

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域PM_{2.5}和臭氧复合污染气象影响评估..... 杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)

“2+26”城市PM_{2.5}与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析..... 吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)

武汉军运会前后大气PM_{2.5}化学组分和来源..... 刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)

2016~2020年邯郸市冬季PM_{2.5}污染特征与来源解析..... 牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)

渭南市冬季PM_{2.5}化学组成及来源解析..... 郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)

长三角城郊冬季PM_{2.5}中铵盐的形成过程及来源解析..... 项妍琨, 曹芳, 张雯淇, 范美益, 章炎麟 (6486)

上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析..... 杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)

吕梁市PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评估..... 车玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)

广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响..... 吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)

南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征..... 陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)

京津冀地区“煤改电”对PM_{2.5}污染的健康效益评估..... 张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)

基于化学损耗修正的青岛胶州市环境VOCs来源解析..... 孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)

聊城市城区夏季VOCs污染特征及来源解析..... 李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)

基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析..... 张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)

中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素..... 欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)

基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展..... 曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)

京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析..... 郝永佩, 宋晓伟, 朱晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)

中国水泥行业通过CCUS技术的减排潜力评估..... 魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)

钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估..... 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)

珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素..... 胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)

东莞市低碳路径下加速电气化对CO₂和污染物协同减排影响..... 吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)

县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系..... 刘贤赵, 李阳 (6664)

城市草坪温室气体排放特征及影响因素..... 陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)

双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应..... 刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)

中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估..... 赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)

黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险..... 彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)

黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价..... 王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)

土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响..... 温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)

内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价..... 王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)

锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系..... 孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷杰 (6754)

西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素..... 艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)

巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价..... 刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)

亚硫酸氢盐强化微量Fe²⁺活化过二硫酸盐降解扑热息痛..... 莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)

污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星..... 郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)

NaHCO₃活化荞麦皮生物炭对碘酚的吸附..... 魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)

竹基N、P共掺杂活性炭的制备及其锂离子吸附性能..... 王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)

西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析..... 赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞思, 唐颖, 李鹏 (6833)

生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析..... 孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)

农田土壤碳循环过程及其量化方法..... 孙昭安, 朱彪 (6857)

生物炭施用5a后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响..... 牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霖, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)

喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征..... 蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)

中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估..... 陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)

基于MGWR的土壤pH值空间建模及其影响因素分析..... 赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)

某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析..... 张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)

重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析..... 张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)

高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征..... 陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)

有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响..... 邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)

有机肥处理对旱地土壤细菌群落及玉米生产力的影响..... 林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)

微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响..... 段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)

设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响..... 赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)

3种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系..... 李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)

河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构..... 刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)

玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析..... 汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)

外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染..... 王楷, 王丽, 王一钰, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)

1株肠杆菌与硫酸联合施用对水稻积累镉的影响..... 张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)

《环境科学》第44卷(2023年)总目录..... (7045)

《环境科学》征订启事(6507) 《环境科学》征稿简则(6620) 信息(6743, 6846, 6856)

某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析

张军^{1,2}, 李旭¹, 刘磊玉¹, 李雨茹¹

(1. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710064)

摘要: 为探究某燃煤电厂污染物排放中重金属对周边农田土壤环境的影响, 采用辐射环形法, 以电厂烟囱为中心, 布设 31 个农田土壤采样点. 使用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 测定土壤中 10 种重金属含量, 分析土壤中重金属含量特征及潜在生态风险, 基于地统计空间插值和 AERMOD 扩散模型对重金属空间分异情况和污染特征进行探究, 并运用 PMF 受体模型对重金属进行源解析. 结果表明: ①燃煤电厂周边农田土壤重金属 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Mn})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Co})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{Cd})$ 的平均值分别为 414.46、286.38、155.22、69.54、55.77、53.48、31.73、19.86、0.78 和 0.71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 Hg、Pb、Cd、As、Zn、Cu、Co、Cr 和 Ni 的含量均超过陕西省土壤背景值, 分别为背景值的 26、19.36、7.88、2.83、2.23、2.49、1.87、1.11 和 1.93 倍, 元素 Cd、Cr、Ni 和 Zn 的高值区出现在电厂西北方向. ②燃煤电厂周边农田土壤重金属潜在生态风险指数 (RI) 的均值为 714.53, 整体处于很强的生态风险水平, 并在千河火车站、石油天然气公司附近出现高值富集区, Hg 元素的单项潜在生态风险指数 (E_i) 为 520.92, 处于极强的生态风险水平. ③燃煤电厂周边农田土壤重金属主要来源为煤炭燃烧的降尘源 (32.16%)、工农业活动源 (19.78%)、自然源 (26.25%) 和交通源 (21.81%). 土壤重金属含量较高值均分布在距电厂 1~2 km 范围内, 重金属含量在距离电厂 1 km 范围内较小, 在 1~2 km 范围逐渐增大, 大于 2 km 后又呈逐渐减小趋势. 研究得出的电厂周边农田土壤重金属空间分异情况及富集特征, 可为开展土壤污染治理提供理论及数据支撑.

关键词: 燃煤电厂; 土壤; 重金属; 生态风险; PMF 模型

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6921-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202212105

Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant

ZHANG Jun^{1,2}, LI Xu¹, LIU Lei-yu¹, LI Yu-ru¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To explore the impact of heavy metals in pollutant emissions from a coal-fired power plant on the soil environment of surrounding farmland, 31 farmland soil sampling sites were set up with the chimney of the power plant as the center using the radiation ring method. The contents of 10 heavy metals in the soil were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The characteristics and potential ecological risks of heavy metals in the soil were analyzed. The spatial differentiation and pollution characteristics of heavy metals were investigated based on geostatistical spatial interpolation and an AERMOD diffusion model, and the source analysis of heavy metals was conducted using a PMF receptor model. The results showed that: ① the mean contents of the heavy metals $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Mn})$, $\omega(\text{Zn})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Ni})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{As})$, $\omega(\text{Co})$, $\omega(\text{Hg})$, and $\omega(\text{Cd})$ in farmland around coal-fired power plants were 414.46, 286.38, 155.22, 69.54, 55.77, 53.48, 31.73, 19.86, 0.78, and 0.71 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The contents of Hg, Pb, Cd, As, Zn, and Cu all exceeded the background values of Shaanxi Province by 26, 19.36, 7.88, 2.83, 2.23, 2.49, 1.87, 1.11, and 1.93 times, respectively. ② The mean value of the potential ecological risk index (RI) of heavy metals in the soil around the coal-fired power plant was 714.53, indicating a strong ecological risk level, and there were high-value rich areas near the Qianhe railway station and the oil and gas company. The single potential ecological risk index (E_i) of the Hg element was 520.92, which was at a very strong ecological risk level. ③ The main sources of heavy metals in the soil around the coal-fired power plant were dust removal sources from coal burning (32.16%), industrial and agricultural activities (19.78%), natural sources (26.25%), and traffic sources (21.81%). The high heavy metal content in the soil was distributed in the range of 1-2 km from the power plant, whereas the heavy metal content was low in the range of 1 km from the power plant, increasing gradually in the range of 1-2 km and then decreasing gradually when it was greater than 2 km. The spatial differentiation and enrichment characteristics of heavy metals in farmland around the power plant obtained in this study can provide theoretical and data support for soil pollution control.

Key words: coal power plant; soil; heavy metals; ecological risk; PMF model

燃煤发电在中国工业化和城市化进程中发挥着重要作用^[1], 截至 2020 年 11 月我国燃煤发电装机总量达 10.7 亿 kW^[2]. 但随着燃煤污染和民众环保意识的增强, 燃煤电厂运行过程中产生的重金属污染物越来越引起关注^[3]. 以上重金属污染物通过降水溶解、大气沉降和废水灌溉等途径进入土壤表层^[4], 造成土壤有机质破坏、肥力减弱和农作物减

产, 并最终通过吸入、摄入和皮肤接触等途径进入人体^[5], 危害人体健康. 因此, 准确判别燃煤电厂周

收稿日期: 2022-12-12; 修订日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771215); 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室(长安大学)开放基金项目(300102290504); 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室项目(20JS012)

作者简介: 张军(1974~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为区域重金属污染控制与风险评估, E-mail: zhangjun1190@126.com

边土壤重金属污染状况,开展高污染区域的有效治理,对维护生态环境和周边居民健康具有重要意义。

针对燃煤电厂周边土壤重金属污染,国内外学者在其污染特征^[6]、空间分布^[7]、风险评价^[8]及风向距离^[9~11]等方面开展了大量研究。罗成科等^[9]发现宁东基地燃煤电厂周围土壤 Hg 含量明显受主导风向影响; Wang 等^[10]发现广东韶关某燃煤电厂周围土壤中 As、Cd、Pb 和 Zn 在电厂主导风向上有大量累积;车凯等^[11]发现在主导风向的下风向,Pb、Hg 和 Cd 元素含量在距电厂 1~2 km 距离时达到最高,而后逐渐降低。而煤炭燃烧所产生的烟气污染物主要通过电厂烟筒排出,重金属从排出到降落到地面可能会受距离和风向等自然因素的影响^[12]。然而,由于燃煤降尘受到气象、地形、燃煤电厂烟筒高度、烟气最大排放速率和不同污染物扩散迁移规律不同等的影响,很难通过实地采样监测到降尘中不同重金属所能污染的范围。AERMOD 模型系统由美国环境保护署联合美国气象学会组建法规模式改善委员会(AERMIC)开发,采用了行星边界层理论和空气分散湍流结构的理论,主要包括有 AERMAP 地形处理模块、AERMET 气象预处理模块和 AERMOD 控制模块^[13]。该模型可基于大气边界层数据特征模拟点源和面源等排放出的污染物的空间浓度分布,对农村或城市地区、简单或复杂地形区污染物扩散模拟分析有较好适用性。AERMOD 模型基于当地的观测数据,在地形和气象条件稳定的前提下,可得出较为理想的预测结果^[14]。如刘旭^[15]和陈艳等^[16]借助 AERMOD 模型分析了医药聚集区和垃圾填埋场污染物扩散对环境的污染范围和空间分布。因此,本文在对燃煤电厂周边农田重金属空间分布规律进行分析的基础上,引入 AERMOD 大气扩散模型预测燃煤电厂降尘重金属扩散范围。将预测扩散范围与电厂周边重金属实测空间分布距离进行对比分析,从而对燃煤电厂降尘重金属扩散模式和污染范围提供理论依据。

此外,燃煤发电厂作为国家重要的电力来源,亦是主要的工业污染源之一。但由于城市周边环境复杂,重金属污染来源广泛,准确识别出重金属污染源便显得至关重要。目前对土壤重金属源解析的研究主要分为通过分析重金属之间的相互关联情况,对污染来源进行定性识别,主要为多元统计分析方法等^[17,18]。还有按照污染源类型,采用受体模型溯源,主要有 UNMIX 模型^[19]、源排放清单法^[20]、绝对主成分分析-多元线性回归^[21]、化学质量平衡^[22]和正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)^[23,24]等。然而,一些常规多元统计方法具有局

限性,只能定性识别主要污染物,其筛选出的综合因子与重金属污染源之间的关系常带有一定的主观性且难以区分出相似的污染源^[25]。而 PMF 模型主要利用协方差矩阵和相关矩阵对高维变量进行简化,从而得到几个综合因子和源贡献率。并具有不需要测量详细源成分谱、限定因子分解矩阵非负和对单个数据不确定性估计等特点,可有效弥补这一局限性^[26]。此外,由于地理信息系统和多元统计分析技术在揭示区域土壤重金属空间分布、识别其来源时具有空间分析的优势^[27],因此,本研究将 PMF 源解析量化数据与 GIS 相结合,空间化表达各污染源在空间上的贡献率。

本文对某燃煤电厂周边农田土壤 10 种重金属元素(Pb、Mn、Zn、Cr、Ni、Cu、As、Co、Hg 和 Cd)采用 ICP-MS 进行测定,借助 AERMOD 扩散模型,设定地形和气象等环境参数以及烟筒高度、烟气排放速率和烟气温度等电厂运行参数,模拟预测电厂降尘排放重金属污染物的最大浓度距离,将预测值与重金属实测值进行对比分析,揭示电厂降尘与土壤中不同距离、不同种类重金属之间的关系。并运用 PMF 方法与 GIS 相结合,对土壤重金属主要污染源、污染贡献量和空间分布规律进行探究,分析各污染源对土壤重金属空间分布规律的影响,以期为复杂城市地区农田土壤重金属污染防治提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该燃煤电厂位于宝鸡市千河工业园区,安装有 2 台燃煤机组,2009 年机组投入运营,是距离宝鸡城区最近的燃煤电厂。该电厂烟囱高 210 m,出口内径为 7.5 m。千河从该燃煤电厂旁流过,电厂两侧大约 2 km 处为黄土台塬。考虑河谷地形的影响,电厂周边盛行风向多为东南-西北风。研究区内分布有较多村庄与厂矿,电厂东北方向分布有张家崖村、千河镇政府、黄贺村和千河火车站等,西南方向分布有宋家庄、北坡村和底店村等村庄。在其东侧还有宝鸡睿智石油机械、宝鸡腾阳工贸和宝鸡巨龙商品混凝土等公司,北侧有宝鸡石羽节能、宝鸡得力隆纺织和石油天然气等公司。银昆高速从该燃煤电厂南侧通过,宝中线铁路经过该区域向南与陇海铁路交汇。

1.2 样品采集与测定

研究区及采样点见图 1(其中风向数值为风向频率坐标系),研究区域以燃煤电厂为中心,东北、西南两侧黄土台塬高度 600 m 为界,东南以宝中铁

路和千河高架桥为界. 结合当地地形情况, 考虑电厂周边盛行风为东南-西北风, 在距电厂 500、1 000、1 500 和 2 000 m 不同范围进行样品采集. 在不同田块布设采样点, 记录经纬度坐标, 于 2021 年 3 月 20 ~ 23 日采集 31 个土壤表层样品, 采样深度为 0 ~ 20 cm. 采用梅花型采样法从每个采样点周围 20 ~ 50 m 区域采集 5 个子样品利用随机混合的方法混合成一个样品(约 1.0 kg). 将土样充分混合后挑去石子、

根茎等杂质, 自然风干后研磨, 过 100 目尼龙筛, 过筛后的土壤样品每个称取 0.100 0 g. 采用 $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3\text{-HF-H}_2\text{O}_2$ 法进行消解, 使用 ICP-MS (NexION350X, PE, US) 测定 Pb、Mn、Zn、Cr、Ni、Cu、As、Co、Hg 和 Cd 的含量. 实验所用试剂均为优级纯. 分析过程以 GSS-25 为质量控制样, 回收率在 92% ~ 105% 之间, 相对标准偏差 (RSD) 小于 10%.

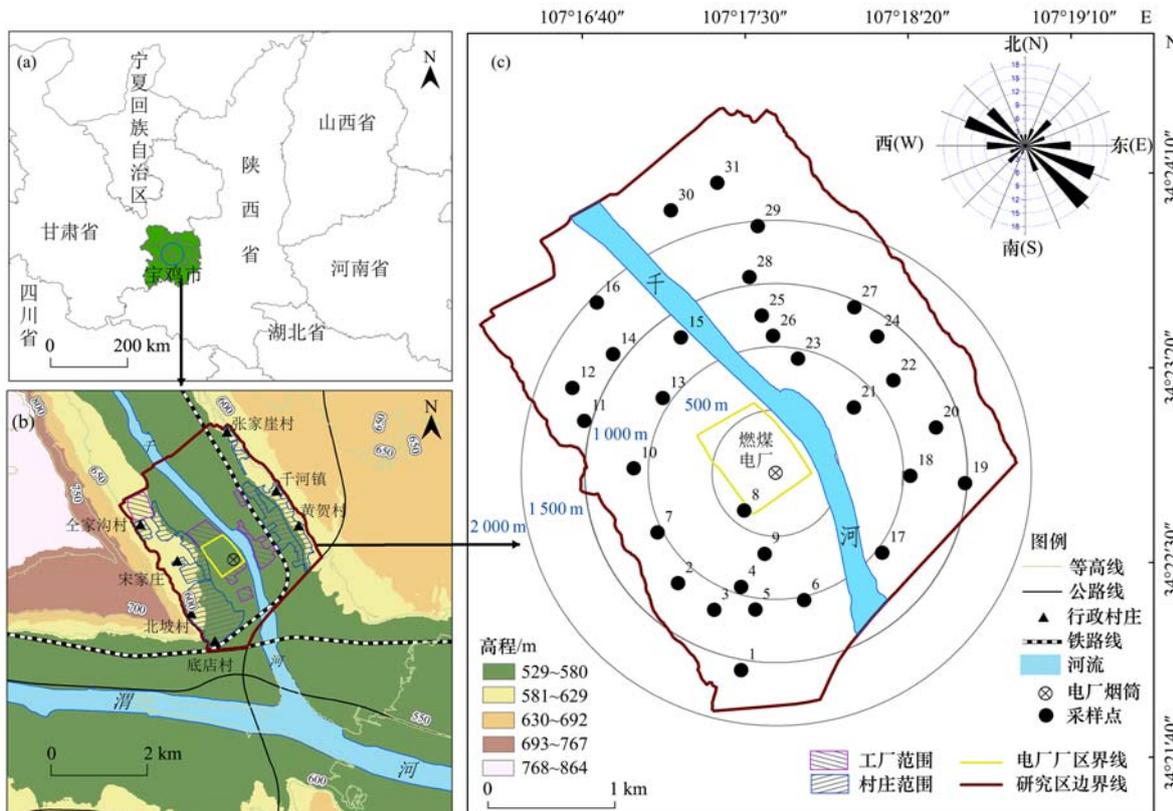


图 1 研究区及采样点示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

1.3 数据处理

采用 SPSS 23 进行数据统计分析; 源解析使用 EPA PMF 5.0 软件; 重金属含量空间分布图、生态风险评价图及源贡献率空间图制作使用 ArcGIS 10.8, 燃煤电厂污染物扩散分析使用大气环境影响评价系统 (AERMOD) 软件.

1.4 生态风险评价

为评估燃煤电厂周围重金属污染状况, 运用潜在生态风险指数评价其周围土壤的污染状况, 采用 Hakanson 提出的潜在生态风险分级评价标准^[28], 计算公式如下:

$$E_i = T_i F_i = T_i \frac{C_i}{B_i} \quad (1)$$

$$RI = \sum E_i \quad (2)$$

式中, i 为各重金属因子, E_i 为单一重金属风险因

子, T_i 为单一重金属毒性响应因子, T 值参照文献 [29]. F_i 为单一重金属污染因子, C_i 为样品重金属实际含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), B_i 为该地区重金属背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), RI 为重金属风险因子总和. 分级列表见表 1.

表 1 潜在生态风险等级划分标准¹⁾

Table 1 Classification criteria of potential ecological risks			
E_i	风险程度	RI	风险级别
$E_i < 40$	轻度	$RI < 150$	轻度
$40 \leq E_i < 80$	中度	$150 \leq RI < 300$	中度
$80 \leq E_i < 160$	较强	$300 \leq RI < 600$	较强
$160 \leq E_i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_i \geq 320$	极强	—	—

1) “—”表示无数据

1.5 PMF 受体模型

PMF 是受体模型的一种, 由 Paatero 等^[30] 在

1994 年提出,近年已被成功运用到大气和土壤等环境介质的重金属源解析中^[31].其原理是将原始数据矩阵分解成源贡献率矩阵、源成分谱矩阵和残差矩阵,计算公式如下:

$$E_{nm} = X_{nm} - \sum_{j=1}^p G_{np} F_{mp} \quad (3)$$

式中, X_{nm} 为 n 个样品中有 m 个化学成分; p 为解析出的源个数; G_{np} 为源贡献率矩阵; F_{mp} 为源成分谱矩阵.

PMF 结果合理性的判断标准是目标矩阵 Q 的值最小:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (E_{ij}/\sigma_{ij})^2 \quad (4)$$

式中, E_{ij} 为第 j 个样品中第 i 个化学成分的残差, σ_{ij} 为第 j 个样品中第 i 个化学成分的不确定度,不确定度的计算公式如下.

对于样品含量 \leq MDL 的数据:

$$U = (5/6) \times \text{MDL} \quad (5)$$

对于样品含量 $>$ MDL 的数据:

$$U = \sqrt{(s \times C)^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (6)$$

式中, U 为不确定度, s 为误差百分数, C 为指标含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); MDL 为检出限含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 各重金属的 MDL 取值如下: $\omega(\text{Zn}) = 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Cu}) = 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Cr}) = 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Pb}) = 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Hg}) = 0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{As}) = 0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Cd}) = 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Mn}) = 0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Ni}) = 0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\omega(\text{Co}) = 0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.6 AERMOD 模型

AERMOD 模型是采用高斯扩散公式建立起来

的稳定状态烟羽模型,可以模拟建筑物下洗和干湿沉降,是《大气技术导则》推荐模型之一,适用于局地尺度 ($\leq 50 \text{ km}$) 一次污染物、二次污染物 $\text{PM}_{2.5}$ (系数法) 的预测. AERMOD 模型也是实际大气预测中使用最广泛的模型,适用于绝大多数类型的工业源^[13,14]. 本文利用 AERMOD 模型来模拟预测电厂污染源降尘排放重金属中 Hg 元素污染物的最大浓度距离. 污染物浓度标准按照 Hg 及其化合物的排放标准 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 输入; 电厂参数设置为烟囱高度 210 m , 出口内径 7.5 m , 烟气排放速率为 $287 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 烟气温度 573 K , 环境温度 293 K ; 污染类型设置为点源污染, 地表特征参数选择耕地, 地形为导入的研究区高程地形数据, 风向为导入的盛行风数据.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属描述性统计分析

燃煤电厂周边农田土壤重金属的描述性统计见表 2. 电厂周围土壤 pH 平均值为 7.29, 范围是 7.0 ~ 7.5. 除 Cd、Pb 和 As 元素外, 其余元素平均值均未超过《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 的筛选值. 元素 Pb、Zn、Cu、As、Hg、Cd、Co、Cr 和 Ni 的均值都超过了陕西省土壤背景值, 分别是背景值的 19.36、2.23、2.49、2.83、26、7.88、1.87、1.11 和 1.93 倍, Hg 和 Pb 为超出背景值最多的元素. 并且除 Mn 外, 其余各元素的最大值都超过了陕西省土壤背景值, 说明研究区土壤重金属聚集明显. 10 种土壤重金属元素的变异系数均在 0.22 ~ 0.57 之间, 属于中等程度的变异, 表明研究区土壤存在人为活动造成的影响^[32].

表 2 土壤重金属含量描述性统计¹⁾

Table 2 Descriptive statistics of soil physical and chemical properties and heavy metal

元素	最小值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数	陕西省土壤背景值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	GB 15618-2018 筛选值 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
As	7.28	57.19	31.73	0.36	11.2	30
Cd	0.38	1.31	0.71	0.32	0.09	0.3
Co	12.05	30.11	19.86	0.23	10.6	—
Cr	31.46	132.47	69.54	0.36	62.5	200
Cu	24.15	111.03	53.48	0.37	21.4	100
Hg	0.09	1.97	0.78	0.57	0.03	2.4
Mn	134.35	486.52	286.38	0.33	557	—
Ni	38.07	89.36	55.77	0.22	28.8	100
Pb	259.86	600.42	414.46	0.24	21.4	120
Zn	84.46	434.1	155.22	0.44	69.4	250

1) “—”表示相关标准无数据

2.2 土壤重金属空间分布特征

对研究区 10 种表层土壤重金属含量进行反距离权重插值, 如图 2 所示. 总体来看, 研究区各重金

属含量空间分布比较集中. 在空间上, 元素 Cd、Cr、Ni 和 Zn 高值区分布基本一致, 都出现在电厂西北方向, 而在其他区域无明显的高值区. 元素 As、Co、

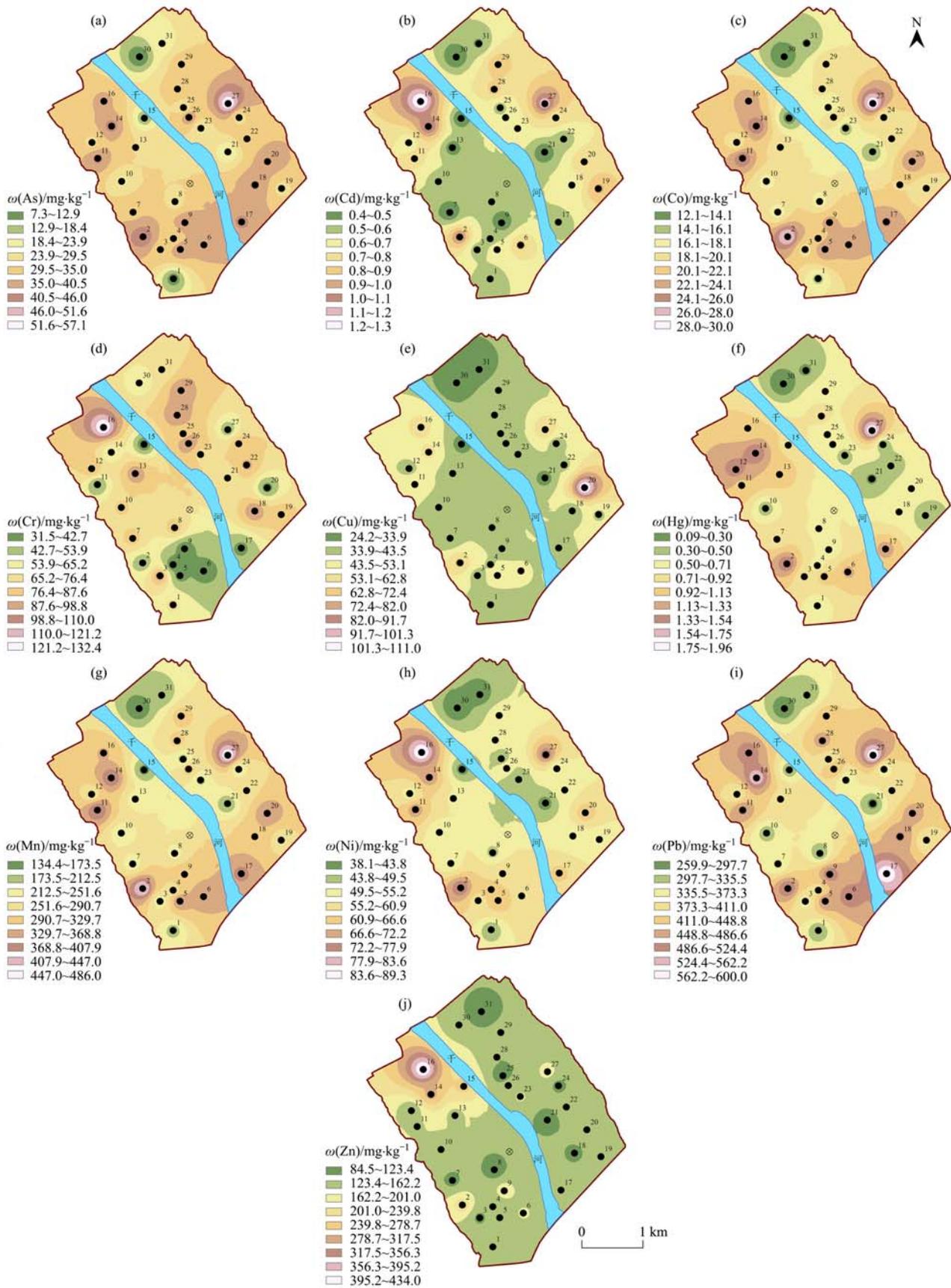


图2 土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in soil

Hg、Mn 和 Pb 在电厂东北方向的 27 点位都有高值分布,其中 Pb 元素的分布特征与其他元素相比差别

较大,在研究区内出现多个高值区域. Cu 元素高值出现在 20 点位附近,其他区域空间变化较为平缓.

2.3 土壤重金属生态风险评价

重金属潜在生态风险指数 (RI) 及空间分布见图 3, RI 的均值为 714.53, 表明燃煤电厂周围土壤重金属污染的潜在生态风险整体处于很强水平. 而单一元素的平均潜在生态风险系数大小为: Hg (520.92) > Cd (113.92) > Pb (48.41) > As (14.16) > Cu (5.08) > Ni (4.84) > Co (4.68) > Zn (1.12) > Cr (1.11) > Mn (0.26), 对比表 1, As、Cu、Ni、Co、Zn、Cr 和 Mn 元素总体上是轻度潜在生态风险, Pb 元素为中度潜在生态风险, Cd 元素为较强潜在生态风险, Hg 元素的潜在生态风险系数为极强风险程度且 Hg 元素生态风险占比为 70.97%, 说明研究区主要潜在生态风险元素是 Hg 和 Cd. 由图 3 可以看出, 研究区出现多个 RI 高值区域, 且主要集中在研究区东北及西北地区.

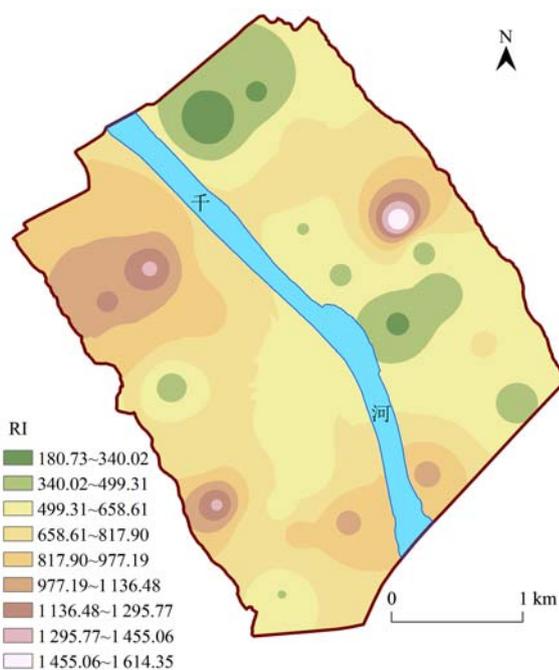


图 3 土壤重金属 RI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of RI of soil heavy metals

2.4 土壤重金属源解析

使用 PMF 模型解析的各源成分谱及其贡献率见表 3, 当因子数设置为 4 时得到了目标矩阵 Q 的最小值, 重金属 As、Co、Cr、Mn、Ni 和 Zn 的拟合系数均达到了 0.9 以上, 预测值与实测值之比接近于 1, PMF 模型整体拟合效果好, 所选因子能够准确解释原始数据信息. 根据源成分谱可计算出因子 1 的贡献率为 32.16%, 因子 2 的贡献率为 19.78%, 因子 3 的贡献率为 26.25%, 因子 4 的贡献率为 21.81%.

因子 1 中主要载荷元素为 Hg、As、Mn、Co 和 Pb, 其中 Hg 在因子 1 中的贡献率为 47.05%, 其次是 As 为 46.75%. 王帅等^[33]研究表明燃煤等化石燃料燃烧是 Hg 的主要来源, 容易在煤炭燃烧后形成. 而 Co 元素在燃煤电厂释放的产物中含量也较高^[34]. 煤炭燃烧还会产生 As 和 Pb 等易挥发的重金属元素, 其在因子 1 中的贡献率分别达到了 46.75% 和 35.36%. 而 Ni 元素在因子 1 中贡献率为 30.45%, 且 Ni 元素在土壤中主要受控于地质背景^[35], 因此, 因子 1 被判定为煤炭燃烧的降尘源.

因子 2 的主要载荷元素为 Cd、Cr、Cu 和 Zn, 其中 Cd 在因子 2 中的贡献率最高, 为 34.57%; 有学者研究表明^[36], Cd 一方面主要来自于工业排放和工矿企业生产, 另一方面农业生产活动中使用的肥料和农药中也通常含有 Cd 和 Zn 等元素^[37]. 本次试验样品也都是在电厂周边农田土壤中采集, 可能也是造成 Cd 贡献率最高的重要原因. 此外 Cr 元素在因子 2 中的贡献率也较高, 结合图 2 来看, Cr 元素高值区主要分布在厂矿附近, 可能导致 Cr 元素贡献率在因子 2 中总体较大. 结合研究区经济发展情况来看, 因子 2 被判定为工农业活动源.

因子 3 的主要载荷元素为 Cr、As 和 Co, Cr 在因子 3 中的贡献率达到了 53.81%. 对照表 2, Cr 的平均含量值没有超过 (GB15618-2018) 筛选值, 且因

表 3 PMF 模型解析的各源成分谱及其贡献率

Table 3 Component spectrum and contribution rate of PMF model

元素	测定值与模拟值线性关系		源成分谱/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$				源贡献率/%			
	预测值/实测值	R^2	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4
As	0.98	0.98	7.39	2.18×10^{-6}	6.21	2.21	46.75	1.38×10^{-5}	39.26	13.99
Cd	0.57	0.86	0.09	0.12	0.09	0.04	26.59	34.57	27.26	11.57
Co	1.07	0.96	3.67	2.17	2.9	1.22	36.85	21.77	29.16	12.22
Cr	1.00	0.99	4.27×10^{-7}	13.06	18.73	3.02	1.23×10^{-6}	34.52	53.81	8.68
Cu	0.46	0.56	6.79	5.5	5.45	2.96	32.81	26.55	26.33	14.32
Hg	0.51	0.56	0.19	0.04	0.08	0.09	47.05	10.98	19.56	22.41
Mn	0.94	0.97	62.49	20.14	41.33	17.93	44.04	14.19	29.13	12.64
Ni	0.97	0.9	8.43	7.18	7.24	4.84	30.45	25.94	26.13	17.49
Pb	0.97	0.87	72.62	37.42	58.27	37.06	35.36	18.22	28.37	18.05
Zn	0.98	0.99	10.22	20.09	1.82×10^{-7}	47.18	13.19	25.92	2.34×10^{-7}	60.89

因子3对各重金属元素均有一定的贡献率. Liang 等^[38]在研究中发现 Cr 和 Ni 的空间变异性较低且主要来源于成土母质,邓红艳等^[39]研究指出土壤 Cr 含量依赖于成土母质. 因此,因子3被判定为自然源.

因子4的主要载荷元素为 Zn (60.89%)、Hg (22.41%) 和 Pb (18.05%), Zn 和 Pb 具有一定的同源特性,是工业“三废”污染物排放的典型元素. 有学者研究表明^[40,41],交通运输活动中的轮胎磨损、机动车尾气排放和汽油添加剂的使用,会加剧土壤 Zn 和 Pb 的富集,并使 Pb 元素高于背景值较多. Yang 等^[42]研究表明在道路两旁的尘土中通常含有较高浓度的 Zn,通过大气沉降作用进入土壤. 因此,

因子4被判定为交通源.

利用 ArcGIS 将 4 个因子的贡献率空间化(图 4). 因子1(煤炭燃烧的降尘源)贡献率高值区主要在燃煤电厂的南部以及两侧台源地附近; 因子2(工农业活动源)贡献率整体分布较为均匀,贡献率高值区主要分布在距离燃煤电厂较远的边缘地区; 因子3(自然源)贡献率高值区主要在燃煤电厂以北及东部地区; 因子4(交通源)贡献率高值区主要在燃煤电厂的西北部中国石油天然气股份有限公司附近,此外,在银昆高速过千河桥,千河东部千河镇、宝冯公路以及燃煤电厂南侧底县路附近也存在少量高值区.

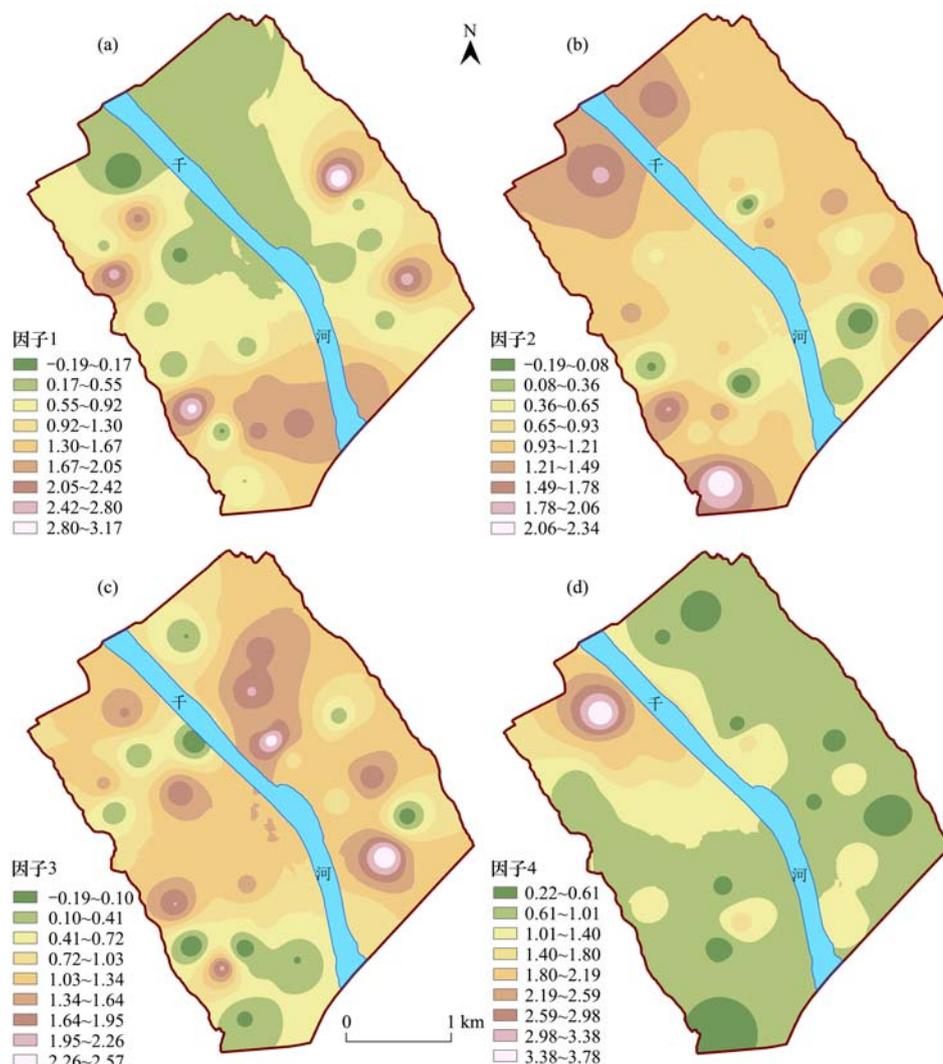


图 4 污染源贡献率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of contribution rate of pollution sources

3 讨论

该燃煤电厂位于千河工业园区,在电厂北侧临近得力隆纺织厂和亚光机械厂,南侧临近混凝土、环保材料和石墨烯公司等,工业企业密集分布,再加上处于河谷地带,易产生众多生态环境问题. 有研究

表明农田土壤中有有机质能与重金属元素形成络合物,影响重金属的形态转化与迁移^[43]. 而有机质与重金属离子的络合、螯合作用也能够促进土壤溶液中的 Hg 和 Cd 等金属与类金属元素形成硫化物而沉淀^[44]. 此外杨子鹏等^[45]研究表明电厂发电消耗的燃煤成分易造成重金属的富集. 高煜等^[46]和匡荟

芬等^[47]研究表明机械加工、矿业开采和农业活动等也是重金属富集的主要来源. 结合实地考察,元素 Cd 和 Cr 高值区附近分布有亚光机械和石油天然气

等公司,元素 As、Hg 和 Pb 高值区临近陈仓区千河火车站. 该地区农业种植与工业生产共同存在,使电厂周边农田土壤重金属呈现上述空间分布. 研究区

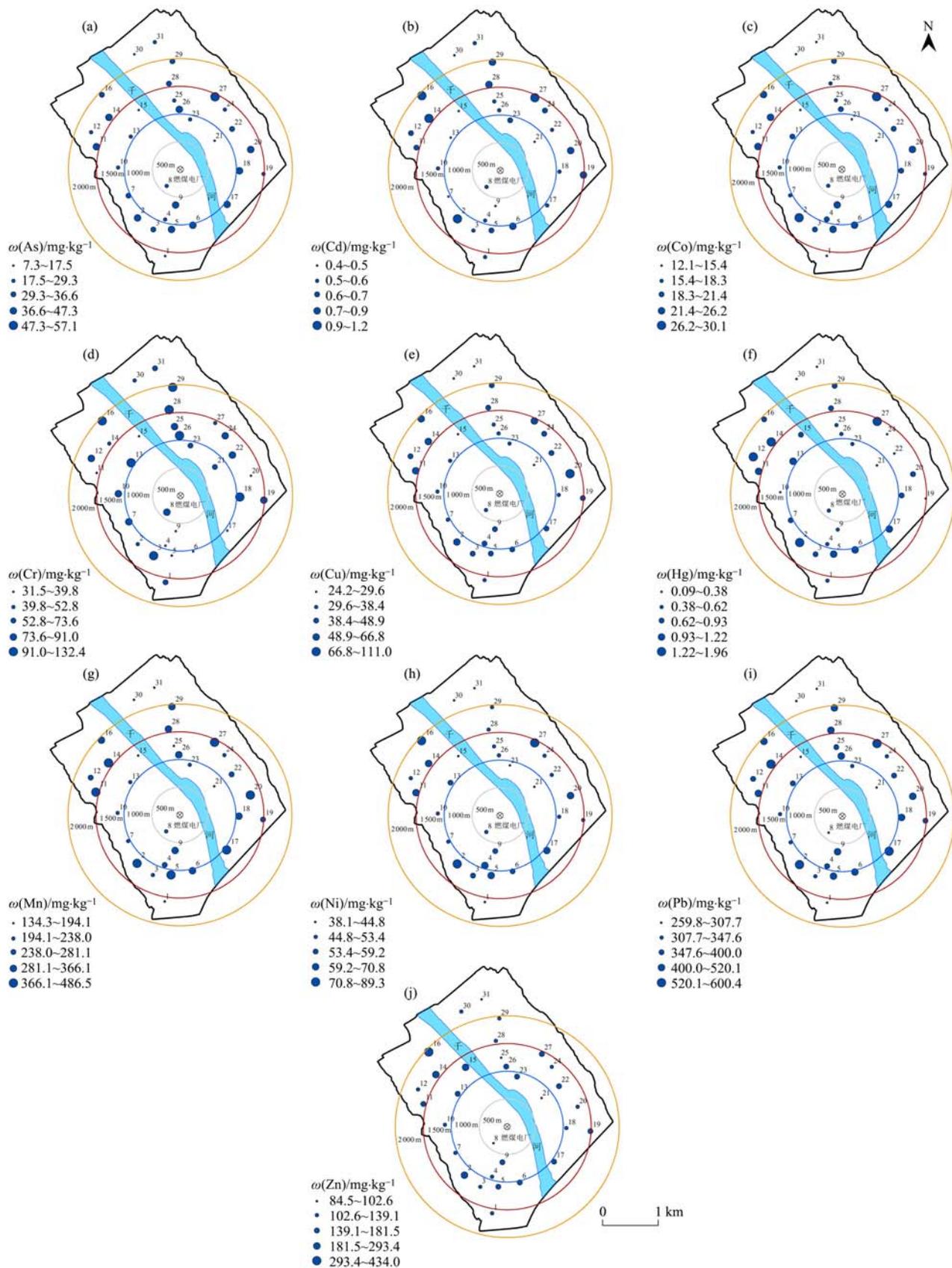


图5 燃煤电厂周边不同距离、不同方向土壤重金属含量差异

Fig. 5 Difference in heavy metal content in soils at different distances and directions around coal-fired power plants

内 Hg 和 Cd 元素是主要的潜在生态风险元素,这与刘成等^[48]研究巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属潜在生态风险一致,王帅等^[33]研究表明煤炭等化石燃料燃烧是 Hg 元素的主要来源,而本研究以电厂为中心,在其东北为千河火车站,西北部为石油天然气公司,南部为银昆高速和底县路交汇地带。研究区内工矿企业林立,重金属元素来源较为复杂,使研究区重金属潜在生态风险指数(RI)整体偏高,并使其在东北和西北部出现多个高值区。

Hg、Pb 和 As 元素含量平均值分别超过陕西省土壤背景值的 26、19.36 和 2.83,同时 Hg 元素为该地区主要的生态风险因子,张金良等^[49]和方凤满等^[50]研究表明 Hg 是燃煤电厂气态污染排放的特征元素。本研究利用 AERMOD 软件预测 Hg 元素最大浓度距离,得出结果在 1 415 m 处出现最大值,即燃煤电厂的最大降尘浓度距离。而宝鸡市区盛行东-西方向盛行风,本文考虑电厂周边受河谷地形的影响,因此盛行风向多为东南-西北风向。在不同方向上, Hg 在西北方向上有最高值,与盛行风一致,其次为南方向;在不同距离上,以燃煤电厂烟囱为中心,1 km 以内是土壤 Hg 含量低值区,其含量高值区主要分布在距电厂距离 1~2 km 范围内,大于 2 km 以后含量逐渐降低(图 5)。将预测结果与图 5 相对比分析, Hg 元素的较大值采样点位 12、14 和 17 等均是在 1 500 m 附近,与预测值相对一致。而冯亦立等^[51]研究表明土壤中重金属含量在距离燃煤电厂 2~3 km 时达到最高,而后逐渐降低,可能与电厂所处地形位置及当地盛行风向有所差异有关。车凯等^[11]研究表明土壤中 Pb、Hg 和 Cd 元素含量在距电厂 1~2 km 距离时达到最高,而后逐渐降低,这与本研究一致。燃煤电厂周边农田土壤中重金属的分布与盛行风、距烟囱距离有关,最大落地距离出现在距烟囱 1~2 km 处,并且随着与燃煤电厂距离的逐渐增大,烟气污染物扩散面积也随之增大,对气态污染物起到一定稀释作用,使污染物浓度随距离逐渐降低。

因子 1 煤炭燃烧的降尘源中贡献率较高的重金属元素为 Hg、As 和 Pb,其中 Hg 最高达到 47.05%。煤炭燃烧是 Hg 的重要来源,燃烧过程中 Hg 会以氧化态、颗粒态和单质态 3 种形式排放,除尘器仅对氧化态和颗粒态的 Hg 有较高去除^[52]。单质态的 Hg 由烟囱排出后,在最大降尘距离处落下并污染周边土壤,当地河谷地形为东南-西北走向,电厂东侧塬地最高海拔在 700~800 m,电厂西侧塬地最高海拔在 600~700 m,地形影响以及热岛效应使近地表风常由郊区吹向城市,导致因子 1 在燃煤电厂南部及谷地两侧沉降较多,贡献率较高。因子 2 工农业活动

源贡献率较高的重金属为 Cd、Cr、Cu 和 Zn。工业园区内众多企业生产活动加剧重金属污染物的排放。并且研究区内分布有千河镇、黄贺村、底店村、北坡村和宋家庄等村庄,农业人口较多,多从事农业活动,在采样农田及道路两侧发现有较多农药化肥包装袋,说明农业生产活动给研究区土壤也带来较大污染,这与郭晓东等^[53]研究的结果一致。工业生产及农业活动中农药化肥的过量使用导致这几种重金属元素的积累。因子 3 自然源贡献率较高的元素为 Cr、As、Co 和 Mn,研究区位于千河与渭河交汇地带,土质为新生代数百米厚的河流相泥砂砾沉积,陈仓区岩石类型主要为花岗岩^[54],余斐等^[55]研究表明风化土壤中重金属 Cr 和 Hg 含量受土壤母质层的显著影响,沉积和风化的总体作用使自然源的综合贡献率较高。因子 4 交通源贡献率高值区主要在燃煤电厂西北部,并且 Zn(60.89%)的贡献率较高,有研究表明轮胎磨损、机动车尾气排放和汽油添加剂的使用等容易造成 Zn 元素的富集^[40]。结合当地实际,电厂西北部为石油天然气股份公司,车辆出入较为频繁,经常有大型货车停靠。并且汽油和天然气作为易挥发物质,容易造成 Zn 元素在一定范围内的累积,从而导致该区域因子 4 贡献率较高。

基于高斯理论的大气污染物扩散模型被广泛应用于各种尺度的研究区域,其主要优势在于模式使用的相对简单性和预测结果的稳固性,对气象数据的需求量相对较小。不仅可以模拟平坦地形还可以模拟复杂地形下的大气污染物扩散^[56]。本文引入基于该理论的 AERMOD 模型来模拟预测燃煤电厂重金属污染物的扩散分布情况,将预测扩散范围与电厂周边重金属实测空间分布距离进行对比分析,揭示电厂降尘与土壤中不同距离和不同种类重金属之间的关系。未来对该模型的使用应注重收集或模拟相关气象参数,建立污染源参数清单以及相应的污染物浓度监测数据,探究模型对研究区域的各种参数的敏感性和适应性,发现不可忽略的因素,为利用 AERMOD 模型开展一系列应用研究奠定基础。

4 结论

(1) 燃煤电厂周边农田土壤中 Cd、Pb 和 As 均值超过国家土壤污染风险筛选值。Pb、Zn、Cu、As、Hg、Cd、Co、Cr 和 Ni 元素均值超过陕西省土壤背景值,其中 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{Pb})$ 平均值分别为 0.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 414.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别是陕西省土壤背景值的 26 倍和 19.36 倍。

(2) 燃煤电厂周边农田土壤潜在生态风险指数 RI 均值为 714.53,研究区整体处于很强的生态风险

水平. 其中 Hg 元素 E_i 为 520.92, 为极强生态风险; 其次 Cd 元素 E_i 为 113.92, 为较强生态风险. 重金属元素 Cd、Cr、Ni 和 Zn 高值区空间分布规律相似, 出现在电厂西北方向, As、Co、Hg、Mn 和 Pb 元素高值主要分布在电厂的东北方向.

(3) 煤炭燃烧的降尘源、工农业活动源、自然源和交通源对电厂周边农田土壤重金属贡献率分别为 32.16%、19.78%、26.25% 和 21.81%. 其中, 煤炭燃烧的降尘源中高贡献率元素为 Hg(47.05%) 和 As(46.75%), 工农业活动源中高贡献率元素为 Cd(34.57%) 和 Cr(34.52%), 自然源中高贡献率元素为 Cr(53.81%) 和 As(39.26%), 交通源中高贡献率元素为 Zn(60.89%) 和 Hg(22.41%).

参考文献:

- [1] 李博, 王卫良, 姚宣, 等. 煤电减排对中国大气污染物排放控制的影响研究[J]. 中国电力, 2019, **52**(1): 110-117.
Li B, Wang W L, Yao X, *et al.* Study on the effects of emission reduction in coal-fired power industry on China's air pollutant emission control[J]. *Electric Power*, 2019, **52**(1): 110-117.
- [2] You M, Huang Y E, Lu J, *et al.* Characterization of heavy metals in soil near coal mines and a power plant in Huainan, China[J]. *Analytical Letters*, 2015, **48**(4): 726-737.
- [3] 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 等. 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 1-10.
Peng C, He Y L, Guo Z H, *et al.* Characteristics and risk assessment of heavy metals in urban soils of major cities in China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 1-10.
- [4] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(S1): 49-53.
Lei G J, Chen Z L, Liu Q J, *et al.* The assessments of polluted degree and potential ecological hazards of heavy metals in suburban soil of Guangzhou city[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(S1): 49-53.
- [5] 谢小进, 康建成, 闫国东, 等. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(8): 1110-1117.
Xie X J, Kang J C, Yan G D, *et al.* Heavy metal concentration in agricultural soils around the upper-middle reaches of Huangpu River[J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(8): 1110-1117.
- [6] 张丁, 黄容, 高雪松. 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 946-956.
Zhang D, Huang R, Gao X S. Spatial characteristics and potential ecological risk factors of heavy metals in cultivated land in the transition zone of a mountain plain[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 946-956.
- [7] 张浙, 卢然, 伍思扬, 等. 长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3763-3772.
Zhang Z, Lu R, Wu S Y, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment of mine soil in Yangtze River Economic Belt[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3763-3772.
- [8] 许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 等. 天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1095-1101.
Xu M M, Liu A F, Shi R G, *et al.* Characteristics of heavy metals pollution of farmland and the leaching effect of rainfall in Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1095-1101.
- [9] 罗成科, 张佳瑜, 肖国举, 等. 宁东基地不同燃煤电厂周边土壤 5 种重金属元素污染特征及生态风险[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(7): 1285-1291.
Luo C K, Zhang J Y, Xiao G J, *et al.* Pollution characteristics and ecological assessment of heavy metals in soil around different coal-fired power plants of Ningdong base[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(7): 1285-1291.
- [10] Wang X Q, Zeng X D, Liu C P, *et al.* Heavy metal contaminations in soil-rice system: source identification in relation to a sulfur-rich coal burning power plant in northern Guangdong province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(8): 1-12.
- [11] 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 等. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4578-4589.
Che K, Chen C M, Zheng Q Y, *et al.* Heavy metal emissions from coal-fired power plants and heavy metal pollution characteristics and health risks in surrounding soils[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4578-4589.
- [12] 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 900-908.
Meng X F, Guo J M, Yang J X, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan province[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 900-908.
- [13] 王成鑫, 楚英豪, 阮建辉, 等. AERMOD 模型地表参数更新对模拟效果影响[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(5): 2070-2077.
Wang C X, Chu Y H, Ruan J H, *et al.* Research on the influence of AERMOD model surface parameter update on simulation effect[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(5): 2070-2077.
- [14] 李梅, 杨冬偶, 何望君. 大气扩散模型 AERMOD 与 CALPUFF 对比研究及展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, **45**(8): 1245-1254.
Li M, Yang D O, He W J. Comparison and perspectives on theories and simulation results of gas dispersion models AERMOD and CALPUFF[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, **45**(8): 1245-1254.
- [15] 刘旭. 北京市医药健康产业聚集污染影响—基于 EG 指数与 AERMOD 模型情景研究[J]. 环境污染与防治, 2022, **44**(10): 1325-1329, 1408.
Liu X. The concentration pollution effect of Beijing's pharmaceutical and health industry-based on EG index and scenario research in AERMOD model[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, **44**(10): 1325-1329, 1408.
- [16] 陈艳, 张品汉, 陈慧. AERMOD 模型在垃圾填埋场大气环境影响预测中的应用[J]. 绿色环保建材, 2021, (4): 41-42.
- [17] 汪峰, 黄言欢, 李如忠, 等. 有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4800-4809.
Wang F, Huang Y H, Li R Z, *et al.* Contamination assessment and source apportionment of soil heavy metals in typical villages and towns in a nonferrous metal Mining city[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4800-4809.
- [18] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(10):

- 2219-2238.
Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- [19] 艾建超, 王宁, 杨净. 基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
Ai J C, Wang N, Yang J. Source apportionment of soil heavy metals in Jiapiyou goldmine based on the UNMIX model[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- [20] 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 等. 兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在 WRF-Chem 中应用评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 634-642.
Guo W K, Li G Y, Chen B, *et al.* Establishment of a high-resolution anthropogenic emission inventory and its evaluation using the WRF-Chem Model for Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 634-642.
- [21] 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.
- [22] 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气 PM_{2.5} 镧系元素组成特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2698-2706.
Zhang Y F, Yu R L, Hu G R, *et al.* Composition characteristics and sources apportionment of Lanthanoid in PM_{2.5} of Quanzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2698-2706.
- [23] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染源解析研究综述[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(1): 232-242.
Li J, Wu J, Jiang J Y, *et al.* Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(1): 232-242.
- [24] 王玉, 辛存林, 于爽, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al.* Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4756-4766.
- [25] 宋清泉, 徐夕博, 吴泉源, 等. 基于 PMF 模型的土壤重金属定量源解析及环境风险评价[J]. *湖南师范大学(自然科学学报)*, 2022, **45**(1): 76-83.
Song Q Q, Xu X B, Wu Q Y, *et al.* Quantitative analysis of environmental risk of heavy metal sources in soil based on PMF model [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2022, **45**(1): 76-83.
- [26] Wang S, Cai L M, Wen H H, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 92-101.
- [27] Rodríguez J A, Nanos N, Grau J M, *et al.* Multiscale analysis of heavy metal contents in Spanish agricultural topsoils [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(6): 1085-1096.
- [28] Hakanson L. An Ecological Risk Index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [29] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [30] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization; a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [31] 吴劲, 滕彦国, 李娇, 等. 基于 PMF 模型的土壤重金属源解析中变量敏感性研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2960-2969.
Wu J, Teng Y G, Li J, *et al.* Sensitivity of input variables in source apportionment of soil heavy metal base on PMF model[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2960-2969.
- [32] 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 李建涛, 等. 焉耆盆地土壤重金属的污染及潜在生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1523-1530.
Hamit Y, Zulpiya M, Li J T, *et al.* Sources explanation, pollution and assessment of potential ecological hazards of heavy metals in the soils of Yanqi basin, China [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1523-1530.
- [33] 王帅, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江河口表层沉积物中重金属污染评价及来源[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(10): 1110-1118.
Wang S, Hu G R, Yu R L, *et al.* Pollution assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments from Jiulong River estuary[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(10): 1110-1118.
- [34] 王文峰, 秦勇, 宋党育. 燃煤电厂中微量元素迁移释放研究[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 748-752.
Wang W F, Qin Y, Song D Y. Study on the mobility and release of trace elements in coal-fired power plant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23**(6): 748-752.
- [35] 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 等. 阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
Niu Y Y, Liu Z C, Li R M, *et al.* Characteristics, source apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in Summer in Yangquan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
- [36] Yebpella G G, Magomya A M, Odoh R, *et al.* Impact of Pb-Zn mining on heavy metal levels in soil from Arufu mine field, Wukari, Nigeria [J]. *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*, 2020, **21**(8): 62-70.
- [37] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 2012, **67**(7): 971-984.
Lü J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao city [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7): 971-984.
- [38] Liang J, Feng C T, Zeng G M, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 681-690.
- [39] 邓红艳, 陈刚才. 铬污染土壤的微生物修复技术研究进展[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(3): 466-472.
Deng H Y, Chen G C. Progress in research on microbial remediation technologies of chromium-contaminated soil [J]. *Earth and Environment*, 2012, **40**(3): 466-472.
- [40] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 934-944.

- Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 934-944.
- [41] 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 等. 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- Hu J, Zhao X Y, Wang T T, *et al.* Distribution characteristics, evaluation, and source analysis of heavy metals in soils of Fenhe riparian zone in Taiyuan city [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- [42] Yang S Y, He M J, Zhi Y Y, *et al.* An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities [J]. *Environment International*, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105239.
- [43] 孙花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. *湖南师范大学(自然科学学报)*, 2011, **34**(4): 82-87.
- Sun H, Tan C Y, Huang D Y, *et al.* Effects of soil organic matter on the accumulation availability and chemical speciation of heavy metal [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2011, **34**(4): 82-87.
- [44] 朱燕, 代静玉. 腐殖物质对有机污染物的吸附行为及环境学意义[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(6): 1224-1230.
- Zhu Y, Dai J Y. Research progress in the structure characterization of humus and its environmental meaning [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, **37**(6): 1224-1230.
- [45] 杨子鹏, 肖荣波, 陈玉萍, 等. 华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析[J]. *生态学报*, 2020, **40**(14): 4823-4835.
- Yang Z P, Xiao R B, Chen Y P, *et al.* Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in South China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(14): 4823-4835.
- [46] 高煜, 王国兰, 金梓函, 等. 千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5333-5345.
- Gao Y, Wang G L, Jin Z H, *et al.* Spatial distribution, risk, and influencing factors of river water-sediment heavy metals in the lower reaches of the Qianhe River [J]. *Environmental science*, 2021, **42**(11): 5333-5345.
- [47] 匡荟芬, 胡春华, 吴根林, 等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(4): 964-976.
- Kuang H F, Hu C H, Wu G L, *et al.* Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 964-976.
- [48] 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 1031-1037.
- Liu C, Shao S G, Fan C X, *et al.* Pollution status and risk assessment of heavy metal in the sediment of the severe polluted confluence area of Lake Chaohu [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 1031-1037.
- [49] 张金良, 张晗, 邹天森, 等. 某生物质电厂周边农田土壤中多环芳烃污染特征及生态安全评价[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(5): 1655-1663.
- Zhang J L, Zhang H, Zou T S, *et al.* Pollution characteristics and evaluation safety of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in surface soil of farmland around the biomass power plant [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5): 1655-1663.
- [50] 方凤满, 杨丁, 汪琳琳, 等. 芜湖燃煤电厂周边土壤中砷汞的分布特征研究[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(1): 109-113.
- Fang F M, Yang D, Wang L L, *et al.* Distribution of arsenic and mercury in soil around coal-fired power plant in Wuhu [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(1): 109-113.
- [51] 冯亦立, 王家源. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤重金属污染评价[J]. *环境污染与防治*, 2022, **44**(4): 510-514.
- Feng Y L, Wang J Y. Heavy metal emission of coal-fired power plant and assessment of heavy metal pollution in surrounding soil [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, **44**(4): 510-514.
- [52] 吕建树. 烟台海岸带土壤重金属定量源解析及空间预测[J]. *地理学报*, 2021, **76**(3): 713-725.
- Lü J S. Source apportionment and spatial prediction of heavy metals in soils of Yantai coastal zone [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(3): 713-725.
- [53] 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.
- [54] 张桂琴. 陕西省宝鸡市陈仓区车家庄地区控矿因素及找矿方向探讨[J]. *世界有色金属*, 2020, (14): 87-88.
- Zhang G Q. Discussion on ore controlling factors and prospecting direction in Chejiashuang area, Chencang district, Baoji city, Shaanxi province [J]. *World Nonferrous Metals*, 2020, (14): 87-88.
- [55] 余斐, 叶彩红, 许宛孜, 等. 韶关市花岗岩地区森林土壤重金属污染评价[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(2): 354-362.
- Yu F, Ye C H, Xu T Z, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in forest soil in granite area of Shaoguan city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(2): 354-362.
- [56] 迟妍妍, 张惠远. 大气污染物扩散模式的应用研究综述[J]. *环境污染与防治*, 2007, **29**(5): 376-381.
- Chi Y Y, Zhang H Y. A review of the development and application of air pollutant dispersion models [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, **29**(5): 376-381.

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in "2+26" Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)