

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

**2018**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 ..... 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM<sub>2.5</sub> 影响霾污染的关键尺度谱特征 ..... 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子特征及来源分析 ..... 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 ..... 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 ..... 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 ..... 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 ..... 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 ..... 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 ..... 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 ..... 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 ..... 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 ..... 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 ..... 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 ..... 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水地球化学时空变化特征及其环境意义 ..... 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 ..... 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 ..... 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 ..... 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 ..... 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 ..... 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 ..... 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 ..... 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 ..... 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 ..... 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 ..... 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 ..... 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 ..... 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 ..... 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 ..... 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 ..... 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 ..... 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 ..... 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 ..... 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 ..... 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 ..... 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 ..... 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 ..... 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

<sup>13</sup>C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 ..... 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 ..... 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 ..... 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及风险评价: 以临安市为例 ..... 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

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 ..... 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及风险评价 ..... 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 ..... 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 ..... 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 ..... 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 ..... 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 ..... 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 ..... 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 ..... 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 ..... 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 ..... 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 ..... 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 ..... 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

# 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

周艳<sup>1,2</sup>, 陈樯<sup>1,2</sup>, 邓绍坡<sup>1,2</sup>, 万金忠<sup>1,2</sup>, 张胜田<sup>1,2</sup>, 龙涛<sup>1,2</sup>, 李群<sup>1,2</sup>, 林玉锁<sup>1,2</sup>, 吴运金<sup>1,2\*</sup>

(1. 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2. 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 南京 210042)

**摘要:** 以西南某铅锌矿区周边农田土壤作为研究对象, 采集土壤表层(0~20 cm)149 个土壤样品, 分析测定了 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 共 8 种重金属含量. 采用多元统计分析, 揭示了研究区农田土壤重金属污染的主要来源及各元素之间的相关性; 并应用 Hakanson 潜在生态风险指数法, 对农田土壤生态风险进行评价. 结果表明, 研究区农田土壤重金属 Cd、Pb、Zn 含量相对处于极高水平, 均值分别为 15.56、419.4、933.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 污染十分严重; Hg 和 As 的均值分别为 0.13 mg·kg<sup>-1</sup> 和 37.3 mg·kg<sup>-1</sup>, 属于中度污染; Cu、Ni、Cr 的均值分别为 26.1、14.3、33.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 未超过云南省土壤环境背景值; 多元统计分析结果显示 Cd、Pb、Zn、Hg、As 这 5 种元素来源相似, 主要来源于矿山开采和工业活动; Cu、Ni、Cr 这 3 种元素来源相似, 主要是自然来源; 研究区综合潜在生态风险指数 RI 的均值为 2294.8, 整体上处于极高生态风险水平. 矿区开采和工业活动对农田土壤造成了严重的重金属污染.

**关键词:** 铅锌矿; 土壤; 重金属; 空间主成分; 潜在风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2884-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201707125

## Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China

ZHOU Yan<sup>1,2</sup>, CHEN Qiang<sup>1,2</sup>, DENG Shao-po<sup>1,2</sup>, WAN Jin-zhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Sheng-tian<sup>1,2</sup>, LONG Tao<sup>1,2</sup>, LI Qun<sup>1,2</sup>, LIN Yu-suo<sup>1,2</sup>, WU Yun-jin<sup>1,2\*</sup>

(1. Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** The farmland soil around a Pb-Zn mine in southwestern China was studied. One hundred forty-nine surface soil samples were taken from 0-20 cm depth, and the contents of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn were tested. The correlations among these heavy metals were studied with multivariate analysis, and the potential sources of the metals were identified. The environmental risk of the metals was evaluated with the Potential Ecological Risk Index method. The results showed that the amounts of Cd, Pb, and Zn were at relatively high level, with average concentrations of 15.56, 419.4, and 933.4 mg·kg<sup>-1</sup> respectively, indicating the soil was heavily polluted. The average concentrations of Hg and As were 0.13 and 37.3 mg·kg<sup>-1</sup>, suggesting moderate soil pollution. The average concentrations of Cu, Ni, and Cr were lower than Yunnan soil background values. The multivariate analysis suggested that the sources of Cd, Pb, Zn, Hg, and As were similar and came mainly from smelting activities in the mining area. The sources of Cu, Ni, and Cr were similar and can be attributed to natural sources. The comprehensive potential ecological risk index was 2294.8, which suggested a high potential ecological risk. In general, the farmland soils in the research area were polluted seriously by the mining and industrial activities.

**Key words:** lead-zinc mine; soil; heavy metals; principal component analysis; ecological risk

土壤重金属污染是一种严重的环境污染类型, 土壤中重金属具有隐蔽性、滞后性、累积性和不可逆转性, 极难被治理<sup>[1]</sup>. 土壤中重金属可通过食物链在生物体内富集, 最终危害人体健康<sup>[2,3]</sup>, 同时可能导致农作物减产或绝收<sup>[4]</sup>.

矿山开采和金属冶炼是土壤重金属污染的一个重要来源, 其生产过程中产生的尾矿、废水、冶炼烟尘及污水灌溉对周围土壤产生严重影响, 有关矿区土壤重金属污染状况、空间分布及生态风险评价一直是研究热点. 胡森等<sup>[5]</sup>对湘南某矿区耕地土壤

重金属污染状况评价结果表明, 耕地土壤综合污染指数变化范围为 1.25 ~ 427.00, 属于重度污染. Wei 等<sup>[6]</sup>对湖南水口山 Pb/Zn 采矿区和冶炼区土壤重金属的空间分布特征和来源的研究表明, 土壤中 As、Cd、Cu、Cr、Pb、Zn 的平均含量分别为 62.52、

收稿日期: 2017-07-16; 修订日期: 2017-12-05

基金项目: 国家环境保护标准项目(2016-48); 江苏省环境保护科研课题项目(2015038)

作者简介: 周艳(1988~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为土壤污染防治, E-mail: zhouyan@nies.org

\* 通信作者, E-mail: wuj@nies.org

10.34、46.61、92.72、629、597  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其主要来源于冶炼厂烟卤气态颗粒物的排放. 陆泗进等<sup>[7]</sup>研究了会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属潜在生态风险, 结果表明, 46.3% 的采样点处于强生态风险程度, 15.6% 的采样点处于极强生态风险程度, 研究区域农田土壤存在很高的生态风险, 可能存在农产品安全隐患. 此外, 国内外学者对矿区和冶炼区土壤重金属的形态、生物可利用性及有效性也进行了相关研究, 结果表明, Pb、Zn 和 Cd 容易迁移, 易被生物体利用, 有较大潜在生态危害<sup>[8-10]</sup>. 所以, 评价矿区周边土壤污染程度, 分析其污染分布和潜在风险对矿区农田土壤污染治理和生态安全都具有重要意义<sup>[11]</sup>.

西南某铅锌矿由于长期大规模地矿山开采与冶炼导致当地农田土壤重金属超标严重, 周边植被均被污染和破坏, 对当地陆生生态环境和人体健康造成了不良影响<sup>[12]</sup>. 目前, 关于该铅锌矿区的污染研究主要集中在矿区土壤污染以及土壤重金属的污染评价, 如周鸿斌等<sup>[13]</sup>运用磁测分级发现矿区农田土壤单项污染指数  $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ , 且 3 种重金属污染与矿产开发有关; 赵筱青等<sup>[14]</sup>发现该矿区农田土壤中 Pb 和 Cd 主要以水溶态为主, 容易通过食物链富集危害人体健康. 但总体而言, 缺少对矿区土壤重金属元素主成分分析研究, 针对矿区农田大面积土壤潜在生态风险研究很少.

本文通过对该铅锌矿周边农田土壤采样, 分析土壤样品中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8 种重金属含量, 进一步评价土壤重金属污染现状, 使用相关性和主成分分析方法解析矿区农田土壤重金属可能的来源, 利用 GIS 技术对土壤中重金属主成分空间分布进行分析, 并分析探讨土壤的潜在生态风险, 以为该区域农田土壤污染治理和生态修复提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区位于西南某铅锌矿区内, 山峦起伏, 山高坡陡, 地理坐标为: 东经  $98^{\circ}58'$  ~  $99^{\circ}38'$ , 北纬  $26^{\circ}06'$  ~  $27^{\circ}04'$ . 年平均降水量 1 007 mm 左右, 冬春干旱, 夏秋易涝, 常年主导风向为西南风. 土壤类型以紫色土为主, 泚江是研究区内较大的河流, 泚江两岸为紫砂泥田水稻土、质地黏重、有机物含量低、土壤板结, 主要种植水稻、小麦和玉米等. 该铅锌矿大规模开采始于 1984 年, 已探明铅储量

$2.53 \times 10^6$  t、锌近  $1.30 \times 10^6$  t, 镉  $1.7 \times 10^5$  t, 且集中在  $6.8 \text{ km}^2$  的矿区范围内, 80% 以上可以露天开采.

该铅锌矿区由于历史原因, 废水、尾矿不经过处理直接外排、废渣随意堆存于河流两岸、矿山植被破坏、水土流失等对矿区流域的水生生态、农业生态和土壤生态造成了严重的破坏. 泚江水体已经丧失其水体使用功能; 水生生物已基本灭绝; 沿江两岸农田已受到污染, 区域内农产品重金属含量超标, 严重威胁农产品安全及居民身体健康<sup>[15-17]</sup>.

### 1.2 样品采集

2015 年 9 月, 从泚江上游大龙村至下游石登村, 在泚江两岸农田分布区域采集土壤表层土 (0 ~ 20 cm) 149 个土壤样品 (图 1), 并用 GPS 确定地理坐标.

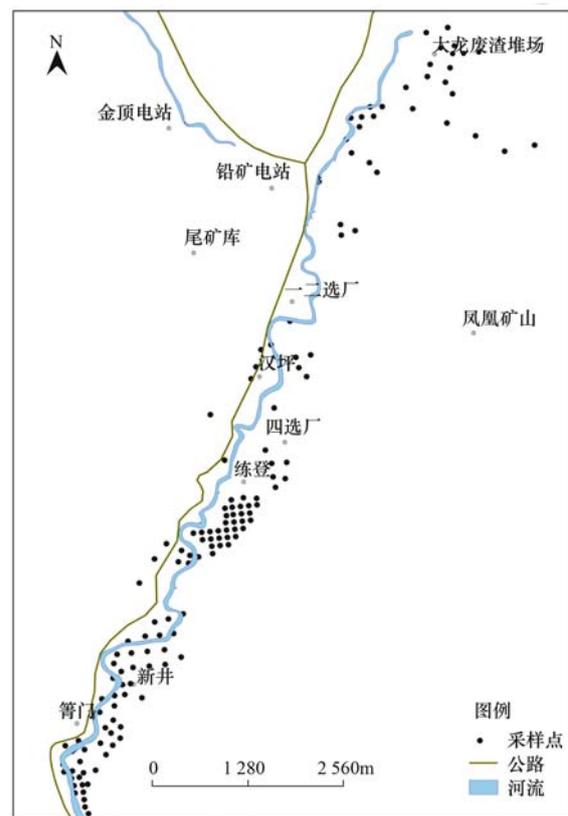


图 1 研究区域采样点示意

Fig. 1 Soil sampling sites in the study area

### 1.3 样品处理与分析

土样剔除根茎, 沙砾等异物, 置于室内通风处自然风干, 经研磨后过 100 目尼龙网筛装入实验袋备用. 为避免人为干扰及与其他金属接触, 样品采集、混合、研磨、粉碎等过程中均采用木铲、木棒、玛瑙研钵等用具.

土壤样品中重金属 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、

Zn 经  $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$  法消解, 采用电感耦合等离子体质谱对其含量进行测定; 重金属 Hg 经 (1+1) 王水消解, 采用原子荧光光度计对其含量进行测定. 实验所用的化学试剂均为优级纯, 所用的玻璃器皿和塑料器皿均用 (1:1) 的稀硝酸浸泡 24 h 后用超纯水洗涤干净. 为保证分析的准确性, 实验全程做空白样和平行样, 并在测试过程中加入国家标准土壤参比物质 (GSS-28) 进行质量控制, 回收率均在  $100\% \pm 10\%$  之间.

## 1.4 数据处理

### 1.4.1 单因子污染指数法

采用单因子污染指数法<sup>[18]</sup>进行污染评价, 评价标准为云南省土壤背景值算术平均值, 污染程度分级为: 单因子指数计算值  $P \leq 1$  为无污染;  $1 < P \leq 2$  为轻度污染;  $2 < P \leq 3$  为中度污染;  $P \geq 3$  为重度污染.

### 1.4.2 多元统计分析和空间插值

利用 SPSS 16.0 进行相关性分析和主成分分析<sup>[19]</sup>, 利用 ArcGIS 10.2 软件进行空间插值制图.

### 1.4.3 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法是 Hakanson 从沉积学角度, 根据重金属性质及环境行为特点, 建立的一套评价重金属潜在生态危害的方法<sup>[20]</sup>. 单个重金属潜在生态风险因子  $E_r^i$  的计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \quad (1)$$

式中,  $C^i$  为重金属含量,  $C_n^i$  为参考值, 本评价采用云南省土壤背景值算术平均值,  $T_r^i$  为某重金属的毒性响应系数, 反映重金属的毒性水平及土壤对重金属污染的敏感性. 参考相关研究, As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的毒性相应系数分别为 10、30、2、5、40、5、5、1.

重金属的综合潜在生态危害指数 RI 可以表示为各个重金属的  $E_r^i$  之和:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属含量

研究区 149 个土壤表层样品重金属含量统计结果见表 1. 结果表明, Cd、Pb、Zn、Hg、As、Cu、Ni、Cr 含量超标率 (超过云南省土壤背景算术平均值样本数占总样本的百分比) 分别为 100%、97.99%、96.64%、91.94%、73.15%、4.02%、0.67%、

0.00%. 其中, 89.26% 的样品 Cd 超标达 10 倍以上, 最高超标 532 倍; 28.86% 的样品 Pb 超标达 10 倍以上, 最高超标 91 倍; 23.49% 的样品 Zn 超标达 10 倍以上, 最高超标 77 倍; 1.34% 的样品 Hg 超标达 10 倍以上, 最高超标 12 倍; 0.67% 的样品 As 超标达 10 倍以上, 最高超标 12 倍. 研究结果与李瑞萍等<sup>[21]</sup>分析出的 Cd 污染比 Zn 污染更严重这一结果一致. 赵筱青等<sup>[14]</sup>的研究结果也表明该矿区农田土壤中 Pb、Zn、Cd、As 含量超标率分别为 66.67%、91.67%、100%、16.67%, 污染程度为  $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{As}$ .

Cu 含量在  $5.2 \sim 960 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 平均含量为  $26.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 只有 4.02% 的样品 (6 个) Cu 含量超过研究区自然背景值; Ni 含量在  $5.3 \sim 73.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 平均含量为  $14.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 只有 0.67% 的样品 (1 个) Ni 超过研究区自然背景值; 土壤样品中 Cr 含量均低于研究区自然背景值. 反映 Cu、Ni、Cr 总体上处于自然背景值范围, 只有个别样点存在 Cu 和 Ni 超标现象, 可能是受人为活动影响.

有研究表明, 各重金属含量变异系数越小, 其差异与离散程度越小, 分布越均匀; 反之, 则其差异与离散程度越大, 分布越不均匀<sup>[14, 22]</sup>. 土壤样品中 Cd、Pb、Zn 的变异系数分别为 1.42、1.30、1.51, 且含量的差异与离散程度很大, 说明土壤中 Cd、Pb、Zn 分布非常不均匀. 已有研究结果表明该矿区农田土壤中 Cd、Pb、Zn 这 3 种元素含量的变异系数普遍较高, 都在 100% 以上<sup>[23]</sup>. 较大的变异系数反映了矿区不同地点的农田土壤重金属污染有较大的差异, 这与铅锌矿开发对矿区土壤化学成分产生影响有关. Cr 和 Ni 的变异系数相对较小, 表明矿区土壤中 Cr 和 Ni 分布较均匀. Cu 的变异系数为 2.97, 标准差也表现出含量的高离散程度, 主要原因是位于泚江下游的 6 个样点的 Cu 含量可能受人为活动干扰超过了研究区自然背景值.

单因子污染指数表明 Cd、Pb、Zn 属于重度污染, Hg 和 As 属于中度污染, Cu、Ni、Cr 没有污染. 以上结果表明研究区土壤 Pb、Zn、Cd 重金属污染非常严重, 并伴有一定程度的 Hg 和 As 污染. 这与李瑞萍等<sup>[21]</sup>和张迪等<sup>[24]</sup>的研究结果一致, 即认为该矿区土壤中 Cd、Zn 总量大范围超标, 土壤中普遍存在 Pb、Zn、Cd 污染, Cu 没有污染.

表 1 研究区域土壤重金属统计分析( $n=149$ )

Table 1 Heavy metal concentrations in the soil of the study area

元素	范围 /mg·kg <sup>-1</sup>	平均值 ± 标准差 /mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数 CV	超标率 /%	背景值 <sup>1)</sup>	单因子污染 指数 $P^{2)}$
Cd	0.49 ~ 116	15.56 ± 22.15	1.42	100	0.218	71.36
Pb	24.4 ~ 3 700	419.4 ± 543.7	1.30	97.99	40.6	10.33
Zn	59.7 ~ 6 910	933.4 ± 1 410.4	1.51	96.64	89.7	10.41
Hg	0.025 ~ 0.7	0.13 ± 0.10	0.79	91.94	0.058	2.21
As	4.1 ~ 230	37.3 ± 29.1	0.78	73.15	18.4	2.03
Cu	5.2 ~ 960	26.1 ± 77.5	2.97	4.02	46.3	0.56
Ni	5.3 ~ 73.4	14.3 ± 6.8	0.47	0.67	42.5	0.34
Cr	11.9 ~ 56.9	33.4 ± 7.3	0.22	0.00	65.2	0.51

1) 云南省土壤背景值算术平均值; 2) 单因子污染指数  $P = \text{平均值}/\text{背景值}$

## 2.2 土壤重金属多元统计分析

### 2.2.1 土壤重金属的相关分析

相关分析是推测重金属来源的重要依据, 若元素间相关性显著或极显著, 则表明元素间一般具有同源关系或复合污染<sup>[25-26]</sup>. 由矿区农田土壤重金属含量之间的 Pearson 相关分析结果可知(表 2), Cd、Pb、Zn 两两之间存在极显著相关( $P < 0.01$ )且相关系数均大于 70%, 说明这 3 种元素具有较大的同源性和复合污染的可能. Hg 和 As 分别与 Cd、Pb、Zn 两两之间存在极显著相关( $P < 0.01$ ), 推断 Hg 和 As 均与 Cd、Pb、Zn 具有相同的来源途径, 但是 Hg

和 As 这 2 种元素之间相关性不显著. Cu、Ni、Cr 两两之间存在极显著相关( $P < 0.01$ ), 但是与 Cd、Pb、Zn、Hg、As 这 5 种元素之间相关性不显著, 从中可知 Cu、Ni、Cr 的来源极为相似, 与 Cd、Pb、Zn、As 和 Hg 来源途径不同. 结合研究区土壤重金属统计分析结果(表 1)可知, Cd、Pb、Zn、As、Hg 可能受矿区人为活动影响较大, Cu、Ni、Cr 总体上处于自然背景值范围, 受人为活动影响相对较小. 本研究结果与赵筱青等<sup>[23]</sup>提出的该矿区农田土壤存在 As、Cd、Pb 和 Zn 之间的相关性显著, 同源的概率大, 存在 4 种重金属复合污染这一研究结果一致.

表 2 研究区域土壤重金属含量的相关系数<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficients of soil heavy metal contents in the study area

	Cd	Pb	Zn	Hg	As	Cu	Ni	Cr
Cd	1	0.712 **	0.992 **	0.39 **	0.404 **	-0.028	-0.016	-0.058
Pb		1	0.719 **	0.253 **	0.421 **	-0.021	-0.039	-0.1
Zn			1	0.4 **	0.402 **	-0.02	-0.015	-0.076
Hg				1	0.151	-0.012	0.08	0.105
As					1	0.017	0.004	0.028
Cu						1	0.791 **	0.321 **
Ni							1	0.739 **
Cr								1

1) \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关

### 2.2.2 土壤重金属元素的主成分分析

土壤重金属主要来源于成土母质与人类活动, 通过主成分分析可以有效判别重金属元素的污染来源<sup>[27,28]</sup>. 通过前述相关性分析, 发现大部分重金属元素之间具有显著的相关性, 且 Bartlett 球形度检验相伴概率为 0.00, 小于显著性水平 0.05, KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验统计值为 0.579, 表明本研究中的数据适合于作主成分分析. 矿区农田土壤主成分分析结果见表 3, 根据特征值大于 1 的原则, 筛选出两个成分共解释了 66.79% 的原有信息, 这说明对前 2 个主成分进行分析即可得到 Cd、Pb、

Zn、Hg、As、Cu、Ni、Cr 这 8 种重金属含量数据的大部分信息. 在进行污染来源分析时, 来自同一污染源的污染物之间一般存在一定的相关性, 反映的信息具有一定的重叠<sup>[29]</sup>.

由表 4 可知, 第一主成分(F1)贡献率为 38.40%, 在 Cd、Pb、Zn、Hg、As 的含量上载荷较高, 主要反映了 Cd、Pb、Zn、Hg、As 的富集信息. 这 5 种元素的平均值均明显超过了云南省土壤背景值(表 1), Cd、Pb、Zn 的平均值更是分别达到了背景值的 71.36、10.33、10.41 倍, Hg 和 As 的平均值也分别超过了背景值的 2.21 和 2.03 倍, 有研究

表明铅锌矿物中常常伴生有 Hg 和 As 等重金属元素<sup>[30]</sup>. 且 Cd、Pb、Zn 两两之间存在极显著相关, 与 Hg 和 As 两种重金属的相关性也很高, 分析判断出第一主成分中这 5 种重金属可能受到相同的污染源影响. 研究区的铅锌矿开采、选矿及冶炼等生产活动中产生的废水、尾矿、废渣等都是这 5 种重金属的主要来源, 因此第一主成分代表了矿山开采和工业活动等人为来源.

第二主成分(F2)贡献率为 28.39%, 其中 Cu、Ni、Cr 有较高的载荷, 主要反映了 Cu、Ni、Cr 的富集信息. Cu、Ni、Cr 这 3 种元素的平均值均未超过云南省土壤背景值, Ni 和 Cr 的变异系数相对较低, 但是 Cu 有 6 个样点的含量超过了云南省土壤背景值, 变异系数较高, 可认为这 6 个样点的 Cu 受到外源污染, 总体上 Cu、Ni、Cr 还是受人为活动相对较小. 张迪等<sup>[24]</sup>对该矿区土壤中重金属

污染状况调查表明, 矿区土壤中 Cu 超标率为 0%. 黄维恒等<sup>[31]</sup>的研究结果表明该矿区的矿产开采对耕地土壤重金属 Cu 的积累贡献并不明显. 张超兰等<sup>[32]</sup>对广西某铅锌矿区的研究也发现 Cu、Ni、Cr 这 3 种元素被分在一个主成分, 并且主要来源于成土母质. 早期研究认为土壤中 Cr 和 Ni 受人为影响较小, 其主要来源于土壤母质及风化产物累积的重金属<sup>[27,28]</sup>. 因此, 第二主成分代表了自然来源.

图 2 中重金属间的距离反映了元素含量间的相关性<sup>[33]</sup>, Cd、Pb、Zn、Hg 和 As, Cu、Ni、Cr 之间距离较近, 显示出较强的相关性; 相对而言, Hg 和 As 与 Cd、Pb、Zn 也具有一定的相关性. 再次表明 Cd、Pb、Zn、Hg、As 这 5 种元素之间具有一定的同源性, Cu、Ni、Cr 之间具有一定的同源性, 而与 Cd、Pb、Zn、Hg、As 显示出较强的异源性.

表 3 研究区域土壤重金属含量的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of heavy metal concentration in soil of the study area

主成分	初始特征值			提取后特征值			交换后特征值		
	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%	特征值	解释方差/%	累积方差/%
1	3.081	38.509	38.509	3.081	38.509	38.509	3.072	38.399	38.399
2	2.263	28.281	66.79	2.263	28.281	66.79	2.271	28.391	66.79
3	0.894	11.179	77.969						
4	0.747	9.333	87.303						
5	0.595	7.433	94.736						
6	0.349	4.365	99.10						
7	0.064	0.801	99.901						
8	0.008	0.099	100.0						

表 4 研究区域土壤重金属含量主成分分析成分矩阵

Table 4 Component matrix of principal component analysis of heavy metal concentrations in soil of the study area

重金属	初始因子载荷		旋转后因子载荷	
	F1	F2	F1	F2
Cd	0.945	0.047	0.945	-0.051
Pb	0.834	0.005	0.830	-0.081
Zn	0.949	0.045	0.949	-0.054
Hg	0.494	0.159	0.508	0.107
As	0.569	0.082	0.575	0.022
Cu	-0.073	0.809	0.011	0.812
Ni	-0.075	0.976	0.026	0.979
Cr	-0.107	0.787	-0.025	0.793
方差贡献率/%	38.51	28.28	38.40	28.39
累积方差贡献率/%	38.51	66.79	38.40	66.79

### 2.3 土壤重金属主成分空间分布

该研究区域农田土壤被金顶镇城区分为两个片区, 以北主要分布在泚江上游东岸, 以南沿泚江两岸向下游呈带型分布. 如图 3 所示, 第一主成分 Cd、Pb、Zn、Hg、As 在空间上差异较显著, 高值区

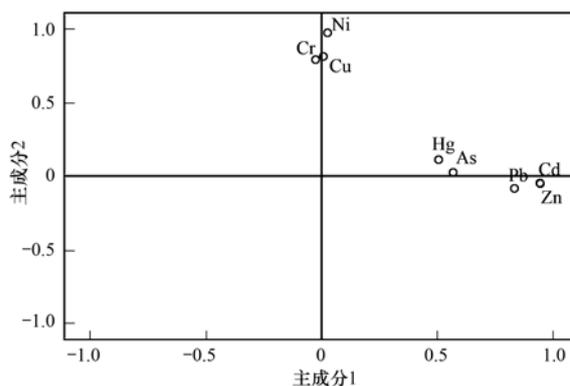


图 2 土壤重金属元素主成分载荷

Fig. 2 Heavy metal loading of the principal components

主要分布在金顶镇东北地区、四选厂西北地区以及泚江下游两岸区域. 低值区则位于凤凰矿山正北地区及新井村上游等区域. 这可能是由于泚江中游分布有一、二选厂及四选厂等冶炼厂, 冶炼厂在生产过程中产生的废气和废渣, 受大气沉降等作用直接或间接地污染沿岸农田; 此外, 凤凰铅锌矿位于金

顶镇东南部 4 km, 矿物开采和运输产生的粉尘和废气, 受大气沉降等作用, 沉降到周围土壤中, 对周边特别是东北下风向区土壤重金属含量可能造成一定影响. 这与文献[34~36]的研究结果一致, 可以认为矿产开采和冶炼废弃物排放对周边土壤重金属的含量和分布存在一定影响. 由于该地区常年主导风向为西南风, 金顶镇东北地区位于冶炼厂东北方向, 因此该地区可能受区域主导风向的影响, 导致土壤中重金属含量较高. 此外, 沱江下游箐门村河段历史上经常洪水泛滥, 导致河道沉积物带入下游两岸农田, 淤泥中富含铅、锌、镉、砷等重金属, 使得下游两岸土壤重金属污染较重. 凤凰矿山正北地区及新井村上游等区域土壤中重金属含量呈降低的趋势, 可能是由于距离矿区和冶炼厂较远, 以及河水的冲刷稀释作用导致农田土壤重金属含量较低.

分高值区. 已有研究表明, 该矿区土壤重金属 Cu 的积累主要发生在人口密集区域, 人类活动频繁地区积累量较大, 含量较高<sup>[32]</sup>.

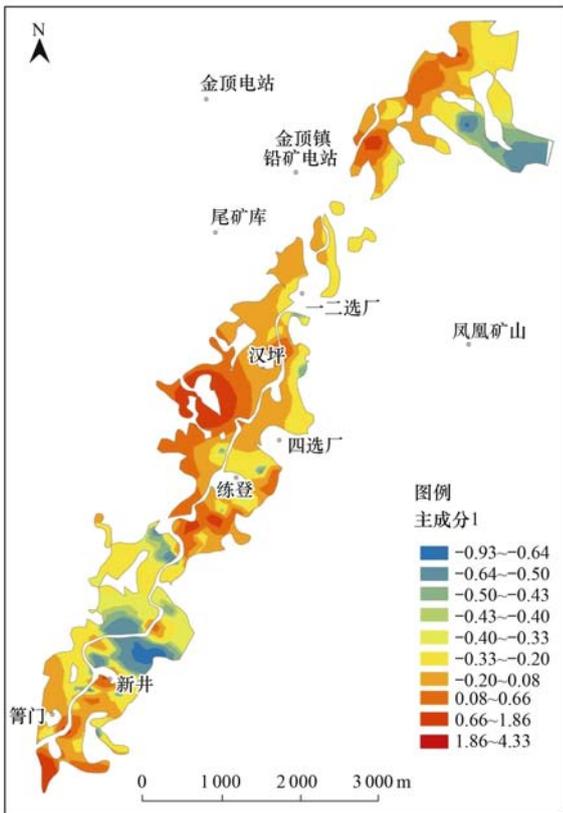


图3 土壤重金属元素的第一主成分得分的空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of the first principal component of heavy metals in the study area

如图 4 所示, 第二主成分的高值区域主要位于沱江下游箐门村以下区域. 调查采样时发现箐门村是人类活动频繁的地区, 调查结果显示此地区有采样点铜超标异常, 可能是因为这几个采样点位于道路旁, 堆有生活垃圾, 受生活污染干扰导致土壤中 Cu 超标. Cu 含量的超标导致该区域出现第二主成

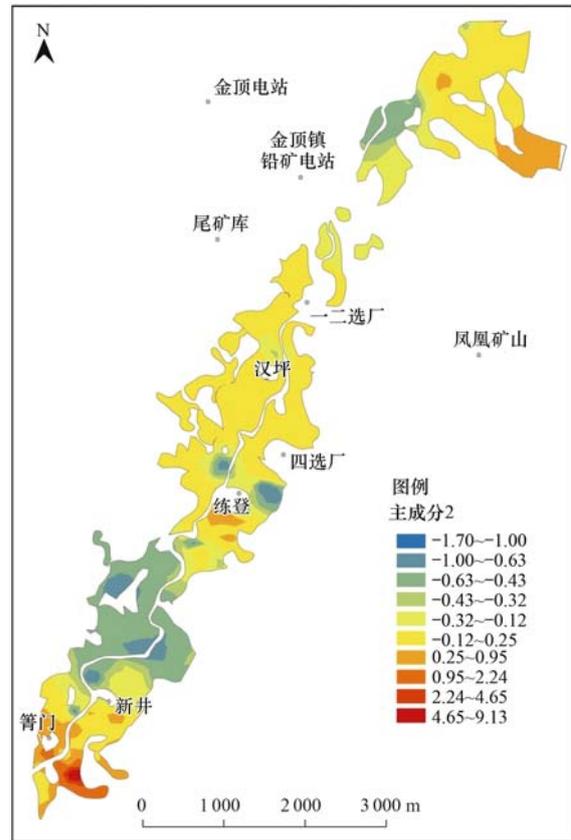


图4 土壤重金属元素的第二主成分得分的空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of the second principal component of heavy metals in the study area

### 2.4 重金属潜在生态风险评价

Hakanson 潜在生态风险指数法主要用于衡量土壤中重金属对环境存在的生态风险. 该方法不但考虑了土壤重金属含量, 而且将重金属的生态效应、环境效应和毒理学联系起来, 综合反映了重金属对生态环境的胁迫程度.

研究区农田表层土壤单个重金属的潜在生态风险因子 ( $E_r^i$ ) 和多种重金属的综合潜在生态危害指数 RI 如表 5 所示. 根据 Hakanson 潜在生态风险分级标准(表 6), Cd 的潜在生态风险因子大于 320, 属于极高生态风险; Hg 和 Pb 潜在生态风险因子处于 40~80 之间, 属于中等生态风险; As、Zn、Cu、Ni 和 Cr 的潜在生态风险因子均小于 40, 属于低生态风险. 研究区综合潜在生态风险指数 RI 的平均值为 2 294.8, 介于 181.1~16 522.7 之间, 说明研究区整体上处于极高生态风险水平, 其中 74.5% 的采样点为极高生态风险, 20.1% 的采样点为高生态

风险, 5.4%的采样点为中等生态风险. 从图5可以看出, 研究区重金属综合生态风险指数的高值区域集中在金顶镇东北地区、四选厂西北地区以及泚江

下游两岸区域, 与土壤重金属的第一主成分空间分布特征相同. 再一次说明了矿区开采和工业活动对农田土壤造成了严重的重金属污染.

表5 研究区域农田土壤重金属潜在生态风险评价

Table 5 Assessment of potential ecological risks of soil heavy metals in the study area

项目	潜在生态风险因子 $E_i^p$								RI
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
最小值	2.2	67.4	0.4	0.6	17.2	0.6	3.0	0.7	181.1
最大值	125.0	15 963.3	1.7	103.7	482.8	8.6	455.7	77.0	16 522.7
平均值	19.7	2 117.8	1.0	2.8	90.5	1.7	50.9	10.3	2 294.8
标准差	14.8	3 039.3	0.2	8.4	70.9	0.8	66.5	15.7	3 136.6

表6 Hakanson 潜在生态风险分级标准

Table 6 Grading standards of Hakanson potential ecological risk

单项生态风险因子 ( $E_i^p$ )		综合生态风险指数 (RI)	
等级	得分	等级	得分
低生态风险	<40	低生态风险	<150
中等生态风险	40~80	中等生态风险	150~300
较高生态风险	80~160	高生态风险	300~600
高生态风险	160~320	极高生态风险	>600
极高生态风险	>320		

Ni、Cr 含量超标率(超过云南省土壤背景算术平均值样本数占总样本的百分比)分别为 100%、97.99%、96.64%、91.94%、73.15%、4.02%、0.67%、0.00%。单因子污染指数评价结果表明 Cd、Pb、Zn 属于重度污染, Hg、As 属于中度污染, Cu、Ni、Cr 没有污染.

(2)通过相关性分析推断 Cd、Pb、Zn、Hg、As 这5种元素来源相似, Cu、Ni、Cr 这3种元素来源相似. 主成分分析结果显示第一主成分反映了 Cd、Pb、Zn、Hg、As 的富集信息, 代表了矿山开采和工业活动等人为来源; 第二主成分反映了 Cr、Cu、Ni 的富集信息, 代表了自然来源. 第一主成分高值区主要在金顶镇东北地区、四选厂西北地区以及泚江下游两岸区域. 第二主成分的高值区域主要位于泚江下游箐门村以下区域.

(3)潜在生态风险评价结果显示研究区土壤中 Cd 属于极高生态风险, Hg 和 Pb 属于中等生态风险, As、Zn、Cu、Ni 和 Cr 属于低生态风险. 综合潜在生态风险指数 RI 的平均值为 2294.8, 整体上处于极高生态风险水平. 研究区重金属综合生态风险指数的高值区域与土壤重金属的第一主成分空间分布特征相同. 再一次说明了矿区开采和工业活动对农田土壤造成了严重的重金属污染.

#### 参考文献:

- [1] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 2964-2971.  
Wu Y, Yang J, Zhou X Y, et al. Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(8): 2964-2971.
- [2] 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, Lü 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.

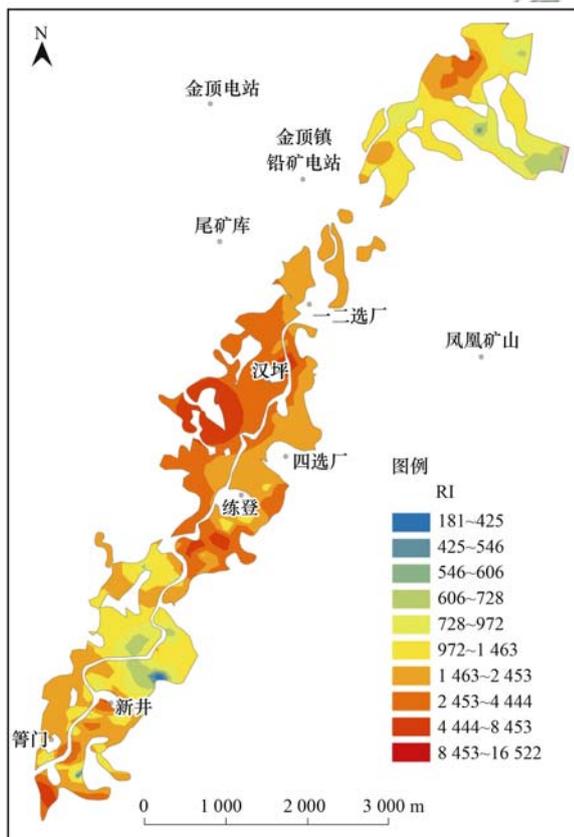


图5 研究区土壤重金属综合潜在生态风险指数分布

Fig. 5 Spatial distribution of potential ecological risk index of heavy metals in the study area

### 3 结论

(1)研究区采样点中 Cd、Pb、Zn、Hg、As、Cu、

- [ 3 ] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(1): 163-178.
- [ 4 ] 李春芳, 王菲, 曹文涛, 等. 龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1018-1027.  
Li C F, Wang F, Cao W T, *et al.* Source analysis, spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in sewage irrigation area farmland soils of Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1018-1027.
- [ 5 ] 胡森, 吴家强, 彭佩钦, 等. 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(2): 423-430.  
Hu M, Wu J Q, Peng P Q, *et al.* Assessment model of heavy metal pollution for arable soils and a case study in a mining area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(2): 423-430.
- [ 6 ] Wei C Y, Wang C, Yang L S. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in the soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(9): 1230-1236.
- [ 7 ] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(11): 1832-1838.  
Lu S J, Wang Y Y, He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb-Zn mine in Huize Country [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(11): 1832-1838.
- [ 8 ] 冉永亮, 邢维芹, 梁爽, 等. 华北平原地区某铅冶炼厂附近土壤重金属有效性研究[J]. *生态毒理学报*, 2010, **5**(4): 592-598.  
Ran Y L, Xing W Q, Liang S, *et al.* Heavy metal availability in soil near a lead smelter in the North China plain [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, **5**(4): 592-598.
- [ 9 ] Vaněk A, Ettler V, Grygar T, *et al.* Combined chemical and mineralogical evidence for heavy metal binding in mining-and smelting-affected alluvial soils[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(4): 464-478.
- [ 10 ] Li X D, Thornton I. Chemical partitioning of trace and major elements in soils contaminated by mining and smelting activities [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16**(15): 1693-1706.
- [ 11 ] 梁桂莲, 钱建平, 张力. 我国铅锌矿污染特点及修复技术[J]. *矿业研究与开发*, 2011, **31**(4): 84-87, 95.  
Liang G L, Qian J P, Zhang L. Features and remediation technologies of pollution in lead-zinc mining areas of China[J]. *Mining R & D*, 2011, **31**(4): 84-87, 95.
- [ 12 ] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 滇西珠江流域水体中重金属元素的地球化学特征[J]. *地质通报*, 2008, **27**(7): 1071-1078.  
Li R P, Wang A J, Cao D H, *et al.* Geochemical characteristics of heavy metals in water bodies and sediments of the Bijiang River drainage area, western Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(7): 1071-1078.
- [ 13 ] 周鸿斌, 角媛梅, 史正涛, 等. 云南珠江沿岸农田土壤磁测分析与重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(4): 1586-1591.  
Zhou H B, Jiao Y M, Shi Z T, *et al.* Magnetic analysis and assessment on heavy metal contamination in the farmland soil along Bijiang River in Yunnan Province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(4): 1586-1591.
- [ 14 ] 赵筱青, 李丽娇, 杨红辉, 等. 云南珠江流域农田土壤重金属 Pb、Zn、Cd、As 的地球化学特征[J]. *地球学报*, 2012, **33**(3): 331-340.  
Zhao X Q, Li L J, Yang H H, *et al.* The geochemical characteristics of heavy metals in agricultural soils of the Bijiang watershed in Yunnan Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2012, **33**(3): 331-340.
- [ 15 ] 李航, 叶霖, 肖唐付, 等. 云南金顶超大型铅锌矿区镉的地球化学特征及其环境效应[J]. *矿物学报*, 2007, **27**(2): 225-232.  
Li H, Ye L, Xiao T F, *et al.* Geochemistry and environmental effect of cadmium in Jinding Pb-Zn deposit of Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, **27**(2): 225-232.
- [ 16 ] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 云南兰坪金顶铅锌矿区土壤中 Pb 分布特征[J]. *地球学报*, 2009, **30**(1): 72-78.  
Li R P, Wang A J, Cao D H, *et al.* Distribution of Pb in soils of the Jinding Pb-Zn deposit, Lanning, Yunnan Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, **30**(1): 72-78.
- [ 17 ] 乔庆霞, 黄小凤. 珠江表层底泥中重金属化学形态的研究[J]. *昆明理工大学学报*, 1999, **24**(2): 195-198.  
Qiao Q X, Huang X F. A study of heavy metal chemical formations of surface sediment in Bijiang river [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology*, 1999, **24**(2): 195-198.
- [ 18 ] 刘芳, 王书肖, 吴清茹, 等. 大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 712-717.  
Liu F, Wang S X, Wu Q R, *et al.* Evaluation and source analysis of the mercury pollution in soils and vegetables around a large-scale zinc smelting plant [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 712-717.
- [ 19 ] 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2758-2765.  
Zhong X L, Zhou S L, Zhao Q G, *et al.* Coregionalization, spatial-correlation and spatial-factor analysis of soil available heavy metals in a typical region of the Yangtze river delta [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(12): 2758-2765.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 兰坪金顶铅锌矿区土壤重金属 Zn、Cd 分布特征研究[J]. *地质论评*, 2009, **55**(1): 126-133.  
Li R P, Wang A J, Cao D H, *et al.* Research on the distribution characteristics of Zn, Cd in the Soil of Jinding Pb-Zn deposit, Lanning County [J]. *Geological Review*, 2009, **55**(1): 126-133.
- [ 22 ] 王菲, 吴泉源, 吕建树, 等. 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3144-3150.

- Wang F, Wu Q Y, Lü J S, *et al.* Spatial characteristics and environmental risk of heavy metals in typical gold mining area of Shandong Province[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3144-3150.
- [23] 赵筱青, 杨红辉, 易琦. 沘江流域农田土壤重金属污染特征及原因剖析[J]. *安徽农业科学*, 2012, **40**(12): 7569-7573.  
Zhao X Q, Yang H H, Yi Q. Characteristics and reasons of heavy metal pollution in farmland soils in Bijiang watershed[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, **40**(12): 7569-7573.
- [24] 张迪, 袁庆虹, 叶银龙, 等. 兰坪矿区土壤中重金属污染状况调查[J]. *国外医学医学地理分册*, 2012, **33**(3): 181-182, 188.  
Zhang D, Yuan Q H, Ye Y L, *et al.* Research on the heavy metal pollution in soil environment in Lanping mining area[J]. *Foreign Medical Science Section of Medgeography*, 2012, **33**(3): 181-182, 188.
- [25] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from Southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(3): 410-418.
- [26] 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 等. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1516-1522.  
Zhang H Z, Tang Y L, Lu J, *et al.* Sources and spatial distribution of typical heavy metal pollutants in soils in Xihu scenic area[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1516-1522.
- [27] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 270-279.  
Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al.* Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 270-279.
- [28] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2714-2720.  
Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of soil heavy metal and pollution evaluation on the different sampling scales in farmland on Yellow River irrigation area of Ningxia: a case study in Xingqing County of Yinchuan City [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2714-2720.
- [29] 吕书丛, 张洪, 单保庆, 等. 海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4204-4210.  
Lü S C, Zhang H, Shan B Q, *et al.* Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the estuaries surface sediments from the Haihe river basin [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4204-4210.
- [30] 王吉坤, 冯桂林. 铅锌冶炼生产技术手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012. 8-10.  
Wang J K, Feng G L. Handbook of lead and zinc smelting production technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012. 8-10.
- [31] 黄维恒, 包立, 林健, 等. 沘江流域耕地土壤重金属分布及生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, **34**(5): 456-465.  
Huang W H, Bao L, Lin J, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in arable soils in Bijiang watershed, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, **34**(5): 456-465.
- [32] 张超兰, 李忠义, 邓超冰. 铅锌矿区农田土壤重金属的统计分析及空间分布研究[J]. *上海环境科学*, 2009, **28**(6): 253-257.  
Zhang C L, Li Z Y, Deng C B. A study on multivariate geostatistical and spatial distribution of heavy metals in farmland soil around a lead/zinc mining field in Guangxi [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2009, **28**(6): 253-257.
- [33] 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.
- [34] Rashed M N. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **178**(1-3): 739-746.
- [35] 徐友宁, 张江华, 刘瑞平, 等. 金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J]. *中国地质*, 2007, **34**(4): 716-722.  
Xu Y N, Zhang J H, Liu R P, *et al.* Environmental effects of heavy metal pollution of farmland soils in gold mining areas[J]. *Geology in China*, 2007, **34**(4): 716-722.
- [36] 高彦鑫, 冯金国, 唐磊, 等. 密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1707-1717.  
Gao Y X, Feng J G, Tang L, *et al.* Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in iron and gold mine soil of Miyun reservoir upstream[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1707-1717.

## CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing .....	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM <sub>2.5</sub> Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan .....	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Panjin .....	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City .....	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning .....	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin .....	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China .....	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region .....	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China .....	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China .....	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province .....	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China .....	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m .....	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes .....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China .....	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research .....	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain .....	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin .....	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir .....	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area .....	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir .....	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment .....	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios .....	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain .....	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China .....	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling .....	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) .....	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly( <i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network .....	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater .....	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization .....	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies .....	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion .....	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere .....	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria .....	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate .....	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession .....	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain .....	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil .....	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via <sup>13</sup> C Pulse-labeling .....	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China .....	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast .....	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River .....	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation .....	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China .....	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area .....	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils .....	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil .....	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province .....	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi .....	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province .....	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires .....	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO <sub>2</sub> Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level .....	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles .....	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments .....	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)