

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价

洪涛^{1,2}, 孔祥胜^{1,2*}, 岳祥飞^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004; 2. 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为全面了解云南东南部峰丛洼地地区土壤重金属的污染特征及生态风险状况, 采用网格化方法采集旱地和水田表层土样共 199 个, 测定其 Cd、As、Hg、Cr、Pb、Zn、Cu 和 Ni 含量。分别采用地累积指数法和潜在生态危害指数(RI)法评价土壤重金属污染和潜在生态风险程度, 应用聚类分析和绝对主成分分数/多元线性回归(APCS/MLR)法对重金属的来源及贡献大小进行分析。结果表明, 土壤 Cd、Hg、Cr、Ni 和 Zn 出现不同程度的富集, 分别达云南背景值的 16.00、7.29、1.46、1.45 和 2.39 倍; 土壤重金属平均 RI 为 1 039.3, 属于重度生态风险水平, Hg 和 Cd 是主要的生态风险因子; 多元统计分析表明, 重金属主要有 4 个来源: 化石燃料燃烧(源 1)、交通运输(源 2)、自然背景(源 3)和农业生产(源 4), Cd、Cr 和 Ni 的来源以源 1 为主, Pb 和 Zn 的主要来源为源 2, Cu 主要受源 3 控制(贡献率 77.86%), 源 4 为 Hg 的主导来源(70.37%), 源 1 和源 4 对 As 的贡献率分别为 46.71%、49.46%。

关键词: 土壤; 岩溶区; 重金属; 峰丛洼地; 生态风险评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4620-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901081

Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province

HONG Tao^{1,2}, KONG Xiang-sheng^{1,2*}, YUE Xiang-fei^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Ministry of Natural Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: The pollution characteristics, sources, and ecological risk of heavy metals in farmland soils were studied in a peak-cluster depression area southeast of Yunnan Province. In total, 199 topsoil samples were collected using the grid method and contents of eight heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, and Hg) were determined. The geoaccumulation index and potential ecological risk index (RI) were used to evaluate soil pollution levels and potential ecological risks, respectively. The absolute principal component scores-multivariate linear regression (APCS-MLR) model and cluster analysis were used to identify the pollution sources and apportion the heavy metals in the soils. The results show that the mean content of Cd, Hg, Cr, Ni, and Zn was higher than their respective background values, exceeding them by up to 16.00, 7.29, 1.46, 1.45, and 2.39 times, respectively. No evidence of the occurrence of other metals was found. The average RI was 1 039.3, which represents a high potential ecological risk, with Cd and Hg being the most crucial elements. The APCS-MLR model revealed that natural sources (PC1), traffic sources (PC2), fossil fuel combustion sources (PC3), and agricultural sources (PC4) were the four main contributors of soil heavy metals. The primary source of Cd, Cr, and Ni was PC1, while PC2 was the main source of Pb and Zn. PC3 and PC4 were the main sources of Cu and Hg with contribution rates of 77.86% and 70.37%, respectively. The main sources of As were PC1 (46.71%) and PC4 (49.46%).

Key words: soils; karst area; heavy metals; peak-cluster depression; ecological risk assessment

土壤重金属污染是一个长久而严峻的环境问题。据 2014 年环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 耕地土壤环境质量堪忧, 全国近 1/5 耕地受到重金属污染。耕地土壤重金属污染不仅影响一个地区的经济发展水平还影响农产品质量和食品安全, 直接对人体健康构成威胁, 也因此成为众多学者的重点研究对象, 包括土壤重金属的污染特征^[1]、来源^[2,3]和生态风险评价^[4]等。

生态风险评价是了解土壤重金属对生态系统潜在影响程度的重要途径。目前关于土壤重金属评价

的方法有 Hakanson 潜在生态风险评价法^[5]、PEC/PNEC 比值法^[6]、基于随机模糊的土壤潜在生态风险评价法^[7], 其中 Hakanson 潜在生态风险评价法目前使用得最多也最成熟, 后来一些学者对该方法进行了改进, 如龙海洋等^[8]将评价方法中的重金属全量换成有效态含量, 提高了评价准确性。李春芳

收稿日期: 2019-01-08; 修订日期: 2019-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877206); 中国地质调查局项目(121201237000160024)

作者简介: 洪涛(1986~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为岩溶环境地质、水文地质, E-mail: hongt@karst.ac.cn
* 通信作者, E-mail: karstxks@126.com

等^[9]对该方法中的评价标准进行了修改,使之更加实用. 在分析重金属来源时,主成分分析、聚类分析和相关分析等多元统计方法最常用,而在重金属来源量化方面应用比较多的是 UNMIX 模型法^[10]和 APCS-MLR 受体模型法^[3],考虑到土壤污染源成分谱的未知性与难确定性,APCS-MLR 受体模型法具有更大的优势.

滇东南八宝镇、南屏镇和黑支果乡一带由于特殊的地质背景和良好的气候条件,使得该地区广泛发育峰丛洼地地貌,而此类地区往往也是贫困集中分布区^[11],工业缺乏,农业生产成为当地的主要经济来源,著名的八宝“贡米”发源地即位于区内. 此外,已有研究表明,该地区土壤存在较严重的重金属污染现象,但由于数据较少且并未就重金属的来源进行解析^[12],因此,本研究以旱地和水田土壤中的重金属为研究对象,分析其含量和污染情况,利用潜在生态危害指数法评价重金属的生态风险水平,采用聚类分析和 APCS-MLR 模型对重金属的各种可能来源进行追踪,查清每种来源的贡献量,以期为当地重金属污染防治提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南广南县东南部,坐标范围为 105°08'33"~105°31'45"E, 23°27'45"~23°53'18"N, 面积约 810 km²,处于云贵高原向桂东延伸的斜坡地段,属滇东南岩溶高原的一部分,是一个山地高原的丘陵地区,如图 1 所示. 整体上,地势起伏较小,海拔 1 076~1 252 m,平均海拔 1 128 m. 年平均气温为 16.7℃,最高气温 36.7℃,最低气温 -5.5℃,最冷月在 1~2 月,7~8 月为最热月(月平均 22.5℃),无霜期 305 d,四季分明. 年均降水量为 1 042 mm,干湿季节分明,11~4 月为旱季,雨季集中于 5~10 月. 历年日照平均时数为 1 651 h,平均相对湿度 79%. 区内岩性为灰岩、白云质灰岩等可溶性岩,在良好的气候条件下,岩溶作用强烈,形成峰丛洼地等岩溶地貌景观,山体坡度 40°左右,相对高差 50~100 m,著名的八宝省级风景名胜区即位于区内. 主要土地利用类型为旱地和水田,相应地土壤为赤红壤和水稻土,富铝化程度较低.

1.2 样品采集与分析

依据《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258-2014),在研究区内按 1 km×1 km 划分采样网格,采集旱地和水田土壤样,采样深度 0~20 cm,为减少随机误差的影响,根据现场地形地貌条件,在主采样点附近 20~50 m 范围

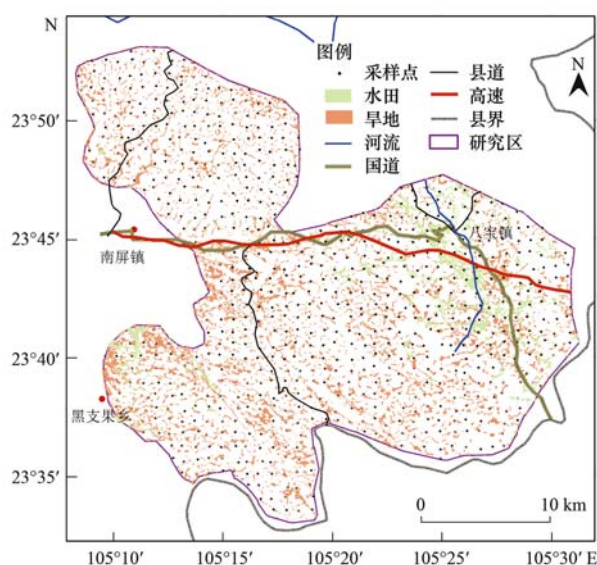


图 1 研究区采样位置示意

Fig. 1 Sampling site within the study area

内等量采集 2~4 个分样,混合后保证样品重 1 kg 左右,用 GPS 记录主采样点的坐标,共采集 796 个样品. 样品先晾晒风干,然后碾碎过 20 目孔径尼龙筛,装瓶在阴凉环境下保存,按中心网格内 4 个样品组合成一个混合样,共计 199 个,其中旱地土样 168 个,水稻土 31 个. 样品送安徽省地质实验研究所进行测试,其中 Cr、Zn 和 Pb 采用粉末压片-X 射线荧光光谱仪(ZSXprimus)测定,检测限分别为 3、1 和 2 mg·kg⁻¹,Ni、Cu 和 Cd 采用电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP6300)测定,检测限分别为 1、1 和 0.02 mg·kg⁻¹,As 和 Hg 采用原子荧光光谱仪(AFS-230E)测定,检测限分别为 0.2 mg·kg⁻¹和 0.000 5 mg·kg⁻¹. 为保证样品分析的准确性,测试单位随机抽取了 5% 的样品进行平行试验,重复检查合格率为 100%.

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数方法

地累积指数法于 19 世纪 70 年代由 Muller^[13]提出,起初用于水环境沉积物中重金属的评价. 由于该方法考虑了自然成岩作用对背景值的影响,同时也考虑了人为活动对环境的影响,因而比传统的单因子评价法更有优势并被广泛应用于土壤重金属污染评价中^[14],其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \times C_n^i)]$$

式中, I_{geo} 为第 i 种重金属的地累积指数, C_i 为第 i 种重金属的实测浓度(10^{-6}), C_n^i 为第 i 种重金属的参考背景值,本文采用云南省土壤质量背景值^[15]作为参比值, K 为消除各地岩石差异可能引起背景值的差异(一般取值为 1.5). 污染等级分为 7 级^[5]. I_{geo} 值分段评价标准为: $I_{geo} \leq 0$ 表示无污染(0

级); $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ 表示轻-中等污染(1级); $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ 表示中等污染(2级); $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ 表示中等-重污染(3级); $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ 表示重污染(4级); $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ 表示重-极严重污染(5级); $I_{\text{geo}} > 5$ 表示极严重污染(6级).

1.3.2 潜在生态危害指数风险评价

潜在生态危害指数法综合考虑了多元素的协同作用、毒性水平、污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素,可以综合反映重金属对生态环境影响潜力,目前已成为国内最常用的生态风险评价方法,计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times P_i) = \sum_{i=1}^n \left(T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \right)$$

式中, RI 为综合生态风险指数, E_r^i 为单个污染物的

潜在生态风险系数, T_r^i 为单个污染物的毒性响应参数, P_i 为某一金属的污染指数, 根据已有的研究成果^[16], 将重金属的毒性响应系数分别定为 $Zn = 1$, $Cr = 2$, $Cu = Ni = Pb = 5$, $As = 10$, $Cd = 30$, $Hg = 40$. 考虑到 Hakanson 潜在生态风险评价结果的精度和普适性, 本研究选用李春芳等^[9]根据重金属的毒性和种类重新划分的土壤重金属潜在生态风险分级标准(表1).

1.4 数据处理与图件制作

采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 统计软件对数据进行处理和统计分析, 运用聚类分析、主成分分析解析重金属来源, 运用绝对主成分得分-多元线性回归模型 (APCS-MLR) 定量评价每种来源对重金属的贡献.

表1 重金属危害程度划分
Table 1 Grading evaluation for potential ecological harm

项目	危害程度				
	1级(轻微)	2级(中等)	3级(重度)	4级(强烈)	5级(极强)
E_r^i	<30	30~60	60~120	120~240	>240
RI	<60	60~120	120~240	240~480	≥480

2 结果与分析

2.1 重金属含量及污染特征

研究区内8种重金属和土壤 pH 的统计特征值如表2所示. 由于研究区地处西南岩溶区, 经碳酸盐岩母岩风化而成的钙质壤土中重碳酸根离子含量较高, 易形成偏碱性的土壤环境. 由表2可知, 农用地土壤 pH 变化范围为 6.98~8.07, 平均值为 7.42, 体现出与岩溶土壤环境较好的一致性. 土壤 Cr、Pb、As、Hg、Cd、Ni、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 111.49、45.42、29.88、0.35、4.96、63.58、50.02 和 224.63 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 Pb、As 和 Cu 与云南背景值^[15,17]差别不大, 而 Cr、Hg、Cd、Ni 和 Zn 分别达到了背景值的 1.46、7.29、16.00、1.45 和 2.39 倍, 表现出不同程度的污染富集现象, 特别是有毒有害元素 Hg 和 Cd, 应引起特别重视. 与国家农用地土壤污染风险筛选值^[18]相比可知, Cr、Pb、Hg、Cu、Zn 和 Ni 均未超出该值, 而 As、Cd 分别为筛选值的 1.19 倍和 8.26 倍. 土壤中污染物含量等于或者低于筛选值时, 对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险低, 一般情况下可以忽略; 超过该值时, 对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险. 总体而言, 研究区土壤8种重金属中有6种不超标, 1种超标幅度不大, Cd 严重超标. 变异系数可用来反映不同量纲数据的变异程度, 根据 Wilding 等^[19]对变异系数的划

分标准, 除 pH 属低度变异外, 其余8种元素都为高度变异, 其中 Pb、As、Hg 和 Cd 的变异系数相对较大, 说明这4种元素受外界干扰较其他元素大, 这通常是由耕作方式、管理措施和污染排放等人为活动等造成, 在非岩溶区, 已有研究中也有相似报道^[5,20].

此外, 从表3可看出, 旱地土壤和水稻土重金属含量相近, 总体受成土母岩的控制. 但水稻土重金属含量普遍比旱地土壤稍高, 主要原因为, 在渍水条件下, 水稻土处于还原环境, 氧化还原电位较低, Cd、Hg 和 Pb 等重金属容易生成难溶性硫化物而保存在土壤中^[17]. 此外, 诸如土壤阳离子交换量, 孔隙度等物理性质也是影响土壤吸附重金属的重要因素^[21].

地累积指数法评价结果见表4. 从地累积指数均值上分析, 8种重金属污染程度排序为 $Cd > Hg > As > Zn > Pb > Cr > Ni > Cu$, Cd 污染最严重, 其次为 Hg, 2种重金属达重度污染及以上的样品数分别占总数的 49.0% 和 9.7%. 含 As、Zn 和 Pb 的样品有少部分处于中等至重污染水平, 大部分为清洁或轻度污染. 样品中 Cr、Ni 和 Cu 含量基本处于清洁水平, 少数样品为轻度或中等污染.

2.2 重金属潜在生态风险评价

重金属潜在生态风险评价结果表明(表5), 从单个重金属的风险系数来看, 可划分为三类. 第一类包括 Cr、Pb、Ni、Cu 和 Zn, 这5种重金属潜在风

表 2 研究区土壤重金属描述性统计¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Statistical data for heavy metal concentrations in the soil samples of the study area/mg·kg⁻¹

重金属	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数	云南 背景值	农用地土壤污染风险筛选值			
							6.5 < pH ≤ 7.5		pH > 7.5	
							旱地	水田	旱地	水田
Cr	35.90	293.60	111.49	47.08	0.42	76.32	200	300	250	350
Pb	5.00	864.60	45.42	48.03	1.05	42.42	120	140	170	240
As	2.42	658.20	29.88	37.28	1.24	28.86	30	25	25	20
Hg	0.02	4.86	0.35	0.38	1.08	0.048	2.4	0.6	3.4	1.0
Cd	0.07	26.67	4.96	5.56	1.12	0.31	0.3	0.6	0.6	0.8
Ni	14.10	194.30	63.58	29.40	0.46	43.61	100	100	190	190
Cu	14.32	1142.99	50.02	21.64	0.43	47.20	100	200	100	200
Zn	33.40	2359.60	224.63	175.38	0.78	93.76	250	250	300	300
pH	6.98	8.07	7.42	0.78	0.11	—	—	—	—	—

1) “—”表示无数据

表 3 不同土地类型土壤重金属含量特征

Table 3 Concentration characteristics of heavy metals from different land-use types

项目		Cr	Pb	As	Hg	Cd	Ni	Cu	Zn	pH
旱地土壤(n = 168)	平均值/mg·kg ⁻¹	110.10	44.97	30.51	0.33	4.73	63.56	50.73	223.17	7.46
	变异系数	0.44	1.13	1.29	1.14	1.20	0.48	0.44	0.82	0.12
水田土壤(n = 31)	平均值/mg·kg ⁻¹	112.80	45.87	29.25	0.37	5.19	63.60	49.31	226.09	7.38
	变异系数	0.27	0.24	0.40	0.50	0.65	0.28	0.28	0.35	0.10

表 4 土壤重金属地累积指数分级统计

Table 4 Statistical classification of heavy metal *I*_{geo} in topsoil

重金属	<i>I</i> _{geo}	污染分级比例/%						
		0 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
Cr	-1.67 ~ 1.36	58.0	39.3	2.7	0	0	0	0
Pb	-3.67 ~ 3.76	86.6	12.5	0.5	0.4	0	0	0
As	-3.31 ~ 4.77	46.5	41.9	10.4	1.2	0	0	0
Hg	-1.46 ~ 6.08	5.3	15.5	27.8	41.7	8.3	1.4	0
Cd	-2.37 ~ 6.21	19.8	9.9	10.6	10.7	15.7	18.7	14.6
Ni	-2.21 ~ 1.57	51.3	47.9	0.8	0	0	0	0
Cu	-2.31 ~ 1.01	86.9	12.8	0.3	0	0	0	0
Zn	-2.07 ~ 4.07	38.2	29.7	31.0	1.1	0	0	0

险程度均为轻度，不会对生态产生风险；As 元素可单独划为一类，有 4.28% 的含 As 土壤样品达到中等-较重的风险程度，对生态构成一定的压力；第三类元素为 Hg 和 Cd，从表中可看出 Hg 和 Cd 涵盖了所有的生态风险等级，其中重度及以上等级分别占总数的 94.7% 和 76.30%，Hg 是主要潜在生态危害因子，其次为 Cd，李一蒙等^[22]研究开封市土壤重金属潜在生态风险时也得到了相似的结果，主要

是因为 Hg 和 Cd 是剧毒有害元素且严重超标。此外，旱地和水田土壤重金属综合潜在风险指数(RI)达轻微-中等的比例分别为 5.66% 和 0%，而达到强烈风险以上的比例分别为 75.38% 和 97.44%，说明稻田生态系统承受巨大的重金属污染压力。总体而言，研究区土壤重金属环境质量较差，作为全国仅有的八宝“贡米”生产基地和物质文化遗产地，应引起足够的重视并采取保护措施。

表 5 潜在生态风险评价结果

Table 5 Potential ecological risk assessment of heavy metals

项目		<i>E</i> _r							RI	
		Cr	Pb	As	Hg	Cd	Ni	Cu	旱地	水田
	最小值	0.94	0.59	1.51	21.76	8.7	1.62	1.52	59.28	66.71
	最大值	7.69	101.91	410.35	4 055.67	3 337.36	22.28	15.15	4 763.12	2 375.20
	平均值	2.92	5.35	18.63	292.16	619.58	7.29	5.30	930.32	1 148.28
潜在风险 程度比例/%	轻微	100	99.6	88.5	0.5	13.3	100	100	0.29	0
	中等	0	0.2	10.4	4.8	10.4	0	0	5.37	0
	重度	0	0.2	1.1	15.5	10.9	0	0	18.96	2.56
	强烈	0	0	0	27.8	9.1	0	0	19.26	10.25
	极强	0	0	0	51.4	56.3	0	0	56.12	87.19

2.3 重金属来源分析

聚类分析和主成分分析能够很好地辨别土壤重金属污染来源. 研究中先剔除了异常值并进行标准化处理, 基于组间平均连接法(Ward法)绘制树状图, 如图2所示, 从中可知, 聚类分析可将8种元素分为4类: Pb-Zn、Hg、Cr-Ni-Cd-As和Cu. 主成分分析KMO检验值为0.816, 说明变量之间相关性较强, 适合做主成分分析. 利用SPSS软件, 采用Kaiser标准化的正交旋转法提取出4个主成分, 见表6, 采用最大方差法对载荷矩阵进行正交旋转, 累积解释总方差达84.782%, 虽然只有前两个主成分特征值大于1, 但考虑到解析的总方差只有52.199%, 信息丢失较多, 前3个主成分累积总方差也只有68.885%, 低于70%的要求, 因此, 提取前4个主成分可满足要求且各元素的变量共同度均较高, 介于0.698~0.985之间, 说明元素的大部分信息可以被4个主成分解释, 提取的效果较好. 表6结果显示, Cr、Ni、Cd和As在主成分PC1上具有高载荷, 方差贡献率为29.431%, 此外, Ni和As分别在PC3和PC4上也具有较高的载荷($r=0.559$ 和 $r=0.595$), 说明Ni和As有两个主要的来源; 主成分PC2以Pb、Zn的载荷最高, 方差贡献率为22.768%; PC3上Cu的载荷最高, 达到0.953, 其余均较小; Hg在PC4上的载荷最高(0.871). 综上分析, 聚类分析与主成分分析在土壤重金属来源分类结果上具有较好的一致性. 由此, 可根据重金属的地质背景情况、研究区工农业排放重金属的特点及污染源的标志性元素来判断重金属的来源, 具体分析如下.

2.3.1 Cr-Ni-Cd-As

Cr、Ni、Cd和As是煤炭中4种主要的重金属元素, 在高温裂解条件下, 很大一部分随烟气进入大气, 然后通过大气沉降进入土壤; 另一部分则保留在固体残渣中, 如果保存不当, 则易通过降雨淋滤进入土壤. 研究区目前还是以燃煤为主的生活方式, 而且煤渣也随意丢弃, 成为重金属重要污染源. 刘巍等^[23]对准东煤田露天矿区的研究表明, Cr和As主要受煤炭燃烧等人为活动的影响, 同时相关研究还指出As是燃煤和垃圾焚烧的标志性元素^[24]. 由此可知, 研究区土壤中Cr、Ni、Cd、As的主要来源为燃煤, 可将PC1定为化石燃烧源(源1).

2.3.2 Pb-Zn

Pb和Zn被称为交通污染元素^[25], 在汽车尾气中含量较高, 以干湿沉降的方式在农业土壤中积累, 相关报道较多, 如秦先燕等^[26]的研究指出, 环

巢湖农业区土壤中Pb和Zn的来源主要为交通运输引起的大气沉降; 郭晓东^[27]指出珲春盆地Pb重金属平均含量接近背景值, 而城市区及北部国道线附近等地区超过背景值的主要原因为汽车尾气排放. 本研究区内基本无工业生产, 但交通较发达, 高速公路、国道和县道交叉穿过, 因此, 研究区内土壤中Pb、Zn的主要来源为汽车尾气沉降, 故把PC2定为交通运输源(源2).

2.3.3 Cu

Martin等^[28]认为Cu在含量较低时认为其来源于成土母质, 但在含量较高时则主要受人类活动的影响特别是交通运输. 研究区土壤Cu含量与云南背景值相差不大且变异系数相对较小, 可认为其来源为成土母质, 因此, 也将PC3定为自然背景源(源3).

2.3.4 Hg

Hg可能有多种人为污染源, 一般来说, 工业排放是主要来源, 农业生产对Hg的影响较小^[29], 而研究区为农耕区, 除了个别的灰岩采石场, 基本无工矿业活动, 可排除工业污染源. 同时, Madrid研究指出含Hg农药和化肥的使用导致了Hg的污染^[30]. 研究区内Hg的平均含量达背景值的7倍且变异程度大, 污染范围广, 说明农业生产是其主要污染源. 因此, 也将PC4定为农业生产源(源4).

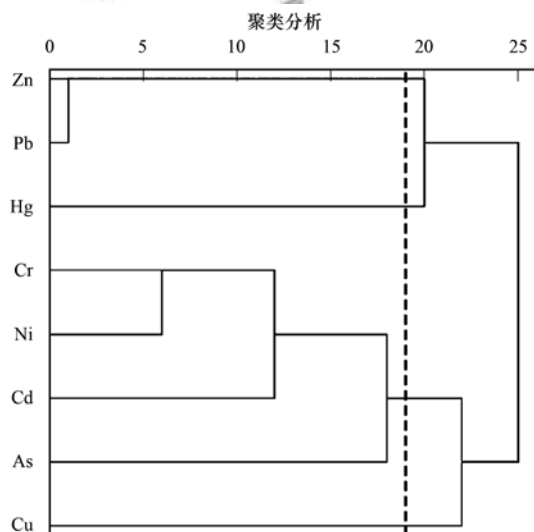


图2 基于Ward法的聚类分析树状图

Fig. 2 Dendrogram result of the cluster analysis based on the Ward method of hierarchical cluster analysis

2.3.5 重金属来源贡献量

依据APCS-MLR模型计算得出了8种元素的4种来源的贡献率, 结果见表7. 从中可知, 源1即化石燃烧源对Cd、Cr、Ni、As的贡献率分别为78.67%、64.39%、47.66%和46.71%, 源2即交通运输源对Pb、Zn的贡献率为86.68%和

表 6 土壤重金属含量主成分分析旋转成分矩阵
Table 6 Principle component analysis results for heavy metal concentrations

元素	主成分(PC)				变量共同度
	1	2	3	4	
Cr	0.808	0.026	0.214	0.207	0.743
Zn	0.378	0.879	0.202	0.168	0.985
Pb	-0.029	0.957	-0.040	0.216	0.965
Cu	0.190	0.076	0.953	0.005	0.949
Ni	0.723	0.044	0.559	0.191	0.874
Cd	0.826	0.206	0.095	-0.077	0.740
As	0.562	0.141	-0.095	0.595	0.698
Hg	0.023	0.250	0.094	0.871	0.830
特征值	3.542	1.601	0.914	0.725	
解释总方差/%	29.431	22.768	16.686	15.897	
累积解释总方差/%	29.431	52.199	68.885	84.782	

54.04%，源 3 即自然背景源对 Cu 的贡献率为 77.86%，而源 4 即农业生产源对 Hg 的贡献率为 70.37%，由此可见同 1 种源对不同重金属累积的贡献程度不同。而就某一种重金属来说，往往受多种来源的共同影响，如 Pb 基本由交通运输源起主导作用，但农业生产源也贡献了 19.56%，Ni 除受化石燃烧影响外，还受成土母质的控制（贡献率 36.85%），这与 Facechinelli 等^[31]的研究得出 Ni 含量与基岩有关的结论相似。此外，As 除受化石燃料燃烧影响外，农业生产源也贡献了 49.46%，两者贡献程度相差不大，主要原因为农民大量使用农药、化肥（磷酸盐肥料、硝酸盐肥料和有机肥料），经过长时间的积累，造成了 As 的富集^[32]。

表 7 APCS-MLR 模型解释的土壤重金属源贡献
Table 7 Source contribution for soil heavy metals determined using the APCS-MLR

元素	源贡献率/%				回归系数 (R^2)
	源 1	源 2	源 3	源 4	
Cr	64.39	2.07	17.05	16.49	0.743
Zn	23.23	54.04	12.41	10.32	0.984
Pb	-2.62	86.68	-3.62	19.56	0.964
Cu	15.52	6.21	77.86	0.41	0.948
Ni	47.66	2.90	36.85	12.59	0.871
Cd	78.67	19.62	9.04	-7.33	0.737
As	46.71	11.72	-7.89	49.46	0.698
Hg	1.85	20.19	7.59	70.37	0.829

3 讨论

Cd 和 Hg 为研究区的严重污染元素，具有极强的潜在生态风险，另外，李丽辉等^[17]的研究表明，Cd 也是滇东南碳酸盐岩区的高背景元素，但本研究表明 Cd 的富集仅有小部分来自成土母质（贡献率仅为 9.04%），大部分来自燃煤排放。同时，Hg 的积累也只有 7.59% 来自自然背景源，高达 70.37% 来自农业生产。相关研究报道也较多，如吴洋等^[33]对广西都安县耕地土壤重金属的污染风

险进行了评价，表明 Cd 是主要污染元素且对生态风险贡献率达到 88%，但其来源主要为矿业活动；宋波等^[34]研究了同样处于岩溶区的广西西江流域农田土壤重金属含量及来源时也得出类似结论，此外还指出水田土壤 Cd 含量高于旱地土壤，与本研究结论一致；刘勇等^[35]对太原市土壤重金属污染情况研究结果表明，太原市土壤重金属污染的潜在生态危害由强至弱依次为：Hg > Cd > As > Pb = Cu > Cr > Zn，其中，Hg 的影响占绝对主导地位，其次为 Cd，Hg 的来源为农业生产，和本研究结论相似。

作为国内仅有的八宝“贡米”生产区，随着人为来源重金属的不断输入，承受着巨大的生态风险，特别是有毒有害元素 Cd 和 Hg 的积累对稻作生态系统和食用安全产生严重的潜在危害，必须引起重视并加以防治。同时还需指出，Hakanson 潜在生态风险评价是基于全量来考虑对生态的影响，但真正能被植物吸收和利用的是重金属有效态，而岩溶区富钙偏碱的土壤环境降低了有效态含量，据报道^[36]西南岩溶区原始林地土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 的有效态含量分别只占总量的 5.48%、0.10%、6.44% 和 4.19%，因此，在评价潜在生态风险时应考虑重金属形态的影响。

4 结论

(1) 滇东南峰丛洼地土壤 Cr、Pb、As、Hg、Cd、Ni、Cu 和 Zn 的平均含量分别为 111.49、45.42、29.88、0.35、4.96、63.58、50.02 和 224.63 mg·kg⁻¹，均具有高度的空间变异性。Cd、Hg、Cr、Ni 和 Zn 含量高于云南背景值，其中 Cd 和 Hg 的平均含量分别达到云南背景值的 16 倍和 7.29 倍，49% 的含 Cd 土壤样品发生重污染。

(2) Cr、Pb、Ni、Cu 和 Zn 等 5 种重金属潜在风险水平为轻度，Hg 和 Cd 重度及以上风险等级分别

占 69.54% 和 62.15%, 土壤重金属平均 RI 为 1039.3, 达重度危害水平。水稻土壤比旱地土壤生态风险更高。

(3) 聚类分析和 APCS-MLR 模型解析了重金属的 4 种来源: 化石燃烧源(源 1)、交通运输源(源 2)、自然背景源(源 3)和农业生产源(源 4)。Cd、Cr 和 Ni 主要受源 1 影响, 源贡献率分别为: 78.67%、64.39% 和 47.66%; 源 2 对 Pb 和 Zn 的贡献率为 86.68% 和 54.04%; 源 3 和源 4 分别为 Cu 和 Hg 的主导来源, 贡献率分别为 77.86% 和 70.37%。

参考文献:

- [1] 赵红安, 藏亮, 张贵军, 等. 县域尺度土壤重金属污染特征及源解析——以赵县为例[J]. 土壤通报, 2018, **49**(3): 710-719.
Zhao H A, Zang L, Zhang G J, *et al.* Soil heavy metal pollution characteristics and source apportionment at county scale—take Zhaoxian county as an example[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(3): 710-719.
- [2] 洪涛, 谢运球, 覃星铭, 等. 黔西北土壤-植被系统元素地球化学特征及其生态关系[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(10): 890-896.
Hong T, Xie Y Q, Qin X M, *et al.* Geochemical characteristics and ecological interaction of earth elements in the soil-plant system in northwest Guizhou province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(10): 890-896.
- [3] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2513-2521.
Chen X D, Lu X W. Source apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [4] 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.
- [5] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4232-4240.
Zhang Q, Chen Z J, Peng C S, *et al.* Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4232-4240.
- [6] 宗庆霞, 窦磊, 侯青叶, 等. 基于土地利用类型的土壤重金属区域生态风险评价: 以珠江三角洲经济区为例[J]. 地球科学进展, 2017, **32**(8): 875-884.
Zong Q X, Dou L, Hou Q Y, *et al.* Regional ecological risk assessment of soil heavy metals in Pearl River Delta economic zone based on different land uses[J]. Advances in Earth Science, 2017, **32**(8): 875-884.
- [7] 李飞, 黄瑾辉, 李雪, 等. 基于随机模糊理论的土壤重金属潜在生态风险评价及溯源分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(4): 1233-1240.
Li F, Huang J H, Li X, *et al.* Potential ecological risk assessment based on stochastic-fuzzy simulation for soils and pollution source identification [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(4): 1233-1240.
- [8] 龙海洋, 王维生, 韦月越, 等. 矿区周边土壤中重金属形态分析及污染风险评价[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, **41**(5): 1676-1682.
Long H Y, Wang W S, Wei Y Y, *et al.* Speciation analysis and pollution risk assessment of heavy metals in the soils surrounding mine area[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, **41**(5): 1676-1682.
- [9] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5628-5638.
Li C F, Cao J F, Lv J S, *et al.* Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5628-5638.
- [10] 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.
- [11] 张凤太, 张军以, 苏维词. 喀斯特峰丛洼地农业生产活动的景观效应初探[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(4): 191-195.
Zhang F T, Zhang J Y, Su W C. Preliminary research for the influence of agricultural production activities on the landscape in karst peak-cluster[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, **19**(4): 191-195.
- [12] 谢代兴, 杨杨, 苏春田, 等. 滇东南石灰土重金属超标程度及潜在生态危害评价: 以三迭系至寒武系地层土壤为例[J]. 贵州农业科学, 2015, **43**(1): 162-166.
Xie D X, Yang Y, Su C T, *et al.* Degree of excessive heavy metals of calcareous soil and evaluation of potential ecological hazard in southeast Yunnan: A case study on stratum of soil from Triassic to Cambrian[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, **43**(1): 162-166.
- [13] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, **2**: 108-118.
- [14] 王斐, 黄益宗, 王小玲, 等. 江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价: 不同评价方法的比较[J]. 环境化学, 2015, **34**(2): 225-233.
Wang F, Huang Y Z, Wang X L, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: Comparison of different evaluation methods[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(2): 225-233.
- [15] 史静, 张乃明. 云南设施土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 云南农业大学学报, 2010, **25**(6): 862-867.
Shi J, Zhang N M. The Distributing character of heavy metals and its pollution estimate in greenhouse soils of Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2010, **25**(6): 862-867.
- [16] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 112-115.
XU Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk Index[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 112-115.
- [17] 李丽辉, 王宝禄. 云南省土壤 As、Cd 元素地球化学特征[J]. 物探与化探, 2008, **32**(5): 497-501.

- Li L H, Wang B L. Geochemical characteristics of As and Cd in soils of Yunnan Province [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2008, **32**(5): 497-501.
- [18] 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].
- [19] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys[A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability* [M]. Wageningen: PUDOC Publishers, 1985. 166-194.
- [20] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
- Dai B, Lv J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, Eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [21] 王梦梦, 何梦媛, 苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- [22] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [23] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- Liu W, Yang J J, Wang J, *et al.* Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of east Junggar Basin in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- [24] 于瑞莲, 胡恭任, 袁星, 等. 大气降尘中重金属污染源解析研究进展[J]. *地球与环境*, 2009, **37**(1): 73-79.
- Yu R L, Hu G R, Yuan X, *et al.* Development in research on pollution source of heavy metals from atmospheric dust-recognition and analysis[J]. *Earth and Environment*, 2009, **37**(1): 73-79.
- [25] Sun C Y, Zhao W J, Zhang Q Z, *et al.* Spatial distribution, sources apportionment and health risk of metals in topsoil in Beijing, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13**(7): 727-740.
- [26] 秦先燕, 李运怀, 孙跃, 等. 环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(4): 455-463.
- Qin X Y, Li Y H, Sun Y, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu Lake, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(4): 455-463.
- [27] 郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 等. 珲春盆地农田重金属分布特征及源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- Guo X D, Sun Q F, Zhao Y S, *et al.* Distribution and sources of heavy metals in the farmland soil of the Hunchun basin of Jilin Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1875-1883.
- [28] Martín J A R, Arias M L, Corbí J M G. Heavy metals contents in agricultural topsoils in the ebro basin (Spain). application of the multivariate geochemical methods to study spatial variations [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**(3): 1001-1012.
- [29] Davis H T, Aelion C M, McDermott S, *et al.* Identifying natural and anthropogenic sources of metals in urban and rural soils using GIS-based data, PCA, and spatial interpolation [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(8-9): 2378-2385.
- [30] Madrid L, Díaz-Barrientos E, Madrid F. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville [J]. *Chemosphere*, 2002, **49**(10): 1301-1308.
- [31] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(6): 1285-1293.
- Liu Y, Yue L L, Li J C. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **31**(6): 1285-1293.
- [36] 杨霖, 杨程, 朱同彬, 等. 岩溶区原始林土壤微量元素含量与有效特征[J]. *中国岩溶*, 2018, **37**(1): 59-66.
- Yang L, Yang C, Zhu T B, *et al.* Contents and availability of trace elements in soils of natural forests in karst region [J]. *Carsologica Sinica*, 2018, **37**(1): 59-66.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)