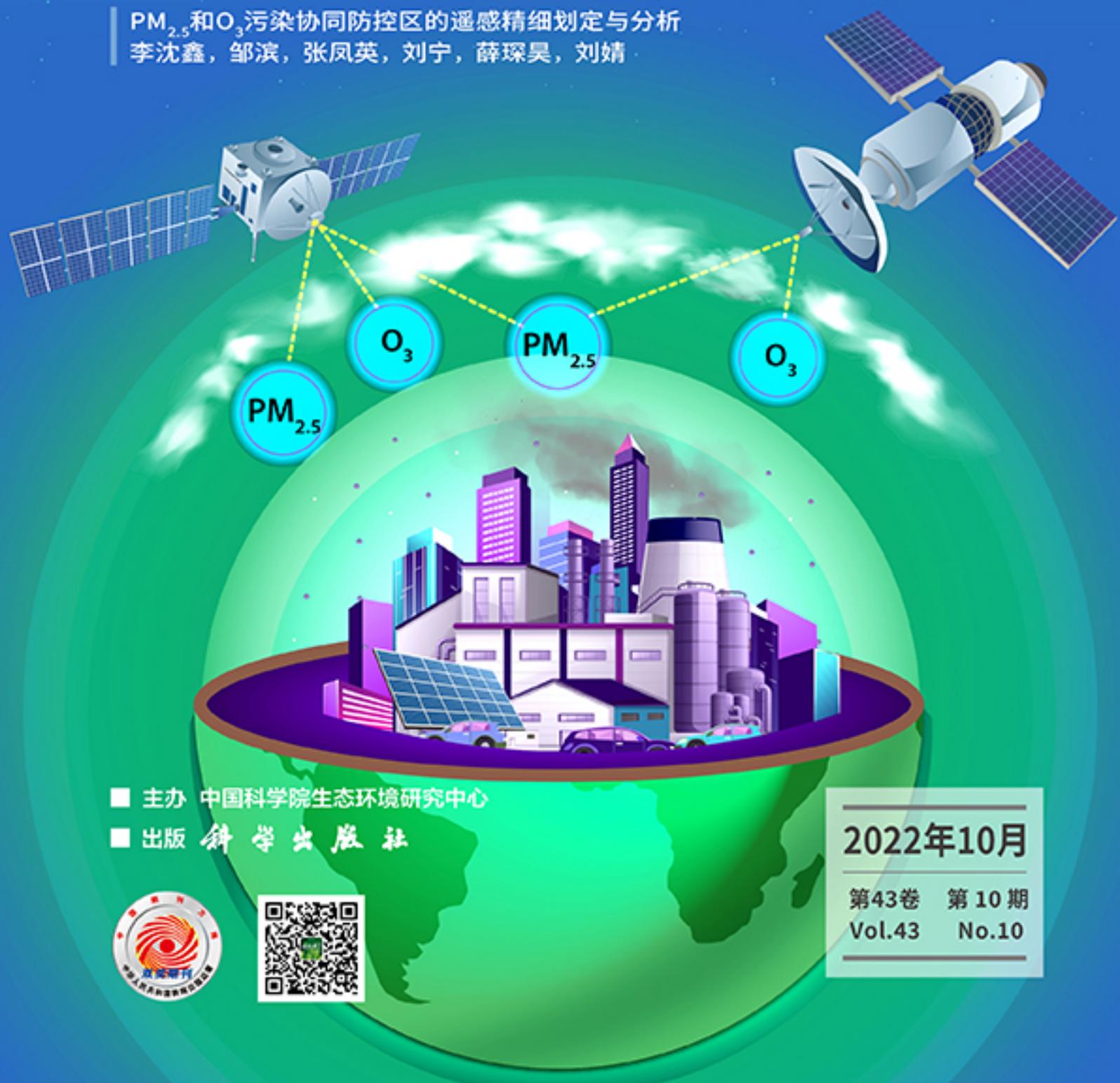
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨昉, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞潼, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂/FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析

陈盟^{1,2}, 潘泳兴¹, 黄奕翔¹, 王橛樞^{3*}, 张睿东¹

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004; 3. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004)

摘要: 以广西阳朔县典型铅锌矿为研究对象, 对其流域内水系表层土壤中 10 种金属元素 (Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb、Hg 和 Pb) 含量进行分析测定. 综合运用 Pearson 相关性分析、主成分分析 (PCA) 和正定矩阵因子分解法 (PMF) 等多种方法, 识别和定量解析污染源及贡献. 在 168 个表层土壤样本分析数据中, 土壤中 Zn、Cd、Hg 和 Pb 的含量平均值高于国家土壤环境质量标准, Sb、Cd、Cu、Pb 和 Zn 的含量平均值分别比当地背景值高出约 1.01、5.50、3.29、9.11 和 10.67 倍, 表明重金属在表层土壤中已经富集. 土壤重金属地累积指数 (I_{geo}) 结果显示, 研究区污染最严重的是 Hg, 其次为 Pb、Zn 和 Mn. 相关性分析和主成分分析结果表明, 区内表层土壤中金属污染源较为复杂, 且明显受到人为活动的影响. Cu、Zn、Cd、Sb、As 和 Pb 主要来源于采矿活动; Hg、Cr 和 Ni 由土壤母质控制; Mn 和 Cd 主要来源于工矿与农业活动. PMF 模型分析结果表明, 表层土壤中金属来源分为 3 种, 工矿活动源、自然源和工矿及农业活动复合源的综合贡献率分别为 58.0%、13.5% 和 28.6%. Ni、Cu、Zn、As、Sb、Hg 和 Pb 以工矿活动源为主, 贡献率分别为 46.9%、89.6%、45.5%、67.8%、99.3%、58.3% 和 96.8%; 母岩矿物风化和降雨冲刷等自然源对 Cr 的相对贡献率达到 44.6%, 对 Ni 和 Hg 也分别有 23.2% 和 21.0% 的相对贡献率; 工矿及农业活动的复合源对 Mn 和 Cd 的相对贡献率分别达到 75.4% 和 70.4%.

关键词: 铅锌矿; 土壤重金属; 空间分布; 来源解析; 正定矩阵因子分解法 (PMF)

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4545-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202201127

Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo

CHEN Meng^{1,2}, PAN Yong-xing¹, HUANG Yi-xiang¹, WANG Xiao-tong^{3*}, ZHANG Rui-dong¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Security in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Taking a typical lead-zinc mining area in Yangshuo county, Guangxi as the research object, the contents of 10 metal elements (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Hg, and Pb) in the surface soil of Sidihe River basin in Yangshuo were analyzed and determined. Pearson correlation analysis, principal component analysis (PCA), positive definite matrix factorization (PMF), and other methods were comprehensively used to quantitatively analyze their contributions and identify pollution sources. In total, 168 surface soil samples were collected across the study area. The mean concentrations of Zn, Cd, Hg, and Pb in the soils were higher than the National Environmental Quality Standards for Soils in China. The mean contents of Sb, Cd, Cu, Pb, and Zn were higher than their corresponding local background values by approximately 1.01, 5.50, 3.29, 9.11, and 10.67 times, respectively, indicating that heavy metals have been enriched in topsoil. The I_{geo} showed that the major pollutant element in the soils was Hg, followed by Pb, Zn, and Mn. Correlation analysis and principal component analysis showed that the sources of metal pollution in surface soil in the study area were complex and mainly from human activities. Cu, Zn, Cd, Sb, As, and Pb were mainly derived from mining activities; Hg, Cr, and Ni were controlled by soil parent material sources; and Mn and Cd were mainly derived from mining activities and agricultural activities. PMF model analysis results showed that the metal pollution sources in the surface soil were jointly affected by these three sources. Mining activities, natural sources, and a mixed source of mining activities and agricultural activities were the main sources of heavy metal pollution in the soils, accounting for 58.0%, 13.5%, and 28.6% of the total heavy metal accumulation, respectively. Ni, Cu, Zn, As, Sb, Hg, and Pb were derived mainly from mining activities. Cr, Ni, and Hg were mainly attributed to natural sources, such as soil parent materials and rainfall erosion (44.6%, 23.2%, and 21.0%, respectively), and Mn and Cd were associated with a mixed source of mining activities and agricultural activities (75.4% and 70.4%).

Key words: lead-zinc mine; heavy metal in soil; spatial distribution; source apportionment; positive matrix factorization (PMF)

土壤污染防治是生态文明建设的重要组成部分,“十九大”相关报告中也明确阐述了土壤污染防治的重要性^[1]. 相比于其他污染物,土壤重金属污染物留存时间长,迁移转化慢,更易积累^[2],且会随着径流迁移扩散^[3],将长期影响土壤环境质量,威胁人类健康^[4,5]. 矿山开采和金属冶炼是土壤重金属污染的主要来源^[6~8],不同矿区对周边农田土壤

和农作物的污染特征及生态风险也不同^[9~11]. 因此,明确土壤重金属的污染来源及贡献率,客观准确

收稿日期: 2022-01-14; 修订日期: 2022-02-17

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020JJB150016); 广西科技基地和人才专项项目(桂科 AD19110046); 桂林理工大学科研启动费项目(RD18100525)

作者简介: 陈盟(1986~),男,博士,讲师,主要研究方向为区域环境污染调查与评价, E-mail: cattlepen@163.com

* 通信作者, E-mail: Lorraine0731@glut.edu.cn

地评价污染状况对于土壤重金属污染控制、修复具有十分重要的意义。

阳朔铅锌矿位于阳朔县东北,自 20 世纪 50 年代进行开采,并于 1958 年在采矿坑口附近建立小型浮选厂进行选矿生产,自 2012 年起处于停产阶段。20 世纪 70 年代一次强降雨造成尾矿砂坝坍塌,尾矿砂泻入思的河^[12],并堆积于河流两侧及下游思的村,加之矿山开采遗留的重金属污染问题短时间内难以解决,已成为思的河流域重要的环境污染源。早期已有研究对该矿区及流域内的土壤和蔬菜重金属污染状况等做了调查和分析^[12-17],但缺乏对思的村的土壤重金属污染特征与污染源的系统性研究,尤其是缺乏对造成该区土壤环境质量状况的来源解析。

本研究以阳朔老厂铅锌矿流域思的村为例,选取表层土壤中 10 种金属元素(Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb、Hg 和 Pb)为研究对象,对不同深度土壤进行采样,利用克里金插值法分析土壤重金属的空间分布,并利用 Pearson 相关系数、主成分分析和 PMF 模型等方法定性识别土壤重金属来源,并对其来源贡献率进行定量解析,以期对矿区影响区域的农田土壤的合理利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

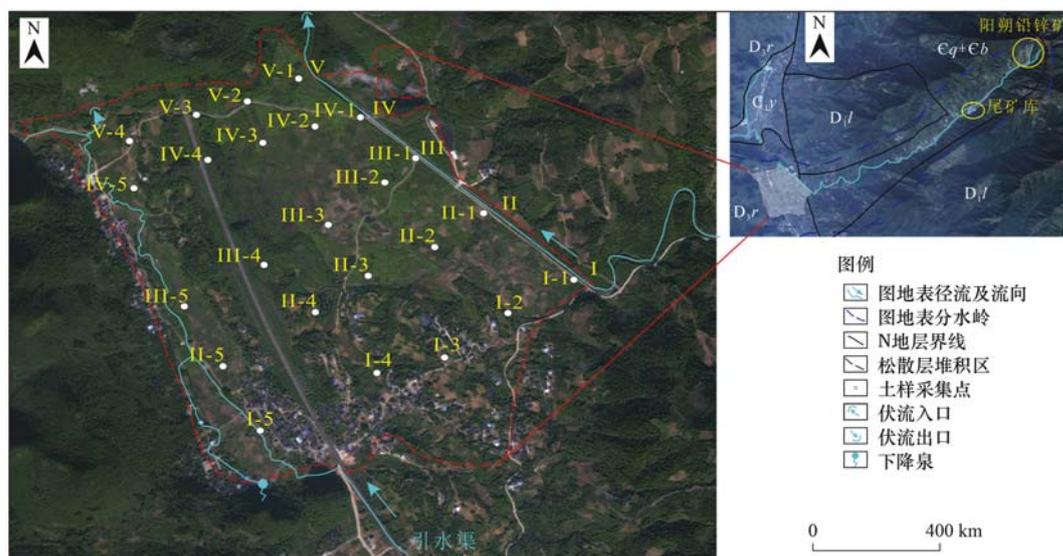
研究区位于桂林市阳朔县东北部思的村,距阳朔火车站约 2.3 km,平均海拔约 150 m,属亚热带季风性气候,年平均气温 19.5℃。年平均降雨量约 1 533.4 mm,约 70% 集中在 4~8 月。发源于上游铅

锌矿区的思的河是区内唯一的地表水流,汇水面积约 14 km²,在矿区内有矿洞排水汇入,矿洞排水丰、平和枯水期测得流量分别为 4.5、2.7 和 1.9 L·s⁻¹。思的河沟口测得丰、平和枯水期流量分别为 79.6、92.4 和 205.4 L·s⁻¹,在思的村北侧转为伏流流入兴坪河,并在兴坪镇汇入漓江。思的河是区内主要的农田灌溉水源。

思的村为冲洪积物堆积地貌,表层堆积物厚约 5~30 m,后经地表流水改造呈中间高、东西两侧低的地貌特征,冲洪积扇物源来源于思的河上游铅锌矿矿区。思的村土壤类型以砂壤土和黄壤土为主,成土母质以砂岩、碳酸盐岩为主,与冲洪积物物源区的地层岩性关系密切。老厂铅锌矿区内地层为寒武系清溪组(C_q)和边溪组(ε_b),岩性主要为砂岩、页岩和薄层灰岩等;另外流域内也分布了大面积的泥盆系下统莲花山组(D₁l),岩性为硅质岩和薄层泥质灰岩。研究区基底和西侧则主要分布了泥盆系上统融县组(D₃r)纯质碳酸盐岩和石炭系下统岩关组(C₁y)灰岩和泥灰岩。

1.2 样品采集与测定

在野外调查与室内分析的基础上,综合考虑研究区内表层堆积物、水文和农业活动特征等实际情况,采用网格布设土壤采样点,使取样点基本分布均匀,并避开明显污染源。按照垂直思的河下游方向布置 I~V 共 5 条剖面线、24 个钻孔,其中 I~IV 剖面线设立 5 个钻孔, V 剖面线设立 4 个钻孔,利用 GPS 记录采样点的地理坐标,每个钻孔分别在 5、10、20、30、40、60 和 80 cm 等 7 个采样深度,土样采集钻孔点位见图 1。系统采集 168 个土壤样品,采



底图来自奥维互动地图

图 1 研究区土样点位布置示意

Fig. 1 Location of soil sampling sites in study area

集后进行现场除杂,放入聚乙烯样品袋中密封带回实验室.采样选择在无雨的条件下进行,土样采集在2021年7月10~11日进行.

土壤样品在室内进行敲碎和分拣,自然风干.将经过风干后的土壤样品去除石块和植物体,使用研钵进行破损研磨,过100目分样筛.采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法进行土壤样品消解,用原子荧光光谱法(AFS-9700)测定土壤As、Hg和Sb含量,石墨炉原子吸收分光光度计(AA-700)测定Mn、Cd和Pb含量,使用ICP-OES测定Cu、Zn、Ni和Cr含量.

1.3 数据分析

1.3.1 数据处理

采用Excel 2016、SPSS 19.0进行土壤重金属含量、相关性和主成分的统计和分析,采用Surfer 15软件对土壤重金属进行空间插值得到含量分布.

1.3.2 地累积指数法

地累积指数法(geo-accumulation index, I_{geo})是由德国学者Müller^[18]提出,综合考虑了自然地质运动过程对背景值的影响和人为活动对重金属污染的影响,可直观反映重金属的污染状况,其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C}{K \times B} \right) \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为重金属的地累积指数, C 为重金属含量实测值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), B 为重金属的评价标准值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), K 为消除各地岩石差异可能引起背景值的变动而采用的系数(一般取1.5).地累积指数污染等级划分为无污染($I_{\text{geo}} \leq 0$)、轻度污染($0 < I_{\text{geo}} \leq 1$)、中度污染($1 < I_{\text{geo}} \leq 2$)、中度-高度污染($2 < I_{\text{geo}} \leq 3$)、高度($3 < I_{\text{geo}} \leq 4$)、高度-极度($4 < I_{\text{geo}} \leq 5$)和极度($I_{\text{geo}} > 5$).

1.3.3 正定矩阵因子分解模型(PMF)

PMF模型是由Paatero等^[19]在1994年首次提出,利用样本组成最优化的分析数据误差,并在求解过程中对因子矩阵的分解做非负约束^[20],进而得到分析结果,用于识别和定量各来源的贡献率^[21].该

模型将原始数据集 X_{ij} 的矩阵分解为两个因子矩阵(源贡献矩阵 g_{ik} 和源成分谱矩阵 f_{kj})和残差矩阵 e_{ij} .

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个采样点处第 j 个重金属的含量, g_{ik} 为第 k 个源对第 i 个样品的贡献, f_{kj} 为第 k 个源中元素 j 的含量, e_{ij} 为残留误差矩阵,可以通过目标函数 Q 的最小值来计算. Q 的值计算如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

式中, u_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种重金属的不确定度,该不确定度是根据特定物种的方法检测限(MDL)、浓度和提供的误差率计算得出的.如果金属浓度大于MDL,不确定度可按以下公式计算:

$$u_{ij} = \sqrt{(\text{相对标准偏差} \times \text{元素含量})^2 + \text{MDL}^2} \quad (4)$$

否则,将通过以下公式估算不确定性:

$$u_{ij} = 0.1X_{ij} + (1/3) \times \text{MDL} \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量分析

研究区土壤样品Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb、Hg和Pb等10种重金属含量的基本参数统计结果如表1所示.结果表明,该区域土壤中Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb、Hg和Pb的变异系数为0.26~2.11,从大到小排列依次为:Pb > Sb > Cd > Zn > Cu > Mn > Ni > As > Cr > Hg.变异系数值越大,表明受人类活动影响导致元素在空间上分布越不均匀^[22].Pb、Sb、Cd、Zn和Cu的变异系数较高(>0.9),Mn和Ni次之(0.5~0.8),As、Cr和Hg最小(0.2~0.5),说明As、Cr和Hg在区内土壤环境中含量相对较为均一.各重金属的偏度均大于0,属于正偏态;峰度值除Cr外均属于高狭峰态,说明各点位中含量偏高的样点多.与广西西江流域的土壤环境背景值^[23]相比,该区域土壤中As、Cr和Ni

表1 研究区土壤重金属含量统计¹⁾

Table 1 Statistics of heavy metal content of the study area

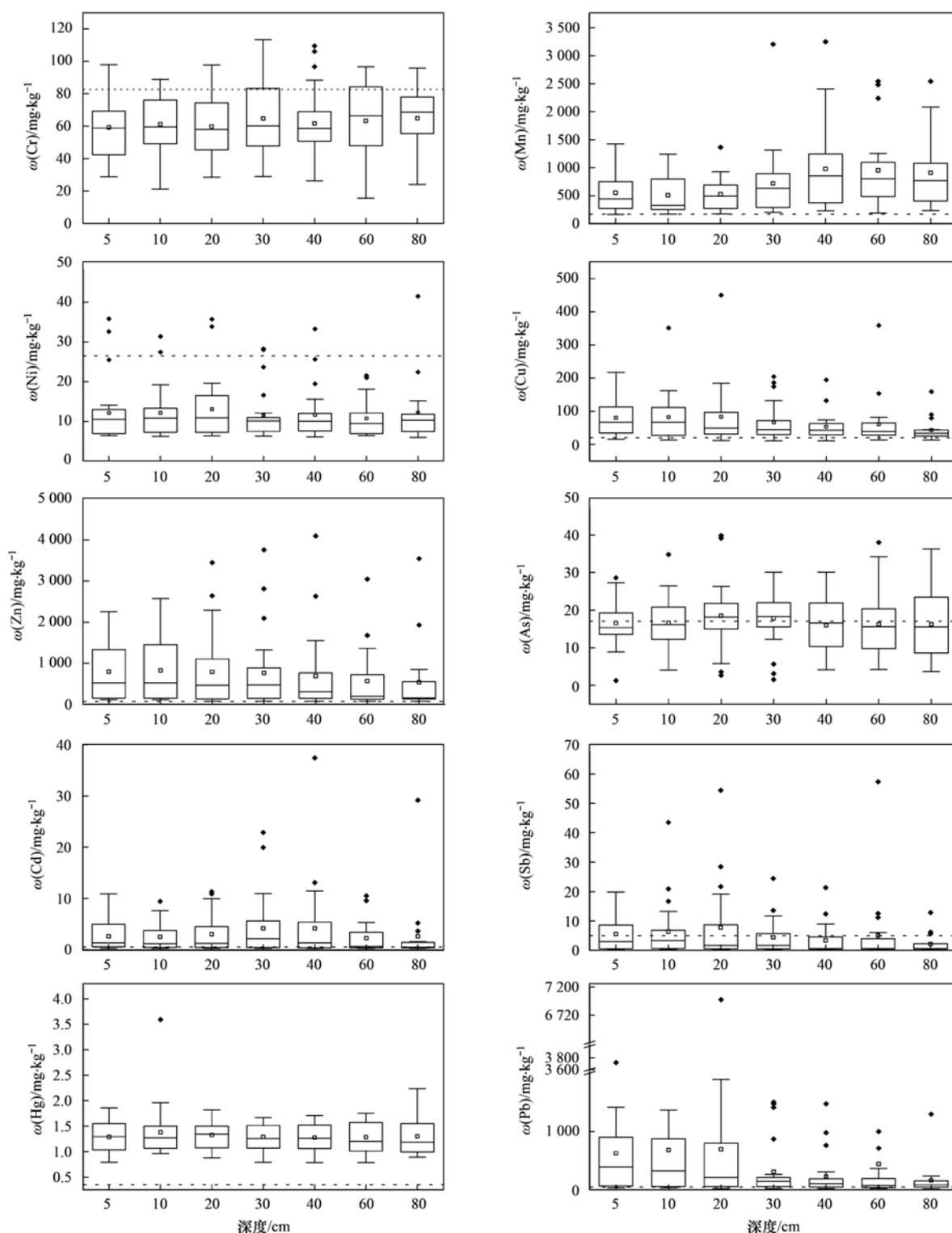
项目	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Hg	Pb
最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	113.40	3 249.37	41.49	450.07	4 097.83	39.85	37.42	57.35	3.59	6 983.00
最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	15.54	168.00	5.89	11.15	72.45	1.24	0.26	0.34	0.79	19.92
平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	61.97	726.62	11.90	68.32	718.54	16.89	3.08	5.11	1.31	462.25
标准差	20.65	575.80	6.85	65.32	835.07	7.55	4.97	8.62	0.34	973.10
变异系数	0.33	0.79	0.58	0.96	1.16	0.45	1.61	1.69	0.26	2.11
风险筛选值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	200	—	100	100	250	25	0.3	—	0.6	120
偏度	0.12	2.04	2.09	2.80	1.90	0.39	3.93	3.48	1.93	4.88
峰度	-0.56	5.14	4.28	10.83	3.51	0.68	20.37	15.34	10.68	27.58

1) 风险筛选值为文献^[24]中农用地土壤污染风险筛选值,区内水旱轮作地,采用其中较严格的风险筛选值;“—”表示无相应风险筛选值

的含量平均值没有超过背景值, Sb、Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量平均值均超过背景值, 分别是背景值的 1.01、5.50、3.29、9.11 和 10.67 倍. Zn、Cd、Hg 和 Pb 含量平均值均超过文献[24]中相应用地类型的风险筛选值, Cr、Ni、Cu 和 As 含量平均值未超过其相应风险筛选值, Sb 和 Mn 无筛选值.

2.2 土壤重金属空间分布特征

土壤中不同深度重金属含量见图 2, 各重金属在含量富集深度上也略有差异, 随着深度增加, 不同重金属含量平均值均呈现一定程度的先增后减的趋势. $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Hg})$ 在不同深度上平均值分布相对比较均匀, 分别为 59.19 ~



图内虚线表示土壤重金属背景值(Hg 和 Mn 来自文献[26]、其余来自文献[23])

图 2 重金属在不同深度中的含量对比

Fig. 2 Heavy metal concentrations in soil by different depths

64.83、10.75 ~ 13.04、16.00 ~ 18.51 和 1.29 ~ 1.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 $\omega(\text{Sb})$ 在 10 ~ 20 cm 深度上平均值为 6.42 ~ 7.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $\omega(\text{Pb})$ 在 5 ~ 20 cm 深度上平均值为 627.57 ~ 697.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $\omega(\text{Cu})$ 在 20 cm 深度上平均值达到 83.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $\omega(\text{Zn})$ 在 5 ~ 30 cm 深度上平均值为 764.10 ~ 827.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $\omega(\text{Mn})$ 在 40 ~ 80 cm 深度上平均值为 911.20 ~ 977.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， $\omega(\text{Cd})$ 在 30 ~ 40 cm 深度上平均值为 4.15 ~ 4.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 对比发现， Pb、 Zn、 Cu 和 Sb 主要是累积在 5 ~ 20 cm 深度上， Cd 则

主要累积在 20 ~ 40 cm， 表明其具有更强的迁移特性， 在云南铅锌矿影响区也有类似的研究结果^[25]。

将研究区内各土壤监测样点的重金属含量采用克里金插值法绘制出各重金属在不同采样深度的含量平面分布图， 对各重金属含量的平面空间分布进行分析， 其结果见图 3。 研究区内 10 种重金属在各深度上主要呈现条带状和岛状分布， 其中 Mn、 Cu、 Zn、 As、 Cd、 Sb、 Hg 和 Pb 等 8 种重金属含量高值主要呈条带状分布于东北部思的河沿岸和东南部的思的河流出山前的区域(图 1 中 I-1 点)， 低值点主

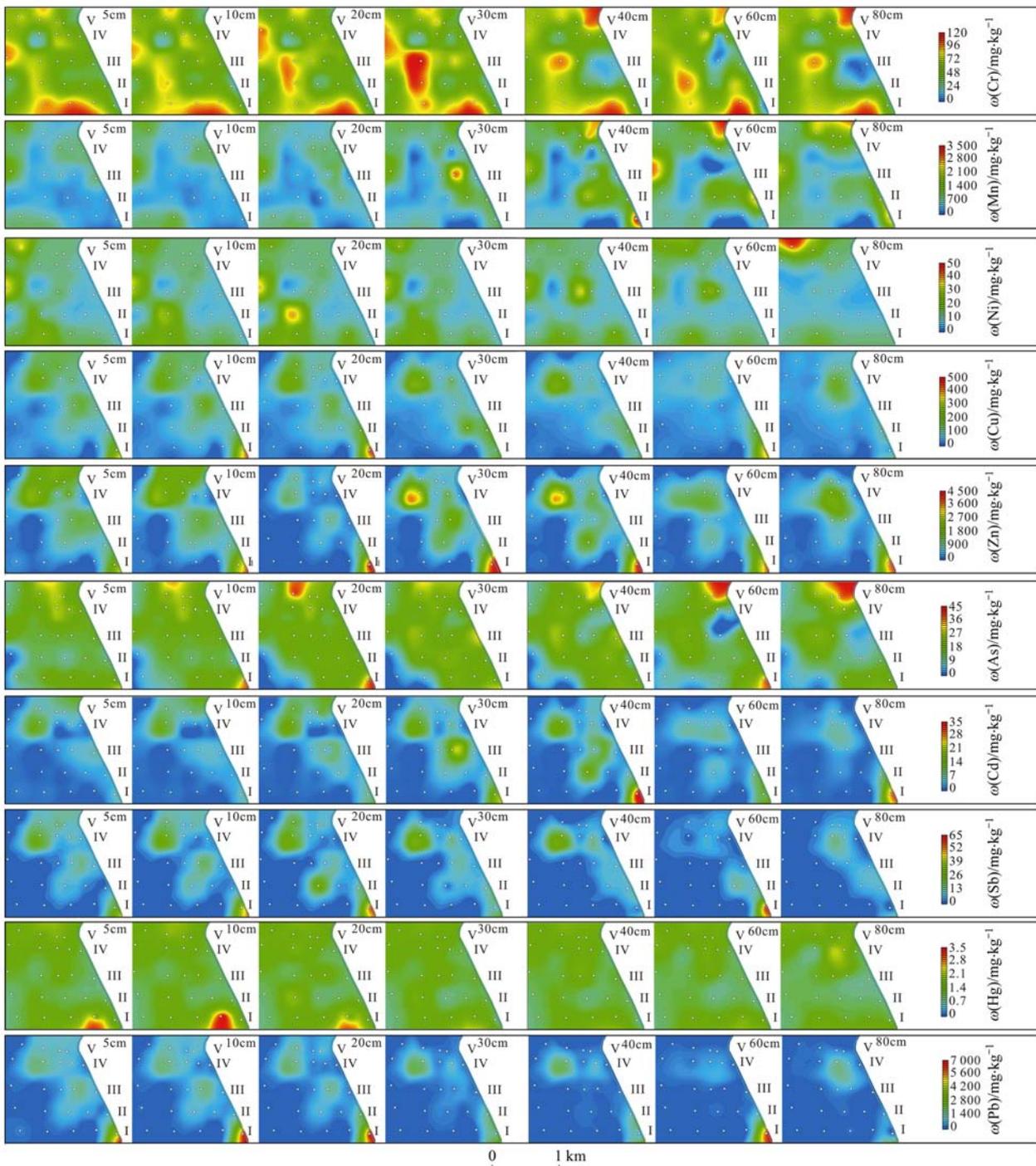


图 3 重金属元素含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metal concentrations in the soils

要分布在中间高冈处和西南部; Cr 和 Ni 则与之相反, 含量高值主要分布于高冈处, 含量低值则主要呈条带状分布于高冈两侧. 结合图 1 分析可以得出, 地表流水和以地表水作为灌溉水源的农业灌溉对该区域表层土壤重金属含量具有一定的影响作用.

2.3 土壤重金属污染评价

Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Sb 的评价标准来自文献[23], Hg、Mn 和 Pb 以广西土壤背景值为评价标准[26], 评价结果见表 2. 地累积指数法(I_{geo})发现 Cr 均处于无污染状态($I_{geo} \leq 0$), Ni 除了在 V-4 (图 1) 点出现累积($I_{geo} = 0.06$) 呈现轻度污染以外, 其他点均处于无污染状态; As 处于轻度污染状态样品占比 11.25%, 其他均处于无污染状态; Sb 处于无污染状态样品占比 81.25%; Cu 处于无污染状态样品占比为 29.38%, 轻度污染状态样品占比为 32.50%, 处于中度污染状态样品占比为 21.88%; Cd 处于无污染、轻度污染和中度污染状态样品占比分别为 46.88%、11.88% 和 11.88%, 并且中度-高度污染状态占比为 19.38%; Mn 处于无污染、轻

度污染和中度污染状态样品占比分别为 16.25%、29.38% 和 32.50%, 中度-高度污染状态占比为 16.88%; Zn 处于轻度污染占比为 31.88%, 中度污染和中度-高度污染占比分别为 12.50% 和 18.13%, 高度污染和高度-极度污染状态占比分别为 16.25% 和 11.25%, 极度污染状态占比为 2.5%; Pb 的污染评价结果较为分散, 处于无污染状态占比为 6.88%, 轻度污染状态占比为 30.00%, 中度污染状态占比为 15.00%, 中度-高度污染状态占比为 18.75%, 高度污染状态占比为 6.25%, 高度-极度污染状态占比为 11.88%, 极度污染状态占比为 11.25%. 而 Hg 在各点均出现严重累积, 处于中度-高度污染状态占比为 90.63%, 高度污染状态占比为 2.50%. 整体上, 研究区土壤 Cr、Ni、As 和 Sb 处于清洁状态($I_{geo} \leq 0$), Cu 和 Cd 处于轻度污染状态($0 < I_{geo} \leq 1$), Mn 和 Zn 处于中度污染状态($1 < I_{geo} \leq 2$), Hg 和 Pb 基本处于中度-高度污染状态($2 < I_{geo} \leq 3$). 本次评价结果与前人在广西和中国西南地区铅锌矿影响区的土壤重金属污染物类型基本一致[25,27,28].

表 2 研究区土壤各重金属地累积指数(I_{geo})评价结果

Table 2 Evaluation results of the geo-accumulation index of heavy metals in soil of the study area

深度/cm	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Hg	Pb
5	-2.11 ~ -0.34	-0.62 ~ 2.46	-2.64 ~ -0.15	-0.94 ~ 2.80	0.19 ~ 4.48	-4.37 ~ 0.16	-1.55 ~ 3.70	-4.43 ~ 1.38	1.80 ~ 3.03	0.07 ~ 6.69
10	-2.55 ~ -0.48	-0.61 ~ 2.26	-2.69 ~ -0.34	-1.18 ~ 3.49	0.15 ~ 4.67	-2.66 ~ 0.45	-1.53 ~ 3.49	-4.44 ~ 2.51	2.08 ~ 3.98	0.12 ~ 7.43
20	-2.12 ~ -0.34	-0.58 ~ 2.40	-2.65 ~ -0.15	-1.36 ~ 3.85	-0.41 ~ 5.09	-3.27 ~ 0.64	-1.66 ~ 3.75	-4.44 ~ 2.84	1.95 ~ 3.00	-0.64 ~ 7.60
30	-2.10 ~ -0.13	-0.35 ~ 3.63	-2.67 ~ -0.49	-1.47 ~ 2.71	-0.42 ~ 5.22	-4.09 ~ 0.24	-1.67 ~ 4.77	-4.50 ~ 1.68	1.80 ~ 2.87	-0.75 ~ 5.38
40	-2.23 ~ -0.18	-0.16 ~ 3.65	-2.70 ~ -0.26	-1.48 ~ 2.64	-0.48 ~ 5.34	-2.62 ~ 0.24	-1.66 ~ 5.48	-4.46 ~ 1.49	1.79 ~ 2.90	-0.67 ~ 5.35
60	-3.00 ~ -0.36	-0.46 ~ 3.30	-2.64 ~ -0.88	-1.17 ~ 3.52	-0.38 ~ 4.92	-2.61 ~ 0.57	-1.62 ~ 3.64	-4.43 ~ 2.91	1.79 ~ 2.94	-0.48 ~ 7.42
80	-2.37 ~ -0.37	-0.14 ~ 3.29	-2.75 ~ 0.06	-1.24 ~ 2.35	-0.44 ~ 5.13	-2.83 ~ 0.51	-1.60 ~ 5.12	-4.46 ~ 0.76	1.96 ~ 2.94	-0.85 ~ 5.17
平均值	-1.09	1.13	-1.91	0.67	1.95	-0.79	0.66	-2.05	2.48	2.18

2.4 土壤重金属来源解析

2.4.1 土壤重金属数理统计分析

土壤重金属相关性分析可以对土壤重金属的来源进行解析, 有研究表明来自同一污染源的重金属之间的相关性较大[29]. 本次研究采用多元统计软件 SPSS 19 对区内土壤重金属 168 个采样点的实测数据进行相关性分析, 分析结果见表 3.

从表 3 中可以看出, Cu、Zn、Pb 和 Sb 之间的相关性系数均大于 0.6, 与 As 和 Cd 之间也有较大的相关性系数, 又多显示 0.01 水平(双侧)的显著相关, 与张云霞等[16] 和刘芳枝等[30] 研究得出的铅锌矿影响区土壤的分析结果一致, 表明这些重金属离子具有相似的来源或地球化学行为(富集和迁移等), 说明这几种重金属之间存在相同来源. Cr 与上述几种元素呈负相关性, 且与 Cu、Zn、Sb 和 Pb 之间相关性系数分别达到 -0.414、-0.464、-0.423

和 -0.384, 表明他们存在相同来源的可能性极小, 或存在着一定的拮抗作用[31]; Cr 与 Hg、Ni 与 Hg 和 Cr 与 Ni 之间的相关性系数分别为 0.383、0.396 和 0.411, 且又显示 0.01 水平(双侧)的显著相关, 表明他们之间存在较大的同源可能性, 且有复合来源的可能性; Mn 与 Cd 之间的相关系数为 0.423, 表明其两者之间存在较大的同源可能性.

通过主成分分析对土壤中重金属来源进行进一步地解析. 主成分分析由多元统计软件 SPSS 19 分析完成. 主成分分析前, 先进行 KMO 和 Bartlett 球体检验, 得到 KMO 检验系数 0.720 > 0.7, 且 Bartlett 球体检验的 $P = 0 < 0.05$, 表明数据适合主成分分析. 提取到 3 个主成分, 前 3 个主成分的总方差贡献率为 77.296%, 且 3 个主成分的特征值(4.409、1.818 和 1.502)均大于 1, 可以代表原始数据的绝大多数信息. 主成分分析结果见表 4.

表 3 土壤重金属 Pearson 相关性系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficient of soil heavy metals

	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Hg	Pb
Cr	1									
Mn	0.031	1								
Ni	0.411**	0.137	1							
Cu	-0.414**	-0.073	-0.231	1						
Zn	-0.464**	0.147	-0.260**	0.765**	1					
As	0.111	0.107	-0.083	0.554**	0.459**	1				
Cd	-0.356**	0.423**	-0.200*	0.411**	0.848**	0.258**	1			
Sb	-0.423**	-0.122	-0.238**	0.911**	0.689**	0.510**	0.355**	1		
Hg	0.383**	-0.069	0.396**	0.070	-0.011	0.313**	-0.084	0.034	1	
Pb	-0.384**	-0.147	-0.198*	0.917**	0.662**	0.442**	0.308**	0.903**	0.035	1

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

第一主成分(PC1)贡献率(44.093%)远高于其他主成分. 其中 Cu、Zn、Cd、Sb 和 Pb 在因子 1 上具有较高的正载荷, 以上元素两两之间呈 0.01 水平(双侧)显著性正相关, 分别为 0.935、0.898、0.634、0.904 和 0.876. Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量平均值远超过广西土壤背景值, 变异系数在 0.96 ~ 2.11, 表明这些元素可能受到了人类活动的影响. 文献[25, 28, 32, 33]就铅锌采矿与冶炼活动对土壤重金属污染进行研究, 表明影响区内主要的重金属污染物是 Pb、Zn、Cu、Cd 和 As, 主要来源为原料准备和冶炼过程中产生的烟气、废水和废渣. 鉴于区域上游为阳朔铅锌矿区和尾矿区, 伴生 As、Cd、Cu 和 Mn 含量高, 且该区域为思的河冲洪积物堆积而成, 松散堆积物物源主要来自于上游矿区. 因此, 第一主成分代表原生地层和工矿活动.

第二主成分(PC2)上 Hg 和 Cr 具有较高的正载荷, 分别为 0.830 和 0.622, Ni 的载荷为 0.582, 且变异系数分别为 0.26、0.33 和 0.58. As 的载荷也达到了 0.546, 且在 PC1 中也有 0.559 的载荷(PC1 > PC2), PC1 对 As 的贡献要略大于 PC2, As 与 Sb 在热液矿床中有较强的伴生关系^[34], 具有较为相似的地球化学行为^[35], 表明受原生地层与工矿等地质背景影响较大. Cr、As 和 Ni 含量平均值未超过区域土壤背景值, 表明受自然因素影响较大. 有研究表明 Ni 和 Cr 与成土母质有密切联系^[36, 37], 土壤中的 Cr 受人类活动影响较小^[38, 39], 土壤母质和矿产资源也是 Hg 的基本来源^[40, 41]. 本研究与周艳等^[2]和冯乾伟等^[42]指出铅锌矿区土壤中 Ni 和 Cr 来自于土壤母质的研究成果一致. 因此将第二主成分归为土壤母质为代表的地质因子.

第三主成分(PC3)中 Mn 和 Cd 在第三主成分(PC3)上具有较高的正载荷(0.878 和 0.645). Mn 多为铅锌矿伴生矿物组分, 且在各取样深度上均有

较高的含量, 表明 Mn 主要来自于上游铅锌矿矿业活动. Cd 也常为铅锌矿伴生矿物组分, 在 PC1 上同样具有较高的正载荷(0.634), PC3 对 Cd 的贡献略大于 PC1, 研究表明 Cd 普遍存在于化肥和农药中, 一般可以作为农业活动的标志元素^[43]. 因此, PC3 可代表工矿及农业活动复合源.

表 4 土壤重金属主成分分析矩阵

Table 4 Matrix analysis of heavy metals in soils

元素	主成分		
	PC1	PC2	PC3
Cr	-0.542	0.622	0.101
Mn	0.026	-0.040	0.878
Ni	-0.365	0.582	0.216
Cu	0.935	0.170	-0.166
Zn	0.898	-0.035	0.289
As	0.559	0.546	0.109
Cd	0.634	-0.180	0.645
Sb	0.904	0.140	-0.240
Hg	-0.034	0.830	0.022
Pb	0.876	0.153	-0.280
初始特征值	4.409	1.818	1.502
方差贡献率/%	44.093	18.179	15.024
累计方差贡献率/%	44.093	62.272	77.296

2.4.2 基于 PMF 模型的来源解析

为进一步分析区内流域土壤中重金属的来源, 采用正定矩阵因子分解模型(PMF)对 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sb、Hg 和 Pb 等 10 个元素进行源解析. 将实验数据导入 EPA PMF 5.0 软件, 根据主成分分析结果, 选择 3 个因子解释土壤重金属来源的类别解析. 10 种重金属均被归类为“Strong”(S/N > 1), 所有土壤样本的绝大部分残差 -3 ~ 3 之间, 结果见表 5. 从中可以看出, 除 Ni 的拟合曲线 R² 值较低以外, 其余元素拟合曲线 R² 均大于 0.5, Mn、Cu、Sb 和 Pb 更是大于 0.97, 预测值与实测值比值(P/O)区间 0.970 ~ 1.004, 均接近于 1, 说明 PMF 模型的源解析结果整体较好, 3 因子情景下模型较为稳定.

表 5 土壤重金属含量实测值与模拟预测值拟合结果

Table 5 Fitting results of measured value and simulated predicted value of soil heavy metal content

元素	R^2	截距	斜率	P/O
Cr	0.672	10.913	0.639	0.994
Mn	0.991	118.676	0.784	0.979
Ni	0.175	4.996	0.327	1.002
Cu	0.970	-11.028	1.054	1.004
Zn	0.567	765.288	0.731	0.981
As	0.933	4.531	0.755	0.970
Cd	0.949	-1.319	1.066	0.975
Sb	0.997	0.986	0.921	0.996
Hg	0.745	0.114	0.885	0.987
Pb	0.973	-112.369	1.029	0.991

PMF 模型解析出的表层土壤各重金属的源成分谱见图 4. 因子 1 对 Ni、Cu、Zn、As、Sb、Hg 和 Pb 等元素的含量贡献较大,对 Sb、Pb 和 Cu 的贡献率分别达到 99.3%、96.8% 和 89.6%,对 Ni、Zn、

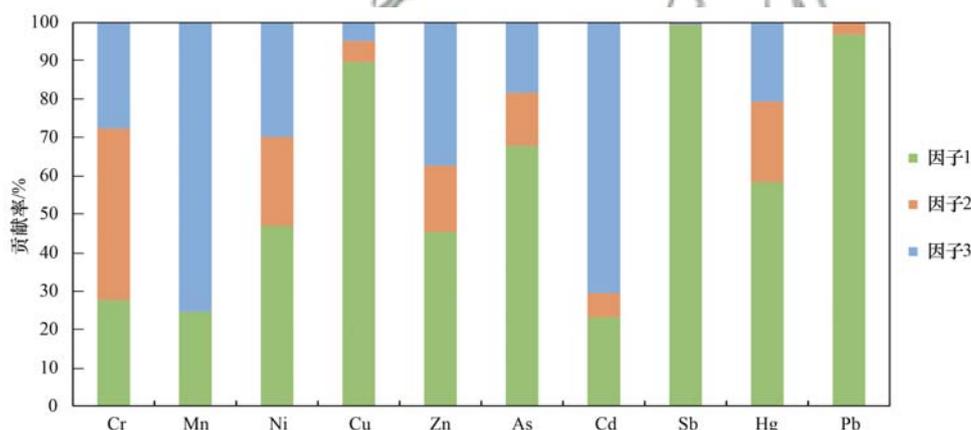


图 4 基于 PMF 的各因子对土壤中重金属含量分布的贡献率

Fig. 4 Contribution rate of each factor based on PMF to the distribution of heavy metals content in soil

因子 3 对 Mn、Cd 的相对贡献率分别达到 75.4% 和 70.4%,这与主成分分析的结果一致. 对 Zn、Ni、Cr 和 Hg 的相对贡献率也分别达到 37.4%、29.9%、27.8% 和 20.7%,对 As 的相对贡献率也达到了 18.4%. Zn 和 Ni 主要来自铅锌矿, Cd 是农业活动的标志元素, Hg 是农药化肥的重要成分^[47],易挥发和迁移. 杀虫剂、除草剂等也多含有 As,且区内农业活动普遍分布于高冈两侧. 因此,因子 3 可以代表工矿及农业活动复合源.

综上所述,研究区土壤重金属的主要来源为工矿活动源、自然源和工矿及农业活动复合源,3 种来源的综合贡献率分别为 58.0%、13.5% 和 28.6%. 从贡献率占比来看,工矿活动是影响该区土壤重金属含量的主要因素. 沿思的河一线土壤重金属含量普遍较高,且高值多位于思的河山前的采样点,地表水流对该区域的土壤重金属的迁移和富集

As 和 Hg 的贡献率也分别达到 46.9%、45.5%、67.8% 和 58.3%. 受流域内阳朔老厂铅锌矿的开采、冶炼和尾矿堆放的影响,且在 20 世纪 70 年代阳朔铅锌矿尾矿砂坝坍塌,尾矿砂在思的河水流裹带下堆积于思的村,后期当地农民将淤塞河道平整为农田^[12],且有研究表明铅锌矿影响区土壤中 Pb、Zn、Mn、Cu 和 Hg 主要来自于矿山开采活动^[44,45]. 因此,推测因子 1 为人类采矿活动源.

因子 2 对 Cr 的相对贡献率达到 44.6%,对 Ni 和 Hg 的相对贡献率也分别达到了 23.2% 和 21.0%,以上 3 种元素在区内含量分布的变异系数较小(0.26~0.58),且在不同深度上平均含量分布相对比较均匀,表明受人为活动影响较小,主要受土壤母质的影响. 对 Zn 的贡献率也达到 17.1%,研究表明河岸带土壤受降雨径流等影响可以导致 Zn 的二次富集^[46]. 因此,因子 2 可以代表母岩矿物风化、降雨冲刷等自然因素.

具有较大的影响;阳朔铅锌矿未封闭的矿洞排水也是思的河的主要水源,表明矿洞排水也在持续影响该区域的土壤质量.

3 结论

(1) 研究区土壤中 Zn、Cd、Hg 和 Pb 含量均值超过国家土壤污染风险筛选值. 土壤中 Sb、Cd、Cu、Pb 和 Zn 的变异系数均大于 0.9,含量平均值分别为 5.11、3.08、68.32、462.25 和 718.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是广西西江流域背景值的 1.01、5.50、3.29、9.11 和 10.67 倍. Mn 和 Ni 为中等变异,含量平均值为 726.62 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 11.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. As、Cr 和 Hg 为弱变异,含量平均值分别为 16.89、61.97 和 1.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. As、Cr 和 Ni 的平均值均未超过背景值. 地累积指数(I_{geo}) 指示研究区土壤污染最严重的是 Hg, 90.63% 的样品处于中度-高度污染水平, Pb

处于轻度污染、中度污染和重度-高度污染状态占比分别为 30.00%、15.00% 和 18.75%, Zn 和 Mn 处于中度污染水平. 研究区属多种重金属复合污染, 生态风险较高.

(2) 研究区土壤重金属具有明显的空间分布特征. 中间高冈区域的 Cr 和 Ni 元素含量要高于其他区域, 不同深度上平均含量分布相对比较均匀, 表明主要受地质背景和原生土壤控制; 其他元素则与之相反, 在高冈两侧条带状分布, 也表现出在不同深度上明显的富集, 表明这些元素主要受地表水和农业灌溉的影响较为显著.

(3) 数据统计分析结果与 PMF 的因子分析结果基本一致. 结果表明工矿活动、母岩矿物风化和农业活动等共同影响区内土壤重金属, 其中工矿活动是影响区内土壤质量的最主要因素. 另外铅锌矿矿洞排水也会持续影响区域土壤重金属的迁移和富集.

参考文献:

- [1] 刘媚媚, 高凤杰, 韩晶, 等. 黑土区小流域土壤重金属生态危害与来源解析[J]. 中国农业大学学报, 2020, **25** (11): 12-21.
- Liu M M, Gao F J, Han J, *et al.* Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in a Mollisol watershed of China[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, **25** (11): 12-21.
- [2] 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.
- [3] Broda J, Franitza P, Herrmann U, *et al.* Reclamation of abandoned open mines with innovative meandricly arranged geotextiles[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, **48** (3): 236-242.
- [4] Gujre N, Mitra S, Soni A, *et al.* Speciation, contamination, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils dumped with municipal solid wastes [J]. Chemosphere, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128013.
- [5] Adimalla N, Chen J, Qian H. Spatial characteristics of heavy metal contamination and potential human health risk assessment of urban soils: a case study from an urban region of south India [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **194**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110406.
- [6] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in eastern China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123289.
- [7] 张龙, 张云霞, 宋波, 等. 云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力[J]. 环境科学, 2020, **41** (9): 4210-4217.
- Zhang L, Zhang Y X, Song B, *et al.* Potential of accumulation and application of dominant plants in Lanping lead-zinc mine, Yunnan province [J]. Environmental Science, 2020, **41** (9): 4210-4217.
- [8] 袁鑫奇, 郭兆来, 王越, 等. 滇东北铅锌矿区废弃地的自然演替特征研究[J]. 农业现代化研究, 2021, **42** (4): 764-775.
- Yuan X Q, Guo Z L, Wang Y, *et al.* Study on natural succession characteristics of abandoned land in Pb-Zn mining area in northeast of Yunnan province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, **42** (4): 764-775.
- [9] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, **39** (8): 3845-3853.
- Li J K, Zhang D, Zhou P, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in soil and its bioaccumulation by dominant plants in a lead-zinc mining area, Nanjing [J]. Environmental Science, 2018, **39** (8): 3845-3853.
- [10] 蒋宗宏, 陆凤, 马先杰, 等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, **37** (2): 293-300.
- Jiang Z H, Lu F, Ma X J, *et al.* Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren county, Guizhou province, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, **37** (2): 293-300.
- [11] Kan X Q, Dong Y Q, Feng L, *et al.* Contamination and health risk assessment of heavy metals in China's lead-zinc mine tailings: a meta-analysis [J]. Chemosphere, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128909.
- [12] 李强, 李忠义, 靳振江, 等. 基于典范对应分析的铅锌矿尾砂坝坍塌污染土壤特征研究[J]. 地质论评, 2014, **60** (2): 443-448.
- Li Q, Li Z Y, Jin Z J, *et al.* Relationships between soil and environment in pollution of agricultural soils from a tailing spill at a Pb-Zn mine based on canonical correspondence analysis [J]. Geological Review, 2014, **60** (2): 443-448.
- [13] 李强, 胡清菁, 张超兰, 等. 基于土壤酶总体活性评价铅锌尾矿砂坝塌区土壤重金属污染[J]. 生态环境学报, 2014, **23** (11): 1839-1844.
- Li Q, Hu Q J, Zhang C L, *et al.* Assessment on heavy metals in the Pb-Zn mine tailing dam collapse area based on total enzyme activity index [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23** (11): 1839-1844.
- [14] Jin Z J, Li Z Y, Li Q, *et al.* Canonical correspondence analysis of soil heavy metal pollution, microflora and enzyme activities in the Pb-Zn mine tailing dam collapse area of Sidi village, SW China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73** (1): 267-274.
- [15] 莫福金, 钱建平, 王远炜, 等. 广西阳朔铅锌矿周边土壤和白菜汞含量及污染评价[J]. 生态环境学报, 2016, **25** (1): 156-161.
- Mo F J, Qian J P, Wang Y W, *et al.* Mercury content and pollution assessment of soil and cabbage surrounding Yangshuo Pb-Zn mining district in Guangxi [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25** (1): 156-161.
- [16] 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.
- [17] Kong J, Guo Q J, Wei R F, *et al.* Contamination of heavy metals and isotopic tracing of Pb in surface and profile soils in a polluted

- farmland from a typical karst area in southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **637-638**: 1035-1045.
- [18] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, **2**: 108-118.
- [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] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. PMF 模型解析土壤重金属来源的不确定性[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(2): 716-725.
Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Uncertainty analysis of soil heavy metal source apportionment by PMF model [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(2): 716-725.
- [21] Magesh N S, Tiwari A, Botsa S M, *et al.* Hazardous heavy metals in the pristine lacustrine systems of Antarctica: insights from PMF model and ERA techniques[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **412**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125263.
- [22] 赵靓, 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]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [23] 王佛鹏, 宋波, 周浪, 等. 广西西江流域土壤重金属背景值再研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(9): 3695-3702.
Wang F P, Song B, Zhou L, *et al.* Redistribution of heavy metal background in soil of Xijiang river basin in Guangxi [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(9): 3695-3702.
- [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].
- [25] 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.
- [26] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法 & 广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992.
- [27] Liu K H, Li C M, Tang S Q, *et al.* Heavy metal concentration, potential ecological risk assessment and enzyme activity in soils affected by a lead-zinc tailing spill in Guangxi, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126415.
- [28] Chen J, Zhang J L, Qu M K, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of soil heavy metals in the areas affected by the mining of metal-bearing minerals in southwest China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, **107**(6): 1070-1079.
- [29] 孙慧, 毕如田, 郭颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(2): 704-714.
Sun H, Bi R T, Guo Y, *et al.* Source apportionment analysis of trace metal contamination in soils of Guangdong province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(2): 704-714.
- [30] 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.
- [31] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
Chai L, Wang X, Ma L, *et al.* Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- [32] Cheng X F, Danek T, Drozdova J, *et al.* Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, southwest China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, **190**(4), doi: 10.1007/s10661-018-6574-x.
- [33] 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2094-2103.
Wang X W, Liu H Y, Gu X F, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in soils affected by different land use types in superimposed pollution area with high geological background [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2094-2103.
- [34] Guo W J, Zhang Z Y, Wang H, *et al.* Exposure characteristics of antimony and coexisting arsenic from multi-path exposure in typical antimony mine area [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **289**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112493.
- [35] Zhu Y M, Yang J G, Wang L Z, *et al.* Factors influencing the uptake and speciation transformation of antimony in the soil-plant system, and the redistribution and toxicity of antimony in plants [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140232.
- [36] 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 432-441.
Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al.* Spatial distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of southern Ningxia based on PMF model [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 432-441.
- [37] 尹芳, 封凯, 尹翠景, 等. 青海典型工业区耕地土壤重金属评价及源解析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 5217-5226.
Yin F, Feng K, Yin C J, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal in cultivated soil around typical industrial district of Qinghai province [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5217-5226.
- [38] 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, Lü 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.
- [39] Fan S X, Wang X D, Lei J, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in a typical Pb/Zn smelter in an arid area of northwest China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(7): 1661-1687.
- [40] Li P, Feng X B, Yuan X B, *et al.* Rice consumption contributes to low level methylmercury exposure in southern China [J]. *Environment International*, 2012, **49**: 18-23.
- [41] 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 R G, 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.
- [42] 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.
- [43] Wang Y Z, Duan X J, Wang L. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: case study in Jiangsu province [J]. Science of the Total Environment, 2020, **710**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134953.
- [44] 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.
- [45] 顾会, 赵涛, 高月, 等. 贵州省典型铅锌矿区土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 地球与环境, 2022, **50**(4): 506-515.
- Gu H, Zhao T, Gao Y, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in soils of a typical lead-zinc mining area in Guizhou province[J]. Earth and Environment, 2022, **50**(4): 506-515.
- [46] 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价[J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3144-3153.
- Zhang J, Chen S Y, Deng H G, *et al.* Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, **32**(10): 3144-3153.
- [47] Giersz J, Bartosiak M, Jankowski K. Sensitive determination of Hg together with Mn, Fe, Cu by combined photochemical vapor generation and pneumatic nebulization in the programmable temperature spray chamber and inductively coupled plasma optical emission spectrometry [J]. Talanta, 2017, **167**: 279-285.



CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)