

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



2020

Vol.41 No.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析	方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)
基于在线观测的天津市 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)
2017~2018年北京大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)
北京南部城区 PM _{2.5} 中碳质组分特征	董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析	冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源	谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)
2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估	朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)
保定市大气污染变化趋势及特征	苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)
郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势	卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)
郑州市少数民族运动会期间 O ₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估	赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征	柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响	张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析	张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)
天津市 2017 年移动源高分时空分辨率排放清单	刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征	徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选	李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征	张军, 梁青芳, 高煜 (4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估	秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析	韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素	江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征	王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)
基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估	冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响	高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)
硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律	张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征	王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算	王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响	姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)
铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能	梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)
纳米 Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制	石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制	余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐 (4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构	尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)
不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析	陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨 (4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析	齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性	袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应	吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征	孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响	张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响	陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发	杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响	霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾斌, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)
水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期	邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价	周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势	魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析	王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价	彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)
《环境科学》征订启事 (4435)	
《环境科学》征稿简则 (4445)	
信息 (4606, 4625, 4732)	

重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析

王锐^{1,2}, 邓海^{1,2*}, 严明书^{1,2}, 何忠庠^{1,2}, 周皎^{1,2}, 梁绍标^{1,2}, 曾琴琴³

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038; 2. 重庆市土地质量地质调查重点实验室, 重庆 400038; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081)

摘要: 为了探究矿业活动及地质背景对土壤环境的影响, 在重庆市酉阳县南部农用地中采集了土壤组合样品 156 件, 分析了土壤中重金属的含量及 pH, 基于地统计法、单因子指数法及内梅罗指数法对土壤重金属污染状况进行了评价, 利用主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型讨论土壤重金属的来源。结果表明, 土壤 Cd 污染呈面状分布, 而土壤 Hg 主要表现为点状污染, 土壤中-重度污染主要分布在涂市乡、麻旺镇及龙潭镇三镇交界处, 土壤以酸性为主, 出现农作物污染的风险较高; 指示克里格法评价结果显示, 三镇交接处及涂市乡北部有较高的土壤污染概率; 主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型分析结果显示, 土壤 As、Cd、Cr 及 Ni 的来源主要受到地质背景的控制, 土壤 Hg 与 Pb、Zn 主要受到矿业活动的控制, 土壤 Cu 同时受到地质背景和矿业活动的影响; 此外, 农业活动也是土壤 As、Cd、Pb、Cu 及 Zn 等元素来源之一。研究区土壤中-重度污染主要是由矿业活动引起的, 而地质背景导致的土壤重金属污染主要为轻度污染。该研究可为典型区域土地安全利用及土壤污染防治提供理论基础。

关键词: 土壤重金属; 地统计法; 受体模型; 来源分析; 污染评价

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4749-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202003175

Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing

WANG Rui^{1,2}, DENG Hai^{1,2*}, YAN Ming-shu^{1,2}, HE Zhong-xiang^{1,2}, ZHOU Jiao^{1,2}, LIANG Shao-biao^{1,2}, ZENG Qin-qin³

(1. Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China; 3. Chengdu Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: To investigate the impact of mining activities and geological background on the soil environment, 156 soil samples were collected from an agricultural land in southern Youyang County, Chongqing. The content and pH of heavy metals in the soil were analyzed, and the Nemerow index method was used to evaluate the pollution status of soil heavy metals. The source of soil heavy metals was discussed using the principal component analysis/absolute principal component score (PCA/APCS) receptor model. The results showed that the soil Cd pollution was distributed in a planar shape, while soil Hg mainly appeared as point pollution. The medium-severe soil pollution was mainly distributed at the junction of Tushi Town, Mawang Town, and Longtan Town, where the soil was predominantly acidic and there was a higher risk of crop contamination; the indicator Kriging evaluation results showed that there was a higher probability of soil contamination at the junction of the three towns and the northern part of Tushi Township. The results of the PCA/APCS receptor model analysis showed that the sources of soil As, Cd, Cr, and Ni were mainly controlled by geological background; soil Hg, Pb, and Zn were mainly controlled by mining activities; further, soil Cu was affected by both geological background and mining activities. In addition, the agricultural activities were also one of the sources of soil As, Cd, Pb, Cu, and Zn. The medium-heavy pollution of the soil in the study area was mainly caused by mining activities, while the heavy metal pollution of the soil caused by geological background was mainly light pollution. This study can provide a theoretical basis for the safe use of land and the prevention and control of soil pollution in typical regions.

Key words: soil heavy metals; geostatistics; receptor model; source analysis; pollution assessment

随着社会经济的发展,环境问题日益加剧,文献[1~3]的结果显示,土壤中重金属元素超标问题突出,镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌及镍元素点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9% 及 4.8%,尤其是我国主要工业基地及西南重金属高背景区。土壤中重金属元素潜伏性强、不可降解,可以通过土壤-作物-人体系统不断在人体中积累,其造成的生态环境效应复杂多变^[4~8]。如何对土壤中重金属的污染风险进行评估并解析其来源是有

效治理土壤重金属污染的关键^[9,10]。

将传统的土壤污染评价方法与地统计法结合可实现重金属污染的空间可视化,有助于直观地了解区域土壤重金属污染现状^[11,12]。内梅罗指数法同时

收稿日期: 2020-03-16; 修订日期: 2020-04-13

基金项目: 中国地质调查局成都地质调查中心地调科研项目 (WT[2017]-087); 重庆市规划和自然资源局项目 (渝国土房管[2017]631-9 号)

作者简介: 王锐 (1994~), 男, 硕士, 主要研究方向为生态地球化学, E-mail: 1372661182@qq.com

* 通信作者, E-mail: 14408887@qq.com

考虑了单因子污染指数的平均值以及最大值,是当前国内外进行环境质量综合污染评估最常用的方法之一^[13].指示克里格法能给出单一变量超过或低于某规定阈值的风险概率,对重金属元素污染评价具有较好的应用前景^[14,15].主成分分析法(PCA)是一种对数据进行降维,进而了解各元素之间关系,根据各元素的组合特征及相关关系定性解释元素来源的常用方法^[16].主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型是基于主成分分析法(PCA)发展而来的,可用于元素来源的定量分析,因此该模型被广泛应用于各类介质元素源解析研究中^[17-19].

酉阳县位于重庆市东南部,属于典型的岩溶地区,土壤中重金属元素含量较高,此外,酉阳矿产资源丰富,汞、磷、硫、钾、煤、铁、铜、锰、莹石、铝土及重晶石等地下矿藏遍布全境,其中汞矿被誉为全国“五朵金花”之一,莹石及重晶石蕴藏量达160万t以上,硫铁矿储量880万t,大理石总储量4亿m³.已有研究表明,长期的矿业活动会对土壤、农作物安全及人体健康造成较大的影响^[20,21],但目前有关酉阳县土壤污染状况及元素来源的研究鲜见报道,为了探究矿业活动及地质背景对土壤环境的影响,选择在重庆市酉阳县开展土壤重金属污染评估及元素来源研究,以期对典型区域土地安全利用及土壤污染防治提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

酉阳县全称酉阳土家族苗族自治县,位于重庆市东南部,地处武陵山区腹地,是渝鄂湘黔四省市结合部,东邻湖南省龙山县,南与重庆市秀山县、贵州省松桃和印江县接壤,西与贵州沿河县隔江(乌江)相望,西北与重庆市彭水县相邻,正北与重庆市黔江区、湖北省咸丰、来凤县相连.酉阳县属亚热带湿润季风气候区,海拔高差大,地形性气候独特,全年雨量充沛,冬暖夏凉,空气清新,四季宜人,年平均气温由海拔280 m的17℃递减到中山区的11.8℃.月平均气温1月最冷为3.8℃,7月最高为24.5℃.年降雨量一般在1000~1500 mm.酉阳县位于扬子区黔北渝南地层分区之思南-酉阳地层小区,地层有白垩系、三叠系、二叠系、志留系、奥陶系、寒武系、震旦系和青白口系等.

1.2 样品采集与测试

本次研究按照行业技术标准《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)^[22],网格化采集农用地表层土壤样,采样密度为1点·km⁻²,采样深度0~20 cm,在采样中心点周围100 m范围内3~5处多点

采集组合,共采集表层土壤单点样624件.待土壤样品风干、干燥后敲碎,过0.8 mm(20目)粒级尼龙筛,将4 km²大格内样品等重量组合为一个分析样,组合分析样156件,分析组合样分布位置见图1.

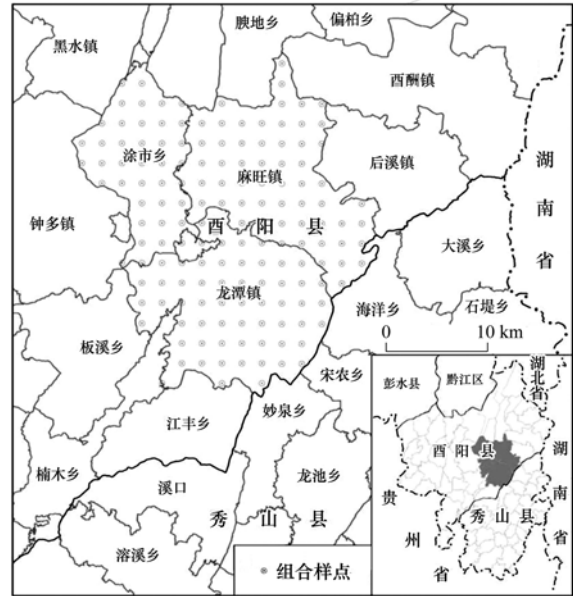


图1 组合样点位示意

Fig. 1 Combined sample points

土壤样品在自然条件下阴干.在样品干燥过程中要经常揉搓样品,以免胶结,并去除土壤中的砾石以及植物根系.干燥后的样品在过筛前用木槌轻轻敲打,以便使土壤样品恢复至自然粒级状态.样品晾干后用尼龙筛,截取2 mm(10目)粒级的样品500 g,装瓶.土壤样品分析测试由国土资源部成都矿产资源监督检测中心完成.

土壤样品测试质量控制:测试单位在样品分析测试过程中通过一级标准物质和样品重复样分析的方法来控制测试数据的质量.此外,工作人员在处理并分装好的样品中按照总样量的5%以密码样插入同类国家一级标准物质和重复样来进行分析对比,确保所测数据真实可靠.在土壤样品测定过程中采用国家标准物质(GBW):GSS-1、GSS-2、GSS-3、GSS-4、GSS-5、GSS-6、GSS-7、GSS-8、GSS-11、GSS-12、GSS-13、GSS-14及重复样全程监控测试分析的质量.以重复样分析结果评定本次分析精密度(RD),以密码插入的同类国家一级标准物质的测试结果检验本次分析的准确度(RE).其中:

$$RE = \frac{\Delta \lg C}{\lg C}(\text{GBW}) = |\lg \bar{C}_i - \lg C_r| \quad (1)$$

$$RD = \frac{\frac{1}{n} \sum |C_1 - C_2|}{(C_1 + C_2)/2} \times 100\% \quad (2)$$

式中, C_1 和 C_2 为常规测试及重复样的测试分析结果; C_i 为某标准样的某次测试结果, C_r 为该标准样

的标准值, n 表示每件国家标准物质重复分析的次数.

土壤样品的精密度和准确度计算见表 1. 均需符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[23] 的要求.

土壤样品分析及检出限见表 2, 各分析方法的检出限均符合文献[23]的要求.

表 1 土壤中各元素分析测试的精密度 (RD) 和准确度 (RE) 质量监控¹⁾

Table 1 Precision (RD) and accuracy (RE) quality monitoring for analysis of each element in soil					
指标	m	RE/%	指标	n	RD/%
Cr	12	2.1	Cr	40	1.20
Pb	12	1.6	Pb	40	1.16
Zn	12	1.3	Zn	40	0.12
As	12	1.4	As	40	0.41
Hg	12	1.2	Hg	40	1.66
Cu	12	2.5	Cu	40	1.13
Ni	12	0.8	Ni	40	1.65
Cd	12	1.2	Cd	40	0.03
pH	12	0.9	pH	40	0.36

1) m 表示国家标准物质的件数, n 表示同公式 (2)

表 2 元素分析方法与检出限¹⁾

Table 2 Element analysis methods and detection limit		
指标	测定方法	检出限
Cr	X 射线荧光光谱法	3
Pb	X 射线荧光光谱法	2
Zn	X 射线荧光光谱法	1
As	原子荧光光谱法	0.2
Hg	原子荧光光谱法	0.000 5
Cu	等离子体发射光谱法	1
Ni	等离子体发射光谱法	1
Cd	等离子体发射光谱法	0.02
pH	pH 计电极法	0.10

1) 检出限单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 无量纲

数据处理方法: 数据整理利用 Excel 完成, 主成分分析及主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型的建立利用 SPSS Statistics 25 完成, 图件绘制利用 CorelDRAW18 及 ArcGIS 10.2 完成.

1.3 内梅罗指数法

单因子指数法是根据某一评价标准, 对土壤中单项重金属进行污染评价, 内梅罗指数法是基于单因子指数法而衍生出的综合性污染评价方法, 既考虑了单因子污染指数的平均值以及最大值, 又能突出多种污染物的综合作用, 是常用的土壤污染评价方法之一. 计算公式如下^[16]:

$$P_i = \frac{C_i}{C_n} \tag{3}$$

$$P = \sqrt{\frac{P_{iave}^2 + P_{imax}^2}{2}} \tag{4}$$

式中, P_i 为重金属 i 的污染指数; C_i 为重金属 i 的测试含量; C_n 为重金属 i 的评价标准, 由于土壤样品主要分布在农用地中, 因此采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618-2018)^[24] 给出的土壤重金属污染筛选值作为评价标准. P 为内梅罗指数; P_{iave} 为所有重金属污染指数的平均值; P_{imax} 为所有重金属污染指数中的最大值. 内梅罗指数土壤污染评价等级见表 3.

表 3 内梅罗指数土壤污染评价等级

Table 3 Nemero index soil pollution evaluation level		
等级	内梅罗污染指数	污染等级
1 级	$P \leq 0.7$	无污染
2 级	$0.7 < P \leq 1.0$	尚未污染 (警戒线)
3 级	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染
4 级	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染
5 级	$P > 3.0$	重度污染

1.4 主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型

主成分分析 (PCA) 是用少数几个因子去描述许多指标或因素之间的联系, 按照各指标间的关联度, 将其转化为少数的几个综合指标来反映整体的特点, 经常被用于各介质中元素的来源研究, 相关性显著的元素可能有同源性^[25]. 主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型是通过对传统的主成分分析 (PCA) 进行改进得来的用于元素来源定量分析的方法, 可以给出不同来源对同一元素的贡献率^[26]. 具体步骤如下^[17].

对原始数据进行标准化, 计算公式为:

$$Z_i = \frac{C_i - \bar{C}_i}{\sigma_i} \tag{5}$$

对各元素引入一个 0 浓度因子, 计算公式为:

$$Z_{i0} = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} \tag{6}$$

用 PCA 得到的归一化因子分数减去 0 浓度因子, 得到各元素的 APCS, 用各元素的实测浓度与 APCS 进行多元回归分析, 得到如下的回归方程:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{p=1}^p (b_{pi} \times \text{APCS}_p) \tag{7}$$

式中, $\bar{C}_i$ 表示元素的平均含量, σ_i 表示元素含量的标准差, C_i 表示元素的实测浓度, b_{i0} 为回归方程的常数项, b_{pi} 为源 p 对元素的回归系数, APCS_p 为调整后的因子 p 的分数, $b_{pi} \times \text{APCS}_p$ 表示源 p 对该元素浓度的贡献量, 所有样本的 $b_{pi} \times \text{APCS}_p$ 的平均值就表示了源平均绝对贡献量.

1.5 克里格法

普通克里格法以变异函数理论模型和结构分析为基础, 在局部区域内对区域变量进行无偏最优估

计,不仅考虑了距离远近的影响,还考虑了已知点的位置和属性值整体的空间分布和格局,该方法使估计误差的方差达到最小化,同时极大地减小了调查损失,是地统计学的主要插值方法之一^[27].本研究利用普通克里格法进行空间插值,以实现土壤污染的空间可视化.

指示克里格法是使用阈值来创建二进制数据(0或1,也称为指示值),然后对此指示数据使用普通克里格法进行插值,将区域变量转换为函数模型,可以给出超过某一阈值的概率^[28],经常被用于土壤污染评价中.

2 结果与分析

2.1 土壤中重金属及 pH 的描述性统计

统计研究区测试分析的 156 件土壤样品中重金属元素的含量及土壤 pH,参照文献[24]给出的不同土壤 pH 及土地利用类型的土壤重金属污染筛选值,计算重金属超标率,结果见表 4. 土壤中 Cd、Hg、As 及 Cu 的超标率分别为 60.18%、20.52%、5.12%及 1.28%,土壤中 Cd 及 Hg 的超标问题较突出. 土壤 Cd 及 Hg 的变异系数均大于 0.5,空间变异性较强,尤其是 Hg,变异系数高达 4.17,可能受到了人为活动的影响. 土壤 pH 的变化范围为 4.86~7.78,平均值为 6.09,参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[23]对土壤酸碱度的定义,利用 ArcGIS 中普通克里格法对土壤 pH 进行空间插值,结果见图 2,可以看出研究区土壤以酸性为主,而酸性土壤中,重金属 Cd 的生物有效性较高,易被农作物吸收^[29],应引起重视. 对于水田而言,土壤酸化及还原条件也可能会造成农作物 As 污染,而 Cr、Hg 及 Pb 由于其溶解性低、迁移能力弱,对农作物安全造成的影响相对较小,重金属 Cu、Zn 及 Ni 由于其对植物的毒性较高,因此,很难进入餐桌,对人体的危害相对较小^[30].

表 4 土壤中重金属元素含量及超标率¹⁾
Table 4 Contents of heavy metal elements in soil and exceeding standards

指标	最小值	最大值	平均值	变异系数	超标率/%
As	3.63	49.12	14.19	0.45	5.12
Cd	0.15	0.92	0.41	0.56	60.18
Cr	63.70	105.19	79.82	0.09	0
Cu	19.50	60.10	30.54	0.18	1.28
Hg	0.05	10.18	0.64	4.17	20.52
Ni	23.10	54.20	34.38	0.13	0
Pb	27.10	95.90	44.87	0.29	0
Zn	77.20	206.21	107.41	0.17	0
pH	4.86	7.78	6.09	0.13	—

1) 重金属元素含量的单位为mg·kg⁻¹, pH 无量纲

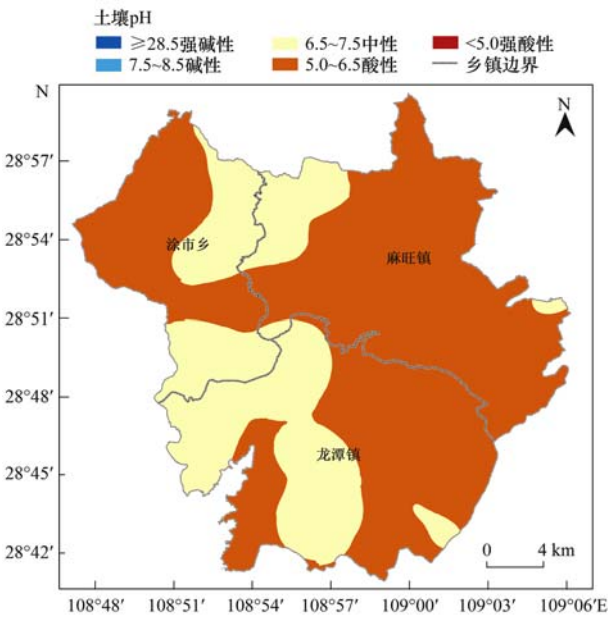


图 2 研究区土壤 pH 分级
Fig. 2 Hierarchy of soil pH in the study area

2.2 土壤重金属污染评估

利用单因子指数法对土壤中单项重金属元素进行污染评价,结果见图 3,可以看出,土壤 Cd 的污染程度较高,污染指数的范围为 0.40~3.06,平均值为 1.33,变异系数为 0.41,土壤 Hg 的污染指数存在较多的高异常值,其变化范围为 0.09~20.32,平均值为 1.26,变异系数高达 3.04,说明土壤 Cd 污染呈面状分布,而土壤 Hg 主要表现为点状污染. 利用内梅罗指数法进行土壤重金属污染综合评价,采用 ArcGIS 10.2 中普通克里格法将计算所得的内梅罗指数进行空间插值,统计不同污染等级在空间上所占的比例,结果见图 4 和图 5. 全区有 48.7%的地区为无污染和尚未污染,主要分布在龙潭镇东北部和麻旺镇东部及南部,中度和重度污染区主要分布在涂市乡、麻旺镇及龙潭镇三镇交界处,占全区总面积的 14.2%. 涂市乡和龙潭镇分布有大面积的轻度污染区.

利用指示克里格法对内梅罗指数进行插值,阈值设置为 2.0,即出现中-重度污染的概率,结果见图 6. 可以看出,研究区出现土壤中-重度污染的概率最大值为 1,高风险区主要集中在三镇交接处,此外涂市乡北部也有较高的土壤污染概率,应引起重视.

2.3 土壤重金属来源

利用 SPSS 25 软件对数据进行 KMO 检验,得到的统计量值为 0.699, Bartlett 球度检验相伴概率为 0.000,因此,数据可进行因子分析(PCA),分析结果见表 5. 对 Kaiser 标准化后的因子进行 Varimax 正交旋转,得到了两个特征值大于 1 的主成分,方差贡献率分别为 39.45% 及 29.31%,累计贡献率为

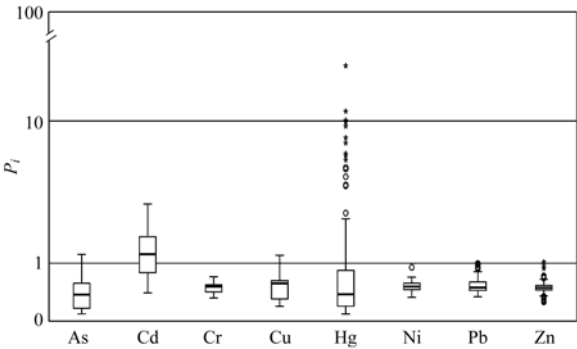


图 3 单因子指数法评价结果
Fig. 3 Evaluation results of single factor index method

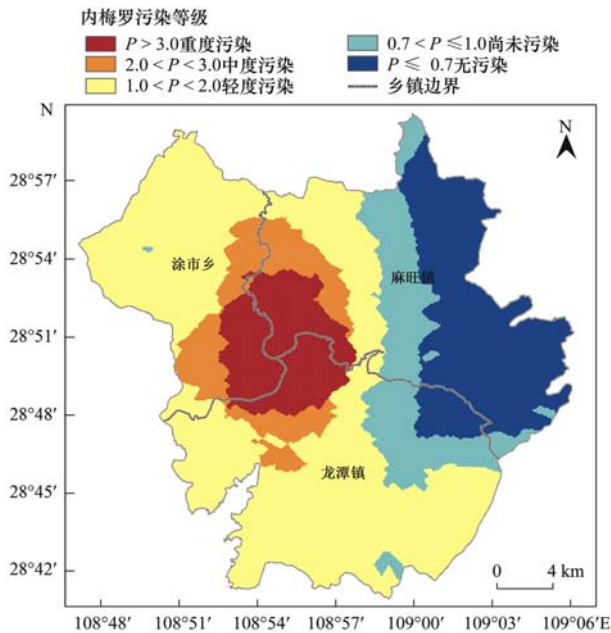


图 4 内梅罗指数法评价结果
Fig. 4 Evaluation results of the Nemerow index method

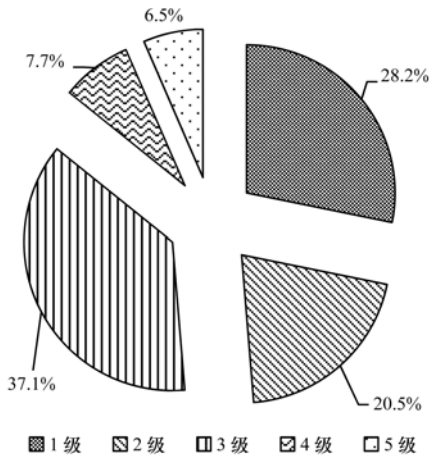


图 5 内梅罗指数法评价结果统计
Fig. 5 Statistics of the evaluation results of the Nemerow index method

68.76%,可解释土壤重金属元素的大部分信息.第一主成分(F1)载荷较高的重金属元素为As、Cd、Cr及Ni,第二主成分(F2)载荷较高的重金属元素为Cu、Hg、Pb及Zn.

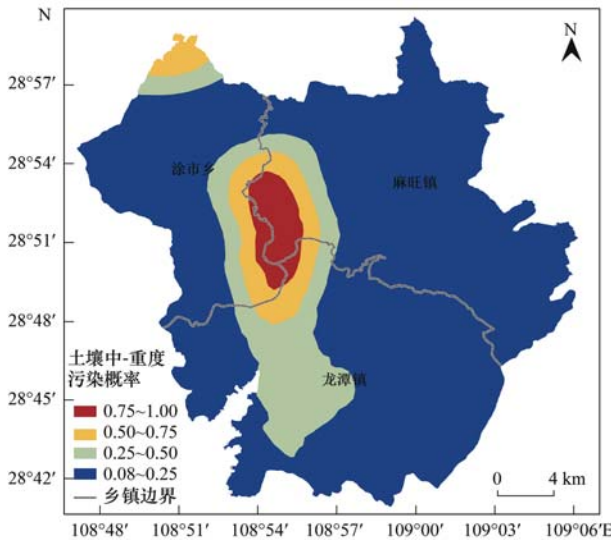


图 6 研究区土壤中-重度污染概率
Fig. 6 Probability of medium-severe pollution
in the soil of the study area

根据 1.5 节中给出的步骤,建立主成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型,结果见表 6. 根据各元素受体模型,分别计算主成分 F1 及 F2 对各元素的贡献量,统计结果见图 7. 可以看出,As、Cd、Cr 及 Ni 的来源主要受 F1 的控制,Hg、Pb 及 Zn 的来源主要受 F2 控制,F1 和 F2 对 Cu 的贡献率相差不大.此外,Cu、As、Cd、Pb 及 Zn 也受到一定程度的其他来源控制.

表 5 土壤重金属主成分分析矩阵
Table 5 Matrix analysis matrix of soil heavy metals

元素	F1	F2
As	0.907	-0.042
Cd	0.869	0.085
Cr	0.772	0.049
Cu	0.436	0.519
Hg	0.024	0.921
Ni	0.826	-0.094
Pb	-0.234	0.710
Zn	0.356	0.736
初始特征值	3.476	2.441
方差贡献率/%	39.45	29.31

表 6 成分分析/绝对主成分分数 (PCA/APCS) 受体模型
Table 6 Component analysis/absolute principal component
score (PCA/APCS) receptor model

元素	受体模型	Sig.	R
As	$C(As) = 0.812 + 7.176 \text{ APCS}_{F1} + 0.333 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.908
Cd	$C(Cd) = 0.019 + 0.174 \text{ APCS}_{F1} + 0.001 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.873
Cr	$C(Cr) = 9.322 + 5.420 \text{ APCS}_{F1} + 0.341 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.773
Cu	$C(Cu) = 2.425 + 4.015 \text{ APCS}_{F1} + 4.513 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.820
Hg	$C(Hg) = 0.021 + 0.002 \text{ APCS}_{F1} + 1.370 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.896
Ni	$C(Ni) = 0.027 + 4.230 \text{ APCS}_{F1} + 0.040 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.831
Pb	$C(Pb) = 2.110 + 0.445 \text{ APCS}_{F1} + 12.006 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.911
Zn	$C(Zn) = 5.569 + 0.428 \text{ APCS}_{F1} + 16.624 \text{ APCS}_{F2}$	0.000	0.817

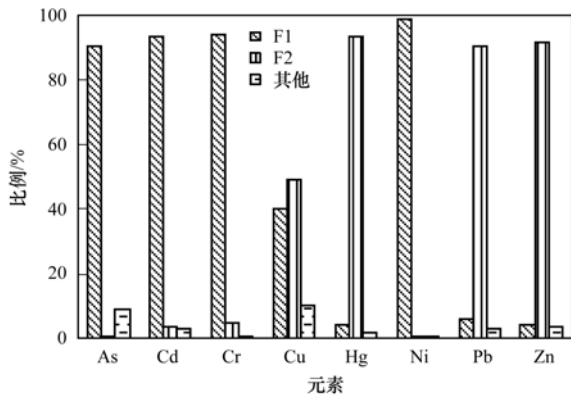


图7 土壤重金属元素来源统计结果

Fig. 7 Statistics results of sources of heavy metals in soil

3 讨论

图8为研究区地层分布,出露地层主要为泥盆系及以下地层,岩石类型主要为灰黑色、黑色炭质页岩及灰岩,属于典型的黑色岩系区^[31].已有研究表明黑色岩系多金属富集层富集V、Cr、Cu、Zn、As、Mo、Ag、Cd、Sb、Ba、Ni及U等元素^[32],由于灰岩易发生淋溶作用,表层土壤中黏土矿物含量较高,对岩石风化产物中的元素具有较强的富集作用^[25].因此,主成分F1所代表的As、Cd、Cr、Ni及Cu的来源可能受到地质背景的控制.对比图4给出的内梅罗指数法的评价结果发现,研究区轻度污染区主要分布在寒武系及志留系地层中,因此,高地质背景引起的土壤重金属污染多表现为轻度污染.

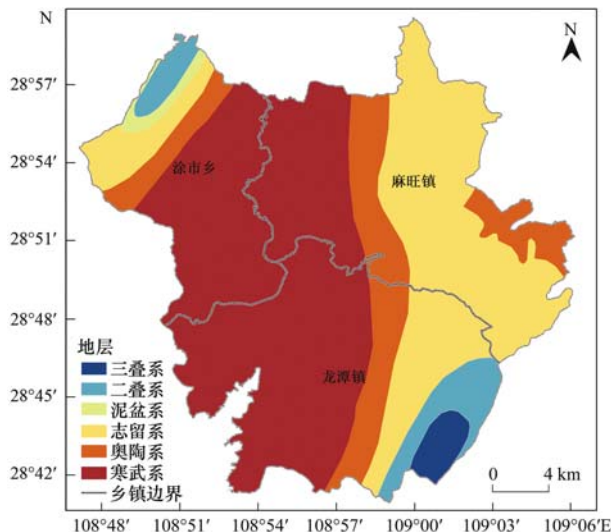


图8 研究区地层分布

Fig. 8 Strata distribution in the study area

图9为研究区矿产分布,研究区自北向南存在多个汞矿,矿区的空间位置与图4中-重度污染的分布区域基本吻合. Hg与Pb、Zn等元素的地球化学性质相似,且在成矿过程中密切伴生^[33,34],例如,贵州-湖南的汞矿带就存在铅锌矿^[35].涂市镇中部分

布有重晶石矿,研究表明重晶石中Cu、Zn及Pb富集,因此Cu、Zn及Pb的来源可能与重晶石-萤石矿的开采有关^[36].因此,Cu的来源同时受到地质背景和矿业活动的影响.与图4对比可以推测,矿业活动是造成研究区土壤中-重度污染的主要原因.

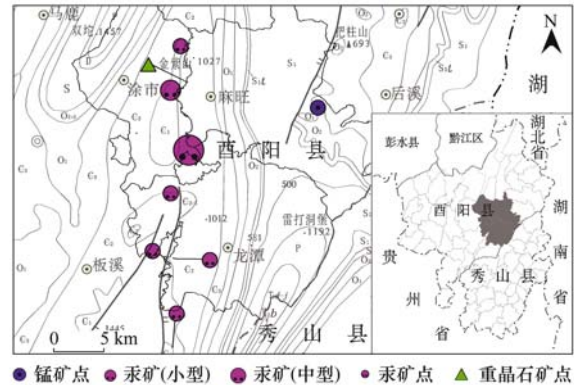


图9 研究区矿产分布示意

Fig. 9 Mineral distribution in the study area

图7显示,Cu、As、Cd、Pb及Zn也受到一定程度的其他来源控制,通过现场调查得知,在日常耕作过程中,经常利用禽畜粪便浇灌农田,Cu和Zn是列入我国饲料添加剂目录中允许使用的矿物元素,适当添加Cu和Zn等微量元素可提高猪的日增重和肥料的转化率^[37,38],而As对于畜类的生长也能够起到一些积极作用,例如可以改善猪的毛色并加快生长,故饲料中也会添加一定量的As元素^[39-41],已有研究表明,长期施肥会导致土壤中Cd、Pb、Cu和Zn等元素的积累^[42,43],而本研究的样品为农用地土壤样品,因此,农业活动可能是土壤As、Cd、Pb、Cu及Zn等元素的来源之一.

4 结论

(1)土壤元素含量描述性统计结果表明,土壤中Cd及Hg的超标问题较突出,超标率分别为60.18%及20.52%,变异系数分别为0.56及4.17,空间分异明显.研究区土壤以酸性为主,而酸性土壤中,重金属Cd的生物有效性较高,易造成农作物Cd超标,应引起重视.

(2)土壤重金属污染评价结果显示,研究区中度-重度污染主要分布在涂市乡、麻旺镇及龙潭镇三镇交界处,占全区总面积的14.2%,土壤重金属污染问题突出,单因子指数评级结果显示,土壤Cd污染呈面状分布,而土壤Hg主要表现为点状污染.指示克里格法评价结果显示,三镇交接处及涂市乡北部有较高的土壤污染概率.

(3)主成分分析/绝对主成分分数(PCA/APCS)受体模型分析结果显示,土壤As、Cd、Cr及Ni的来

源主要受到地质背景的控制;土壤 Hg 与 Pb、Zn 受到矿业活动的影响;土壤 Cu 同时受到地质背景和矿业活动的影响.此外,农业活动也是土壤 As、Cd、Pb、Cu 及 Zn 等元素来源之一.研究区土壤中-重度污染主要是由矿业活动引起的,而地质背景导致的土壤重金属污染主要为轻度污染.

参考文献:

- [1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(9): 1689-1692.
Chen N C, Zheng Y J, He X F, *et al.* Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(9): 1689-1692.
- [2] 杨璐,张智,李余杰,等. 西南地区典型农田土壤中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附特性研究[J]. 土壤通报, 2018, **49**(4): 985-992.
Yang L, Zhang Z, Li Y J, *et al.* Adsorption characteristics of Cd^{2+} and Pb^{2+} in typical agricultural soils in the southwest of China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, **49**(4): 985-992.
- [3] 宋波,王佛鹏,周浪,等. 广西高镉异常区水田土壤 Cd 含量特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2443-2452.
Song B, Wang F P, Zhou L, *et al.* Cd content characteristics and ecological risk assessment of paddy soil in high cadmium anomaly area of Guangxi[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2443-2452.
- [4] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao zinc plant in China via consumption of vegetables[J]. Science of the Total Environment, 2007, **383**(1-3): 81-89.
- [5] Jallad K N. Heavy metal exposure from ingesting rice and its related potential hazardous health risks to humans[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(20): 15449-15458.
- [6] Lei M, Tie B Q, Song Z G, *et al.* Heavy metal pollution and potential health risk assessment of white rice around mine areas in Hunan Province, China[J]. Food Security, 2015, **7**(1): 45-54.
- [7] Yuan G L, Sun T H, Han P, *et al.* Source identification and ecological risk assessment of heavy metals in topsoil using environmental geochemical mapping: typical urban renewal area in Beijing, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, **136**: 40-47.
- [8] 王锐,张风雷,徐姝姝,等. 土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以 Cd 为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5082-5089.
Wang R, Zhang F L, Xu S S, *et al.* Method of dividing the value of soil heavy metal pollution risk screening: using Cd as an example[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5082-5089.
- [9] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(10): 1727-1736.
Fan T, Ye W L, Chen H Y, *et al.* Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(10): 1727-1736.
- [10] 吴志能,谢苗苗,王莹莹. 我国复合污染土壤修复研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2250-2259.
Wu Z N, Xie M M, Wang Y Y. Remediation of soils with combined pollution in China: a review[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(12): 2250-2259.
- [11] 宋金茜,朱权,姜小三,等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例[J]. 土壤学报, 2017, **54**(1): 81-91.
Song J X, Zhu G, Jiang X S, *et al.* GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils—a case study of Baguazhou, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, **54**(1): 81-91.
- [12] 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.
- [13] 韩术鑫,王利红,赵长盛. 内梅罗指数法在环境质量评价中的适用性与修正原则[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(10): 2153-2160.
Han S X, Wang L H, Zhao C S. Applicability and modifications of the Nemerow index method in evaluating environmental quality[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, **36**(10): 2153-2160.
- [14] 马宏宏,余涛,杨忠芳,等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4684-4693.
Ma H H, Yu T, Yang Z F, *et al.* Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas[J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- [15] Chu H J, Lin Y P, Jang C S, *et al.* Delineating the hazard zone of multiple soil pollutants by multivariate indicator Kriging and conditioned Latin hypercube sampling[J]. Geoderma, 2010, **158**(3-4): 242-251.
- [16] 杨安,王艺涵,胡健,等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 886-894.
Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 886-894.
- [17] 瞿明凯,李卫东,张传荣,等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 854-860.
Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(5): 854-860.
- [18] Ito K, Xue N, Thurston G. Spatial variation of $\text{PM}_{2.5}$ chemical species and source-apportioned mass concentrations in New York City[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(31): 5269-5282.
- [19] Song Y, Xie S D, Zhang Y H, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing using principal component analysis/absolute principal component scores and UNMIX[J]. Science of the Total Environment, 2006, **372**: 278-286.
- [20] 田美玲,钟雪梅,张云霞,等. 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[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2919-2926.
Tian M L, Zhong X M, Zhang Y X, *et al.* Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas[J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2919-2926.
- [21] Razo I, Carrizales L, Castro J, *et al.* Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, **152**(1-4): 129-152.
- [22] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].

- [23] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [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] 余涛, 杨忠芳, 王锐, 等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. 土壤, 2018, **50**(6): 1119-1125.
Yu T, Yang Z F, Wang R, *et al.* Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. Soils, 2018, **50**(6): 1119-1125.
- [26] 廖书林, 郎印海, 王延松, 等. 辽河口湿地表层土壤中PAHs的源解析研究[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(3): 490-497.
Liao S L, Lang Y H, Wang Y S, *et al.* Source apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the topsoil of Liaohu estuarine wetlands[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(3): 490-497.
- [27] 田雷, 董德明, 魏强, 等. 3种空间插值方法在道路尘中Pb监测数据统计处理中的应用比较[J]. 吉林大学学报(理学版), 2011, **49**(5): 964-968.
Tian L, Dong D M, Wei Q, *et al.* Comparison of three spatial interpolation methods for statistical processing of lead monitoring data in road dust[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2011, **49**(5): 964-968.
- [28] 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(8): 330-337.
Jiang F F, Sun D F, Li H, *et al.* Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(8): 330-337.
- [29] 王锐, 胡小兰, 张永文, 等. 重庆市主要农耕地土壤Cd生物有效性及影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1864-1870.
Wang R, Hu X L, Zhang Y W, *et al.* Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1864-1870.
- [30] 赵方杰, 谢婉滢, 汪鹏. 土壤与人体健康[J]. 土壤学报, 2020, **57**(1): 11-1.
Zhao F J, Xie W Y, Wang P. Soil and human health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(1): 1-11.
- [31] 温汉捷, 裴愉卓, 凌宏文, 等. 中国早古生代若干高硒黑色岩系中层状硅质岩的地球化学特征及其成因意义[J]. 沉积学报, 2003, **21**(4): 619-626.
Wen H J, Qiu Y Z, Ling H W, *et al.* Geochemistry and genesis of bedded cherts in some typical eopaleozoic high selenium black shales, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, **21**(4): 619-626.
- [32] 朱正杰, 朱长生, 程礼军, 等. 重庆城口地区下寒武统黑色岩系元素地球化学特征及其成因[J]. 矿物岩石, 2011, **31**(2): 66-72.
Zhu Z J, Zhu C S, Cheng L J, *et al.* Elemental characteristics of the lower Cambrian black rock series in Chengkou district, Chongqing and their genetic significances[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, **31**(2): 66-72.
- [33] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报, 2017, **48**(2): 474-480.
Zhan T L, Huang Y, Teng Y, *et al.* Pollution characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan mining areas, Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(2): 474-480.
- [34] 胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 等. 贵州万山汞矿周边土壤重金
- 属污染特征及风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(5): 879-885.
Hu G C, Zhang L J, Qi J Y, *et al.* Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area, Guizhou Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, **24**(5): 879-885.
- [35] 冯学仕. 大洞喇汞矿田中寻找(铅)锌矿的可能性探讨[J]. 贵州地质, 1995, **12**(3): 204-207.
Feng X S. A discussion on possibility of seeking for Pb-Zn deposits in the Dadongla mercury field, eastern Guizhou[J]. Guizhou Geology, 1995, **12**(3): 204-207.
- [36] 邹灏, 淡永, 张寿庭, 等. 重庆东南部彭水地区重晶石-萤石矿床的成矿物质来源探讨: 地球化学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2016, **40**(1): 71-85.
Zou H, Dan Y, Zhang S T, *et al.* Geochemical evidence for sources of ore-forming material of barite-fluorite deposits in Pengshui area, Southeast Chongqing[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, **40**(1): 71-85.
- [37] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 986-996.
Mu H Y, Zhuang Z, Li Y M, *et al.* Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 986-996.
- [38] 潘寻, 韩哲, 贾伟伟. 山东省规模化猪场猪粪及配合饲料中重金属含量研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(1): 160-165.
Pan X, Han Z, Ben W W. Heavy metal contents in pig manure and pig feeds from intensive pig farms in Shandong Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(1): 160-165.
- [39] Wang H, Dong Y H, Yang Y Y, *et al.* Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(12): 2435-2442.
- [40] 任顺荣, 邵玉翠, 王正祥. 利用畜禽废弃物生产的商品有机肥重金属含量分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(S1): 216-218.
Ren S R, Shao Y C, Wang Z X. Analyze on heavy metals content of merchandise compost produced by animal wastes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, **24**(S1): 216-218.
- [41] 王飞, 赵立欣, 沈玉君, 等. 华北地区畜禽粪便有机肥中重金属含量及溯源分析[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(19): 202-208.
Wang F, Zhao L X, Shen Y J, *et al.* Analysis of heavy metal contents and source tracing in organic fertilizer from livestock manure in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, **29**(19): 202-208.
- [42] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(1): 63-74.
Wang M, Li S T, Ma Y B, *et al.* Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(1): 63-74.
- [43] 陈同斌, 李艳霞, 金燕, 等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J]. 生态学报, 2002, **22**(5): 643-648.
Chen T B, Li Y X, Jin Y, *et al.* The effects of compound fertilizer made from municipal sewage sludge compost on N P K and heavy metals uptake of wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, **22**(5): 643-648.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area ("2+26" Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101 (Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvio-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)