

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 ..... 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 ..... 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 ..... 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 ..... 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM<sub>2.5</sub> 减排效果评估 ..... 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM<sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶的影响 ..... 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 ..... 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 ..... 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 ..... 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 ..... 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染的健康效益评价 ..... 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 ..... 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 ..... 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 ..... 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 ..... 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 ..... 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 ..... 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 ..... 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 ..... 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 ..... 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 ..... 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 ..... 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 ..... 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 ..... 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 ..... 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 ..... 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 ..... 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

镧改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 ..... 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 ..... 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 ..... 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 ..... 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 ..... 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 ..... 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态学计量特征 ..... 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 ..... 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 ..... 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响 ..... 赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 ..... 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 ..... 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N<sub>2</sub>O 排放及其功能基因的影响 ..... 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 ..... 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 ..... 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 ..... 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中重金属含量表征及健康风险 ..... 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 ..... 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 ..... 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 ..... 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 ..... 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 ..... 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 ..... 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 ..... 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 ..... 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 ..... 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 ..... 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 ..... 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 ..... 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

# PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析

王美华

(中化地质矿山总局浙江地质勘查院, 杭州 310002)

**摘要:** 人类活动往往会增加表层土壤重金属含量,进而影响了区域土壤重金属的精确定量与评估。为系统研究浙江省西部石煤矿山周边典型农田土壤重金属污染源的空间分布特征及其贡献率,采集并分析了耕地表层土壤样品和农产品中 Cd、Hg、As、Cu、Zn 和 Ni 等重金属,重点探讨各元素地球化学特征并对农产品进行生态风险评价。采用相关性分析、主成分分析(PCA)和绝对主成分得分-多元线性回归受体模型(APCS-MLR),解析了该地区土壤中重金属污染的来源和源贡献率,并采用地统计学分析法对土壤中 Cd、As 的空间分布特点进行了分析。结果表明,研究区内 6 种土壤重金属(Cd、Hg、As、Cu、Zn 和 Ni)含量都超过风险筛选值,其中 Cd 和 As 含量超过风险管制值,其超标率分别为 36.11% 和 0.69%,而农产品中 Cd 也存在严重超标。通过分析认为研究区土壤重金属污染源主要有 2 个:源 1(Cd、Cu、Zn 和 Ni)为矿业活动源和自然源,对 Cd、Cu、Zn 和 Ni 的贡献率分别为 78.53%、84.41%、87% 和 89.13%;源 2(Hg 和 As)以工业源为主,对 Hg 和 As 的贡献率分别为 83.22% 和 82.41%。Cd 为研究区污染风险最大的重金属,应采取措施降低污染风险。研究区东北部有一座富含 Cd、Cu、Zn 和 Ni 等元素的废弃石煤矿山,大气沉降、矿山废水汇入灌溉水和流入农田底泥是导致耕地这 4 种重金属污染的主要原因;此外,大气沉降物作为 As 和 Hg 的主要来源,与农业生产也有很大关系。上述研究可为农田生态环境管理精准施策提供技术支撑。

**关键词:** 重金属; 源解析; APCS-MLR 受体模型; 地统计学

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3509-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202208002

## Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics

WANG Mei-hua

(Zhejiang Institute of Geological Prospecting, China Chemical Geology and Mine Bureau, Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** Human activities often increase the content of heavy metals in surface soils, thus affecting the precise quantification and evaluation of heavy metals in regional soils. In order to systematically study the spatial distribution characteristics and contribution rate of heavy metal pollution sources in typical farmland soil around stone coal mines in western Zhejiang Province, heavy metals such as Cd, Hg, As, Cu, Zn, and Ni in topsoil samples of arable land and agricultural products were collected and analyzed, with an emphasis on the geochemical characteristics of each element and ecological risk assessment of agricultural products. Correlation analysis, principal component analysis (PCA), and the absolute principal component score-multiple linear regression receptor model (APCS-MLR) were used to discuss the source and source contribution rate of soil heavy metal pollution in this area. Meanwhile, the spatial distribution characteristics of the contribution rate of Cd and As pollution sources of the soil in the study area were also expounded in detail by the geostatistical analysis method. The results showed that the contents of six heavy metal elements including Cd, Hg, As, Cu, Zn, and Ni in the study area all exceeded the risk screening value. Among them, two elements exceeded the risk control value, Cd and As, and the point-exceeding rates were 36.11% and 0.69%, respectively. The Cd in agricultural products was also seriously exceeded. According to the analysis, there were two main sources of heavy metal pollution in the soil in the study area. Source one (Cd, Cu, Zn, and Ni) was coming from mining activities and natural sources, and the contribution rates to Cd, Cu, Zn, and Ni were 78.53%, 84.41%, 87%, and 89.13%. Source two (Hg and As) was mainly an industrial source, and the contribution rates to As and Hg were 82.41% and 83.22%, respectively. Cd was the heavy metal with the greatest pollution risk in the study area, and measures should be taken to reduce the pollution risk. There was an abandoned stone coal mine rich in elements such as Cd, Cu, Zn, and Ni. Located in the northeastern part of the study area under the action of atmospheric deposition, the confluence of mine wastewater into irrigation water and farmland sediment was one of the important factors for forming the source of farmland pollution. The settled fly ash was the main pollution source of As and Hg, which was also closely related to agricultural production. The above research can provide technical support for the precise implementation of ecological and environmental management policies.

**Key words:** heavy metal; source identification; APCS-MLR receptor model; geostatistics

随着我国经济的快速发展,城镇规模和产业发展的步伐越来越快,但同时也带来了环境问题的日益突出,土地的质量不断下降;土壤中重金属含量有显著上升的趋势<sup>[1,2]</sup>。目前,全国农田土壤中重金属超标的比例达到 19.4%<sup>[3]</sup>。土壤中的重金属污染主要源自自然和人为这两种途径,而自然源污染包括天然岩石在物理化学过程中产生的有害物质对环境产生的污染。人为来源则更加复杂,包括工业治

炼、煤炭利用和矿山开采等引起的工业污染源;交通工具排放的烟尘、尾气等造成的交通运输污染源;农业生产中农资物质不合理使用等造成的农用

收稿日期: 2022-08-01; 修订日期: 2022-09-05

基金项目: 中化地质矿山总局“污染土壤修复技术研发及应用团队”项目(ZHTD202105); 浙江省常山县自然资源和规划局“常山县土地质量地质调查”项目(GSLT-GK-2017004)

作者简介: 王美华(1972~),男,高级工程师,主要研究方向为矿产地质和农业地质调查, E-mail: 277362453@qq.com

来源和居民日常生活中产生的废水、废气和生活垃圾等引起的生活污染源,这些污染来源都会导致重金属的累积<sup>[4]</sup>. 重金属污染土壤后,因其隐蔽性、难解性和高度聚集性,极易通过食品链侵入人体,对人类的健康造成严重的危害<sup>[5,6]</sup>. 在《土壤污染防治行动计划》中<sup>[7]</sup>,针对目前土壤污染状况,提出了加强污染源监测、明确治理和修复主体等具体要求. 因此,开展污染源分析技术的研究,对于控制和提高土壤环境质量具有十分重要的意义.

目前国内外有关专家、学者对土壤环境问题进行了较为系统的探讨<sup>[8~11]</sup>. 污染物来源分析的数学模型有两类,一类是污染物作为目标的扩散模式,另一类是被污染的受体模式<sup>[12]</sup>. 目前广泛采用的土壤来源分析方法包括地统计分析、化学质量平衡法、多元统计分析、同位素比值法、UNMIX 模型、正定矩阵因子分解法和混合法等<sup>[13~18]</sup>,其中混合法绝对主成分得分-多元线性回归分析(APCS-MLR)模型是以受体污染源为研究对象,无需了解污染源个数,操作简便且能客观得出污染源对受体的具体贡献率,因此得到了广泛应用<sup>[19~21]</sup>.

浙江是中国经济和社会发展迅速的地区,2016年启动实施“711”土地质量地质调查工程,至今已完成了88个县(市、区)的耕地和150个农业“两区”的调查工作. 浙江省常山县是浙西地区的一个重要农业县,通过1:5万土地质量调查,基本查明了该县耕地Cd、Hg、As、Cu、Cr、Pb、Zn和Ni这8种重金属土壤环境质量安全类别分布情况,其中超过风险管制值农用地面积666.67 hm<sup>2</sup>,这些区域总体以Cd污染为主<sup>[22]</sup>. 近年来,有学者对该县区域土壤中的重金属进行了定性的分析,宋明义<sup>[23]</sup>和刘道荣等<sup>[24]</sup>提出,该区下寒武统荷塘组富含Cd、Cr和Ni等元素,高镉的地质背景是导致农田土壤中镉含量较高的主要原因. 但是,从定量的角度来看,污染源对每种重金属的贡献率研究较少. 本文选择在人为与自然因素综合影响而造成的石煤矿山周边农田土壤重金属严重污染的典型区域作为研究对象,通过高密度耕地土壤采样,采用PCA-APCS-MLR与地统计学分析相结合的方法,对浙西地区的农田进行了土壤重金属源解析分析,确定污染物的主要源区、污染源贡献率及其空间分布特征,以期制定和采取相应的源头消减、阻控措施和土壤修复等提供技术支持.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江西部常山县辉埠镇,面积达

9.42 km<sup>2</sup>. 整体地形北西和北部高,属于山区;中部地势较低,为一片冲积平原. 该区的灌溉水系以菱湖溪为主导,呈北西向. 全年主要风向是ENE,频率为17.85%;副主导风向以NE为主,频率为10.87%. 年平均、最大和最小风速分别为2.0、3.72和1.16 m·s<sup>-1</sup>. 该区的主要土壤类型为红壤、水稻土、石灰岩土和粗骨土. 农作物以水稻、茭白、甘蔗等为主. 该区地层主要由寒武系、奥陶系和第四系组成,其中第四系的范围最大,主要是河流冲积而成. 其他重要地层中,寒武系主要由海相沉积的碳酸盐岩和硅质岩构成,而奥陶系岩性主要为海陆交互相沉积而成碎屑岩. 岩浆岩不发育,断裂的总体方向呈北西向. 山背村北面有一石煤矿山,该矿山于2010年前关闭,主要由荷塘组的黑色硅质岩组成,目前已有两个较大的废弃矿坑,其采场边坡高达60 m,岩底堆积了大量石煤、硅质岩,在停止开采后,大部分基岩暴露于地表,未进行生态恢复.

### 1.2 样品采集和测试

通过对常山县2017~2019年1:5万的土地质量地球化学调查,发现Cd、Hg、As、Cu、Zn和Ni等6种重金属存在超标,而Cr和Pb均未超标. 本次样品采集于2020年11月,在前期调研的基础上进行加密取样,地表土壤采样点均分布在耕地内,面积3.25 km<sup>2</sup>,采样以中部大埂村的集中连片水田为主,少量采集于周边山间零星旱地和水田,共采集144件(包括农产品样对应的根系土样30件),采样密度约为44件·km<sup>-2</sup>. 采样时使用手执GPS准确定位,以已布置的采样点为主采样坑,按梅花形采集3~5个子样点组合成一个样品,并在采样时尽量避开公路、沟渠等人为因素影响较大的区域;采集后的土壤样品放入通风场地晾干,并用木棒碾压,去除植物残渣、石块等,粉碎后的土壤样品经过10目筛网,正样200 g左右送到实验室进行化验. 农产品共采集20件甘蔗、7件茭白和3件稻谷样品. 以0.1~0.2 hm<sup>2</sup>为采样单元,用梅花形法进行多点取样,均匀混合组成一个样品,用塑料袋封好,并于24 h内运送到实验室,采样情况见图1.

化工地质矿山第十八实验室完成了样品检测工作,其中土壤样品分析指标有Cd、Hg、As、Cu、Zn和Ni等6种重金属元素和土壤pH. Cd和Ni测试采用电感耦合等离子体质谱法;Cu和Zn测试采用X荧光光谱法;Hg测试采用冷蒸气-原子荧光光谱法;As测试采用氢化物发生-原子荧光光谱法;pH测试采用玻璃电极法. 同时在检测期间,对土壤质控样进行质量监控,通过对质控样的检验,各项指标的准确度和精密度均满足DZ/T 0295-2016<sup>[25]</sup>规范的

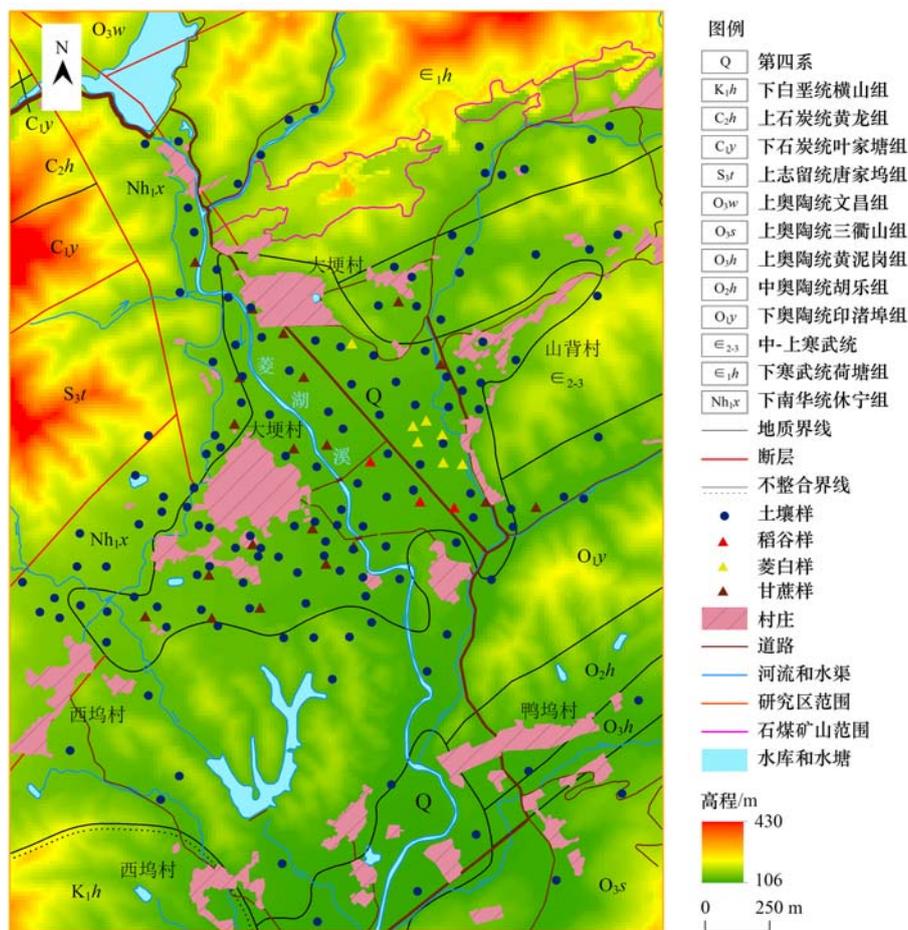


图1 研究区地质暨土壤和农产品采样点位分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of the geology of the study area and the distribution of sampling sites for soil and agricultural products

要求.农产品检测按照 DD 2005-03<sup>[26]</sup>技术规范的要求,对样品中的 Cd、Cr、Cu、Zn、Ni、Pb、As 和 Hg 指标进行分析.其中采用电感耦合等离子体质谱仪对 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 指标进行分析,采用原子荧光光谱仪对 As 和 Hg 进行检测.为确保测试的可信度,将 5% 样品进行抽样,并将其送至具有国家级第三方检测机构进行外检,其检测值与基本样的相对偏差合格率均达 100%,满足 DD 2005-03 技术规范的规定.

### 1.3 研究方法

利用 SPSS 软件对样品进行了异常值分析、Pearson 相关分析和主成分分析,然后利用 Excel 进行 APCS-MLR 受体模型的相关运算,并将各个污染物的含量值进行多元线性回归(MLR),以求出各个污染源对土壤中重金属元素的方差贡献率.同时运用 ArcGIS10.7 对源贡献量进行普通克里格(ordinary Kriging)空间插值,求得主要元素 Cd 和 As 贡献量空间分布.

利用主成分分析方法(PCA)分析了研究区土壤中的重金属元素.该算法采用降维的方法,将多个指数分解为反映原主要信息的少数几个综合指数,此

方法要求原始变量之间具有较强的相关关系<sup>[27]</sup>.PCA 和 APCS-MLR 的主要计算过程如下<sup>[28-30]</sup>.

第一步:对所有重金属元素含量进行标准化,从 PCA 得到归一化的因子得分.

第二步:将 1 个含量为 0 的人为样本导入全部重金属元素,计算得出 0 含量样本的因子得分.

第三步:各样品的因子得分减去 0 含量样品的因子得分,得出各重金属元素的 APCS 值.

第四步:以重金属含量数据为因变量,APCS 为自变量,进行多元线性回归(MLR),所得回归系数可以将各污染源对各污染物的贡献值进行回归,计算公式如下:

$$C_i = b_i + \sum_{m=1}^n (APCS_{im} \times a_{im})$$

式中,  $C_i$  为测定重金属元素的含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $a_{im}$  为源  $m$  对重金属元素  $i$  的回归系数元素;  $APCS_{im}$  金属元素  $i$  的全部取样绝对主成分得分值,  $b_i$  为一个常数项,  $APCS_{im} \times a_{im}$  为源  $m$  对各采样  $C_i$  的含量贡献,而对于全部样品而言,  $APCS_{im} \times a_{im}$  平均值就是源  $m$  对重金属元素  $i$  的平均贡献量.

第五步:用  $a_{im}$  与  $\overline{APCS_{im}}$  的乘积来说明污染源对

重金属元素因子的贡献,而  $b_i$  通常被视为未被识别的来源(其他来源)的贡献,污染源  $m$  对重金属元素  $i$  的贡献率由以下公式计算:

$$PC_{im} = \frac{|a_{im} \times \overline{APCS}_{im}|}{|b_i| + \sum_{m=1}^n |a_{im} \times \overline{APCS}_{im}|}$$

未识别的来源(其他来源)的贡献率按下式计算:

$$PC_{im} = \frac{|b_i|}{|b_i| + \sum_{m=1}^n |a_{im} \times \overline{APCS}_{im}|}$$

式中,  $PC_{im}$  为针对重金属元素  $i$  和污染源  $m$  的贡献率,  $\overline{APCS}_{im}$  为重金属元素  $i$  的全部样本绝对主成分因子得分的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层土壤重金属含量统计与分析

对 144 件表层土壤样统计分析可知(表 1), 6 种重金属元素含量  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、

$\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$  和  $\omega(\text{Ni})$  的平均值分别为: 2.58、26.75、0.28、70.34、185.54 和 63.25  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 6 种重金属元素含量平均值都高于全国、浙江省和常山县土壤背景值<sup>[22,31,32]</sup>, 其中 Cd 元素富集程度最大, 其中位数含量分别是全国、浙江省和常山县土壤背景值的 4.41 倍、7.73 倍和 3.26 倍。根据 GB 15618-2018<sup>[33]</sup> 风险筛选值统计, 点位超标率由大到小排序依次为: Cd (66.67%) > As (34.72%) > Cu (31.25%) > Ni (22.22%) > Zn (21.53%) > Hg (7.64%); 超过风险管制值有 Cd 和 As 这两种元素, 点位超标比率分别为 36.11% 和 0.69%, 表明整个区域的重金属含量都很高。

6 种土壤重金属含量的变异系数大小依次为: Cd > Cu > As > Ni > Zn > Hg, 除 Hg 元素外, 其他各元素含量的变异系数均 > 100%, 属强变异; Cd 含量的变异系数最大, 说明了其含量在空间上的变化最大。

表 1 研究区表层土壤重金属含量统计分析<sup>1)</sup>

Table 1 Statistical analysis of heavy metal content in the surface soil of the study area

项目	含量范围/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值 $\pm$ 均值 标准误/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数 /%	浙江土壤背 景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	中国土壤背 景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	超标点数/个		点位超标率/%	
						风险筛 选值	风险管 制值	风险筛 选值	风险管 制值
Cd	0.06 ~ 27.14	2.58 $\pm$ 0.35	161.29	0.17	0.097	96	52	66.67	36.11
As	3.90 ~ 291.00	26.75 $\pm$ 2.35	105.35	6.39	11.2	50	1	34.72	0.69
Cu	12.02 ~ 615.00	70.34 $\pm$ 7.06	120.47	23.21	22.6	45	—	31.25	—
Ni	11.49 ~ 528.12	63.25 $\pm$ 5.55	105.28	19.59	26.9	32	—	22.22	—
Zn	58.52 ~ 1 520.79	185.54 $\pm$ 15.87	102.63	83.52	74.2	31	—	21.53	—
Hg	0.05 ~ 1.91	0.28 $\pm$ 0.02	79.04	0.1	0.065	11	0	7.64	0
pH(无量纲)	3.67 ~ 7.85	5.61 $\pm$ 0.07	—	5.77	—	—	—	—	—

1) 浙江土壤背景值见文献[32]; 中国土壤背景值见文献[31]; 超标点数和点位超标率分别以风险筛选值和风险管制值评价标准进行计算, 风险筛选值和风险管制值评价标准见文献[33]; “—”表示没有相关数据

### 2.2 农作物重金属元素含量统计分析

对采集的甘蔗、稻谷和茭白样品进行了测定, 结果见表 2。按 GB 2762-2017<sup>[34]</sup> 评价标准, 分别对

稻谷、甘蔗和茭白进行了相应评价, 其中稻谷对 Cd、Cr、Pb 和 Hg 这 4 种元素进行了评价, 甘蔗对 Cd 和 Pb 这 2 种元素进行了评价, 茭白对 Cd、Cr、

表 2 研究区农产品重金属含量统计分析<sup>1)</sup>

Table 2 Statistical analysis of heavy metal content in agricultural products in the study area

农产品名称	特征值	Cd	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Hg
稻谷	含量范围	0.144 ~ 2.861	0.100 ~ 0.314	1.131 ~ 3.726	2.313 ~ 4.536	22.301 ~ 26.891	0.086 ~ 0.104	0.084 ~ 0.112	0.0018 ~ 0.0020
	平均值 $\pm$ 均值 标准误	1.090 $\pm$ 0.886	0.212 $\pm$ 0.062	2.682 $\pm$ 0.791	3.558 $\pm$ 0.655	24.638 $\pm$ 1.326	0.097 $\pm$ 0.005	0.097 $\pm$ 0.008	0.0019 $\pm$ 0.0001
	变异系数/%	140.859	50.758	51.059	31.910	9.319	9.819	14.229	5.973
	评价标准值	0.2	1.0	—	—	—	—	0.2	0.02
甘蔗	含量范围	0.007 ~ 0.505	0.058 ~ 0.572	0.116 ~ 1.724	0.264 ~ 1.593	0.473 ~ 9.678	0.004 ~ 0.045	0.002 ~ 0.114	0.0013 ~ 0.0053
	平均值 $\pm$ 均值 标准误	0.097 $\pm$ 0.031	0.219 $\pm$ 0.030	0.578 $\pm$ 0.086	0.752 $\pm$ 0.111	3.149 $\pm$ 0.566	0.018 $\pm$ 0.003	0.036 $\pm$ 0.007	0.003 $\pm$ 0.0002
	变异系数/%	142.185	60.466	66.471	66.032	80.410	68.608	88.361	37.095
	评价标准值	0.05	—	—	—	—	—	0.100	—
茭白	含量范围	0.001 ~ 0.098	0.013 ~ 0.067	0.065 ~ 3.999	0.138 ~ 0.719	1.927 ~ 3.889	0.013 ~ 0.033	0.000 ~ 0.019	0.0007 ~ 0.0022
	平均值 $\pm$ 均值 标准误	0.023 $\pm$ 0.013	0.032 $\pm$ 0.007	0.760 $\pm$ 0.543	0.377 $\pm$ 0.086	2.622 $\pm$ 0.273	0.025 $\pm$ 0.003	0.003 $\pm$ 0.003	0.0011 $\pm$ 0.0002
	变异系数/%	150.582	60.944	189.501	60.323	27.533	28.290	264.575	46.319
	评价标准值	0.05	0.5	—	—	—	0.5	0.1	0.01

1) As 和 Hg 为总砷和总汞含量; 评价标准值见文献[34]; “—”表示没有相关数据; 除变异系数外, 其他特征值单位均为  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

As、Pb 和 Hg 这 5 种元素进行评价. 研究表明: 本区农产品中重金属含量较高, 除甘蔗有 1 件 Pb 含量超标外, 其他都为 Cd 含量超标, 其中稻谷、甘蔗和茭白样总点位超标率分别为 67%、40% 和 14%. 另从

图 2 可以看出, 甘蔗和茭白这 2 种不同的作物, 根系土镉含量与对应农产品镉含量具有显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 说明根系土 Cd 含量与农产品的 Cd 含量存在着密切的联系.

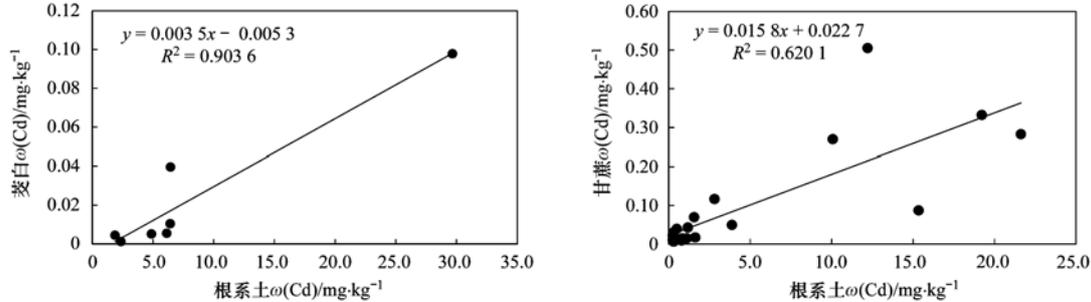


图 2 根系土与农产品镉含量相互关系

Fig. 2 Relationships between root soil and cadmium content of agricultural products

## 2.3 土壤重金属污染源分析

### 2.3.1 土壤重金属污染源定性识别

(1) 土壤中重金属元素的相关性 对研究区内 6 种土壤重金属元素进行了相关性分析, 结果见表 3. 从中可知, 这 6 种元素可分为 Cd-Cu-Zn-Ni 和 As-Hg 这 2 类组合, 组合内元素两两之间均呈显著的正相关

关系 ( $P < 0.01$ ), 且相关系数都在 0.5 以上, Zn-Ni 相关系数最高, 达 0.992, 说明这些重金属元素两两之间可能存在相似污染来源, 且相关性越强, 相似的污染来源的可能性越大<sup>[17,35]</sup>. 而这 2 类元素组合相互之间相关系数都很低, 都不存在显著相关性, 说明这 2 类元素组合相互之间污染来源存在差异.

表 3 研究区表层土壤重金属指标间的相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficients between heavy metal indexes in topsoil in the study area

	Cd	As	Hg	Cu	Zn	Ni
Cd	1					
As	0.003	1				
Hg	-0.050	0.788**	1			
Cu	0.614**	0.107	0.053	1		
Zn	0.537**	0.133	0.055	0.908**	1	
Ni	0.525**	0.099	0.035	0.908**	0.992**	1

1) \*\* 表示在 0.01 水平 (双尾) 下, 相关性显著

(2) 主成分分析 对土壤中的重金属数据进行了归一化处理, 通过 KMO 和 Bartlett 的球形度检验, KMO 的量测结果为 0.694, 高于 0.5, Bartlett 检验的统计量值为 1 045.445, 相应的概率  $P$  值接近 0, 说明 6 种重金属的含量存在很好的相关性, 适宜进行因子分析.

在此基础上, 应用 SPSS 软件, 通过 Kaiser 标准的正交式旋转法对两个因子进行了统计 (表 4), 发现两个因子的特征量都超过 1, 分别为 3.280 和 1.802, 方差贡献率分别为 54.67% 和 30.04%, 累计方差贡献率为 84.71%, 贡献率接近 85%. 每个元素的公因子方差值都接近 0.9, 只有 Cd 元素的数值稍低为 0.514, 这表明抽取两个因子的整体水平很高, 可以充分地反映出所有的数据. 从旋转成分矩阵各项系数分析, 源 1 在 Cd、Cu、Zn 和 Ni 有较大载荷, 源 2 在 As 和 Hg 上有较大载荷, 这与相关分析的结果是一致的.

表 4 研究区土壤重金属含量因子分析旋转后成分矩阵

Table 4 Rotated composition matrix of soil heavy metal content factor analysis in the study area

元素	因子 1	因子 2	公因子方差
Cd	0.713	-0.079	0.514
As	0.062	0.942	0.892
Hg	-0.012	0.945	0.894
Cu	0.956	0.064	0.918
Zn	0.963	0.084	0.935
Ni	0.962	0.057	0.929
特征值	3.280	1.802	
解译总方差/%	54.67	30.04	
累积解译总方差/%	54.67	84.71	

因子 1 的贡献率是 54.67%, 其中 Cd、Cu、Zn 和 Ni 这 4 种重金属元素载荷最大. 通过相关分析发现, Cd、Cu、Zn 和 Ni 两两之间具有极强的相关关系. 由图 3 可知, 此 4 种土壤中的重金属元素在空间上的分布是类似的, 高值都位于东部偏北区域. 经调查, 该区西部出露的砂岩、泥岩等矿物成分 Cd 含量

相对较少,而在该断裂北东部则以富含 Cd 等重金属的泥灰岩、硅质岩和碳质页岩等为主,而寒武系下统荷塘组则以碳质页岩、硅质岩和含石煤层为主,是含 Cd 等重金属元素地质高背景区.据赋存于

此层位石煤矿山以往采样资料显示<sup>[36]</sup>,该区荷塘组地层  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{As})$  和  $\omega(\text{Hg})$  平均值分别为 0.91、142.98、30.90、21.18、25.12 和 1.46  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 同浙江省丰度值进行比

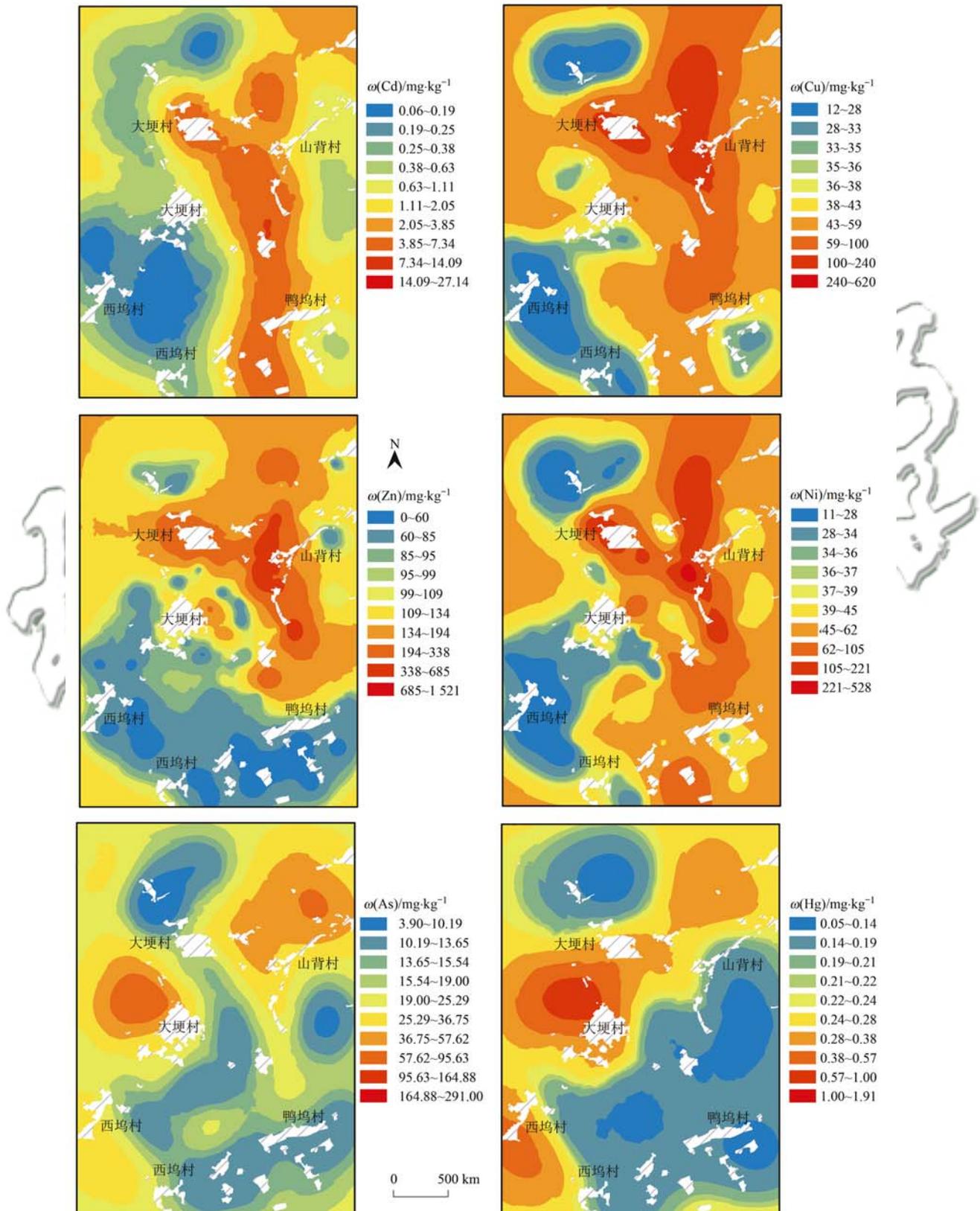


图3 研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil heavy metal contents in the study area

较<sup>[37,38]</sup>, Hg、Cd、Cr、As、Ni 和 Cu 重金属元素富集系数分别为 48.67、12.13、3.76、5.31、1.63 和 1.32, 其中 Cd 元素含量是浙江省丰度值的 12.13 倍, 高地质背景是该区土壤 Cd、Cu、Zn 和 Ni 这 4 种元素分布于断裂东部的重要因素。另外, 通过对全县荷塘组 1:5 万土地质量调查资料的统计和分析, 发现全县荷塘组地层中, 土壤  $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{As})$  和  $\omega(\text{Hg})$  平均值分别为 1.18、47.82、45.3、23.98 和  $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 这表明, 在没有开采的荷塘组表面土壤中的重金属含量要比本区的相应的重金属含量低很多, 说明该区除了地质高背景外, 荷塘组石煤在矿山开发和开发结束后, 开采宕面长期处于裸露状态, 随着物理化学条件变化, 加剧了该岩石中的重金属元素的进一步释放, 导致了该区土壤中的重金属含量逐渐升高。其中土壤 Cd 元素含量高值区呈南北向分布, 并向北部石煤矿山范围逐步扩大, 导致污染最严重的区域以该区北部和东部为主。本研究认为导致本区中部地区大规模土壤 Cd、Cu、Zn 和 Ni 污染的主要原因是由于长期受 NW 向河流和近南北向水沟的影响, 将北东地区的石煤矿 Cd 等高地质背景下形成的成土母质由北西运移至南东部所致。从前人在研究区北西向溪流和近南北向水沟两条水系经石煤矿山流自中部耕地水渠中沿线采集底泥重金属含量显示<sup>[39]</sup>, Cr 和 Pb 平均含量低于常山县背景值, 而 Cd、Ni、As、Cu、Zn 和 Hg 含量则显著高于常山县背景值, 分别是县背景值含量的 226.89、9.39、3.11、10.11、5.12 和 2.71 倍, 说明这些元素在底泥中有较大的积累, 它们受重力作用, 沿着水系流入农田; 因此底泥的逐步沉积也是造成农田土壤重金属超标的一个重要原因, 而底泥中 Cd 的累积效应最大, 对农田的环境污染最大。综合以上分析, 石煤矿由于长期的开采, 产生了大量的废气、废水和废渣, 在风吹日晒和雨水的冲刷作用下, 这些富含有机质和硫化物的岩体在表生环境中变得极不稳定, 在风化和侵蚀作用下, 致使有毒有害重金属元素逐步从岩石中释放, 富含 Cd、Ni、Cu 和 Zn 等重金属元素的含碳硅质岩和石煤层形成的成土母质, 通过由北向南的水流灌溉和大气沉降作用, 使耕地土壤中 Cd、Cu、Zn 和 Ni 等元素形成富集<sup>[40~43]</sup>。综合分析, 因子 1 表示“矿业活动源和自然源”。

因子 2 中载荷 Hg 和 As 均具有明显的相关关系, 说明它们具有类似的地球化学特征, 其解译总方差即贡献率为 30.04%。从图 3 可以看出, Hg 和 As 的含量在空间上均表现出明显的 NE 特征, Hg 元素含量最高的区域集中在大埂村和西坞村周围, 其次

是石煤矿山周边, 南东部鸭坞村和山背村一带的 Hg 含量则相对较低, Hg 的土壤平均含量值高于该县 Hg 的背景值。As 元素的高值区以大埂村为主, 石煤矿周边次之, 与低值区界限明显。结果表明, 通过地表水淋滤, 大面积裸露的含煤岩层或煤矸石堆积物, 都会对周围土壤中的重金属元素分布产生直接的影响<sup>[44]</sup>。其他的研究也表明, 大部分 Hg 的产生是由于人类活动引起的<sup>[45]</sup>。上述研究结果亦显示, 荷塘组地层岩性中 Hg 和 As 这 2 种元素的含量也很高, 在以往矿山开采中, 受全年主导风向 ENE 影响, 石煤矿的这 2 种元素会以粉尘方式不断地向下风口大埂村周围的农田中迁移。根据该县调查数据<sup>[39]</sup>, 大埂村周边地块的大气污染主要是 Hg 和 As, 按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 的规定<sup>[46]</sup>, 评价了上述这两种元素的质量。结果显示  $\rho(\text{As})$  范围  $0.0136 \sim 0.0168 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均值为  $0.0148 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 高于标准要求  $0.006 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\rho(\text{Hg})$  范围  $0.0559 \sim 0.0616 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均值为  $0.0588 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 高于标准要求  $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。认为目前石煤矿山未经治理, 基岩裸露的范围很大, 经过长时间的淋滤风化, 矿山中 Hg、As 等元素仍然受到风向 ENE 的影响, 呈粉尘状向南西方向排放。此外, 研究区西坞村南边 100 m 处有一家大型石灰制水泥企业, 年排放废气颗粒物 304.498 t<sup>[39]</sup>, 该企业虽然地处下风口, 但主要采用煅烧生产工艺, 在破碎和煤粉输入到回砖窑的过程中, 各工序都会不同程度产生粉尘, 在静风期, 粉尘主要迁移至周边西坞村到大埂村低洼地, 在周围农田土壤进行沉淀和吸附, 导致这 2 种元素在大埂村一带耕地中的含量较高; 据检测, 大埂村周围有机肥中  $\omega(\text{As})$  平均值为  $17.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 超出了有机肥料标准  $15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的规定<sup>[47]</sup>, 计算由化学肥料引入每亩田的 As 质量最高可达 10.62 g。以上说明该范围 As 和 Hg 高累积效应主要来源于石煤矿山和水泥企业释放的飞灰, 少量来自农业源, 故因子 2 主要是由“工业源”所致。

### 2.3.2 土壤重金属污染来源定量剖析

(1) APCS-MLR 分析重金属来源贡献拟合度  
利用主成分分析, 将 2 个主要因子分值转换为绝对主因子分值, 用实测土壤中重金属元素的含量为因变量, 以绝对因子得分为自变量进行多元线性回归分析, 结果见表 5。可决系数  $R^2$  是用于衡量模型与实际观测值的相关性, 当其数值越接近 1 时, 其线性拟合度越高, 则愈能达到较好的模拟结果<sup>[35]</sup>。本研究中各元素回归模型  $R^2$  均在 0.9 左右, 只有 Cd 可决因子略低, 为 0.514。结果表明, 各个因子的复相关系数都在 0.7 以上, 这表明了该模式的适用性。

表 5 线性回归模型系数<sup>1)</sup>

Table 5 Linear regression model coefficient

项目		未标准化系数		标准化系数	<i>t</i>	显著性	<i>R</i> <sup>2</sup>
		<i>B</i>	标准误差	Beta			
Cd	常量	0.341	0.426		0.801	0.425	0.514
	S1	2.962	0.244	0.713	12.148	0.000	
	S2	-0.328	0.244	-0.079	-1.345	0.181	
As	常量	-4.877	1.361		-3.582	0.000	0.892
	S1	1.754	0.779	0.062	2.250	0.026	
	S2	26.565	0.779	0.942	34.080	0.000	
Hg	常量	0.045	0.011		4.277	0.000	0.894
	S1	-0.003	0.006	-0.012	-0.442	0.660	
	S2	0.207	0.006	0.945	34.421	0.000	
Cu	常量	-7.065	3.563		-1.983	0.049	0.918
	S1	81.017	2.040	0.956	39.710	0.000	
	S2	5.389	2.040	0.064	2.641	0.009	
Zn	常量	5.929	7.136		0.831	0.407	0.935
	S1	183.428	4.086	0.963	44.897	0.000	
	S2	16.056	4.086	0.084	3.930	0.000	
Ni	常量	2.579	2.614		0.986	0.326	0.929
	S1	64.063	1.497	0.962	42.798	0.000	
	S2	3.792	1.497	0.057	2.533	0.012	

1) *B* 值为回归系数和截距(常数项); S1 和 S2 分别表示污染源 1 和源 2 对各重金属元素因子的回归系数; *t* 表示 *t* 检验过程值,为 *B* 与标准误差相除结果; *R*<sup>2</sup> 表示可决系数

(2) APCS-MLR 的污染源贡献率结果 用线性回归模型系数和绝对因子得分求出源平均绝对贡献量和源对各重金属指标的贡献率,由计算可知,As、Cd、Cu、Zn、Ni 和 Hg 解析值与实际样本的比值分别为 1.18、1.16、1.10、0.97、0.96 和 0.85,这 6 种金属元素比值都大于 0.8,这表明了本模型分析的正确性和可信度.由图 4 可看出,源 1 中主要来源于矿业活动源和自然源的为 Cd、Cu、Zn 和 Ni,其中以 4 种重金属的贡献率最高,分别为 78.53%、84.41%、87% 和 89.13%;源 2 中 As 和 Hg 主要来源于工业源,其对 As 和 Hg 贡献率最大,分别为 82.41% 和 83.22%;此外,在此研究区中,白柱是其他污染源的主要成分,贡献率较大的有 Hg(15.95%)、As(13.36%) 和 Cd(10.27%) 这 3 种元素,其来源尚需进一步研究,从而进一步揭示出此研究区中各种

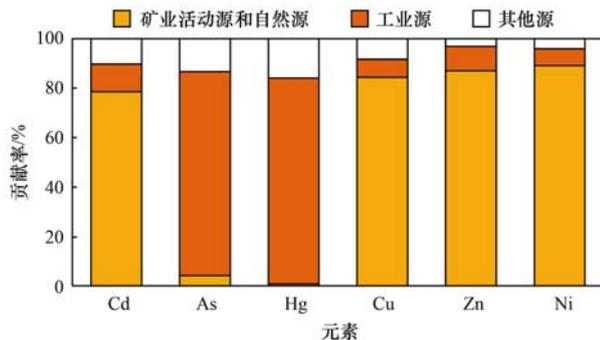


图 4 研究区土壤重金属污染源贡献率

Fig. 4 Contribution rates of soil heavy metal pollution sources in the study area

重金属来源的多样性和复杂性.从图 5 中主要污染源贡献量分配可以看出,在山背村至石煤矿出,源 1 中高 Cd 含量区域多呈南北向,受以往采矿活动影响较大;源 2 中 As 高值区位于大梗村一带,受石煤矿山和企业排放大气粉尘污染影响较大.

## 2.4 管控对策

(1) 矿山在在原酸性污水处理的基础上,采用堵水、封闭覆盖和生态修复等措施.为防止废水从废渣中排出,可采用拦水沟、挡渣墙、遮盖渣土等方法;为避免裸露岩面的基岩因风化而导致的重金属粉尘的排放,采取喷浆挂网、岩面打眼并浇注防火材料和植生袋喷洒复绿等措施;矿山污水可经管线集中收集,经处理达标后排放.

(2) 对灌溉水渠中底泥进行定期清理并进行合理堆放,减少底泥中过量积累的重金属因灌溉水造成农田环境污染.

(3) 对石灰制水泥企业,要积极引进和研发新的环保技术和设备,对其潜在的污染源进行动态监测,督促其加大投入,确保其达标排放,减少环境污染.

(4) 加大科技施肥技术的推广和应用,监督和评估有机化肥等农资,达到合格的投入条件,同时配合使用调理剂等方法调节 pH,提高土壤肥力;降低土壤中的重金属含量,增加农产品的食品安全性.

(5) 实施“一对一”的农地联合监测.根据本地农产品存在的生态风险,对于安全利用类耕地可采

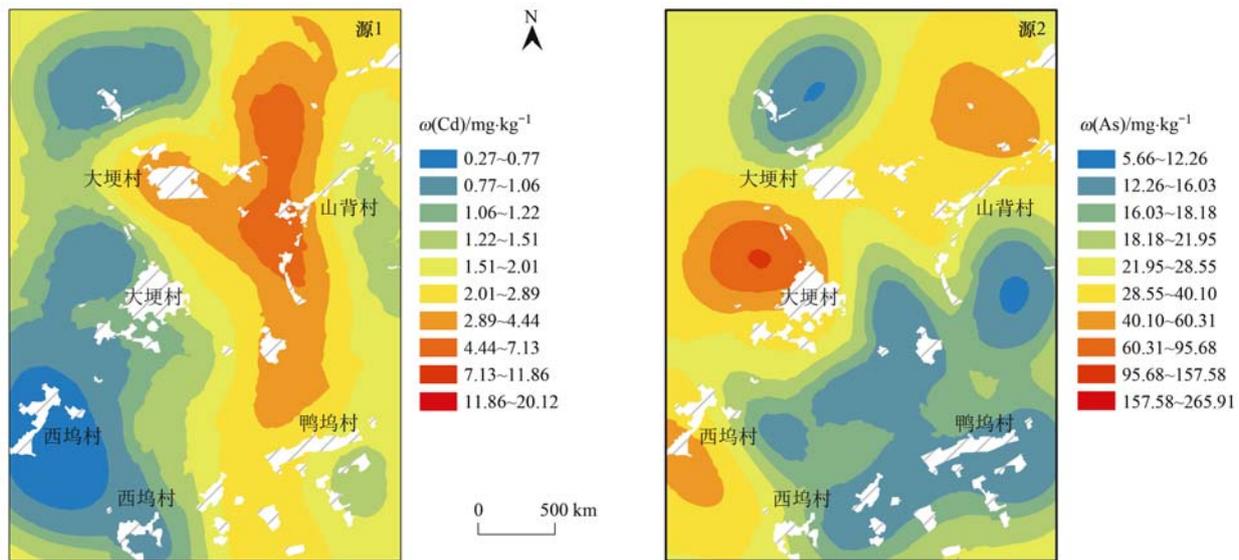


图5 源1土壤Cd和源2土壤As含量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Cd from source 1 and As from source 2

取农艺调控、作物筛选试验、低累积作物替代种植等措施,实现农业安全使用;对于严格管控类耕地,根据实际情况,加大纤维类、染料类、观赏类等经济类作物的推广或种植重金属高富集乔灌木等措施进行修复,重要区域则采用综合整治和生态修复等措施。

### 3 结论

(1)研究区农田土壤重金属 Cd、As、Cu、Ni、Zn 和 Hg 含量平均值均显著高于常山县表层土壤地球化学背景值,超过土壤环境质量标准风险筛选值范围,点位超标率从大到小依次为: Cd > As > Cu > Ni > Zn > Hg,其中 Cd 含量超过风险筛选值点位超标率最高,达到 66.67%,Cd 和 As 这 2 种元素超过风险管制值,表明该区域的重金属含量在一定程度上积累,土壤 Cd 元素存在严重污染风险,农产品中也存在 Cd 超标的生态风险,认为土壤 Cd 含量过高是造成农产品 Cd 超标的重要因素。

(2)地统计学分析表明,该区土壤中镉的空间分布具有明显的东西分布特征,高值区主要位于该区的 NW 向断层东段,并呈南北走向,尤以石煤矿山附近含量较高,高 Cd 含量分布与石煤矿山开发密切相关;As 含量高值区呈北东向,主要分布于大埂村、山背村一带,其成因与大气沉降的飞灰有关。

(3)研究区农田耕地土壤中 6 种重金属元素的积累,以矿业活动源、自然源和工业源为主。矿业活动源和自然源对 Cd、Cu、Zn 和 Ni 具有较大贡献率,其贡献率分别为 78.53%、84.41%、87% 和 89.13%;工业源对 As 和 Hg 贡献率最大,分别为 82.41% 和 83.22%。

(4)研究结果显示,将 PCA-APCS-MLR 技术和地统计技术相结合,可实现对该地区典型农田土壤重金属污染成因的量化分析,明确各个污染源的贡献率空间展布,提出开展矿山修复、底泥清除、土壤与农产品协同监测等针对性的污染源管控措施,为当地农田土壤重金属修复治理和风险管控提供理论依据。

致谢:论文撰写过程中得到中国科学院南京土壤研究所瞿明凯博士和浙江省地质调查院卢新哲博士等人的指导和建议,在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 帅鸿, 欧阳迪庆, 陈玉成. 基于文献计量的我国农地重金属研究热点分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 688-695.
- [2] Shuai H, Ouyang D Q, Chen Y C. Hotspot issues of heavy metals in China's farmland based on bibliometrics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(4): 688-695.
- [3] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 690-700.
- [4] 环境保护部国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content\\_2661765.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2014-04/17/content_2661765.htm), 2014-04-17.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 陈秋会, 席运官, 王磊, 等. 产地环境中重金属和有机污染物对农产品质量的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 5-8.
- [8] 肖青青, 王宏斌, 赵宾, 等. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):

- 271-281.
- Xiao Q Q, Wang H B, Zhao B, *et al.* Heavy metal pollution in crops growing in suburb of Gejiu City, Yunnan Province, China: Present situation and health risk [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(2): 271-281.
- [7] 国务院. 土壤污染防治行动计划[R]. 北京: 人民出版社, 2016.
- [8] 于林松, 万方, 范海印, 等. 姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4199-4211.
- Yu L S, Wan F, Fan H Y, *et al.* Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of soil heavy metals in Jianghugongmi Producing area, Shandong Province[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4199-4211.
- [9] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, *et al.* Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1093-1104.
- [10] 孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 应用铅铈同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1566-1575.
- Sun J W, Yu R L, Hu G R, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and tracing sources by Pb & Sr isotope in the soil profile of woodland in Quanzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1566-1575.
- [11] 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 430-437.
- Huang H B, Lin C Q, Hu G R, *et al.* Source appointment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong river basin based on positive matrix factorization [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 430-437.
- [12] 方璇, 耿长君, 徐友海, 等. 污染物的源解析技术研究进展[J]. *化工科技*, 2007, **15**(3): 60-64.
- Fang X, Geng C J, Xu Y H, *et al.* Research progress on source apportionment of pollutants [J]. *Science & Technology in Chemical Industry*, 2007, **15**(3): 60-64.
- [13] Cao J J, Wang Q Y, Chow J C, *et al.* Impacts of aerosol compositions on visibility impairment in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**: 559-566.
- [14] 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.
- [15] Liu Y, Liu G J, Yousaf B, *et al.* Carbon fractionation and stable carbon isotopic fingerprint of road dusts near coal power plant with emphases on coal-related source apportionment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **202**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110888.
- [16] 刘昭玥, 费杨, 师华定, 等. 基于 UNMIX 模型和莫兰指数的湖南省汝城县土壤重金属源解析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(10): 2446-2458.
- Liu Z Y, Fei Y, Shi H D, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Rucheng county of Hunan province based on UNMIX model combined with Moran Index [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(10): 2446-2458.
- [17] 霍明珠, 高秉博, 乔冬云, 等. 基于 APCS-MLR 受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(5): 978-986.
- Huo M Z, Gao B B, Qiao D Y, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil based on the APCS-MLR model [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(5): 978-986.
- [18] 曹佳艺. 基于 UNMIX 模型的农田土壤重金属源解析及污染损失评价——以南方某镇为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Cao J Y. Source analysis and pollution loss assessment of heavy metals in farmland soil based on UNMIX model: A case study of a town in South China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [19] 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 等. 基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3904-3912.
- Guan X X, Zhou X P, Lei C N, *et al.* Source apportionment of soil PAHs in Lanzhou based on GIS and APCS-MLR model[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3904-3912.
- [20] 吕柏楠, 王超, 师华定, 等. 基于受体模型与地统计的耕地土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(12): 2962-2969.
- Lü B N, Wang C, Shi H D, *et al.* Analysis of heavy metal pollution sources in cultivated land soil based on receptor model and geostatistics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(12): 2962-2969.
- [21] 刘慧琳, 葛畅, 沈强, 等. 铁矿废弃地复垦土壤重金属来源解析研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(2): 317-324.
- Liu H L, Ge C, Shen Q, *et al.* Source apportionment of heavy metals in reclaimed soil of iron mine wasteland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(2): 317-324.
- [22] 周漪, 李良传, 刘道荣, 等. 常山县土地质量地质调查报告[R]. 杭州: 中化地质矿山总局浙江地质勘察院, 2019.
- [23] 宋明义. 浙西地区下寒武统黑色岩系中硒与重金属的表生地球化学及环境效应[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- Song M Y. Research on supergenic geochemistry and environmental effects of selenium and heavy metals in the lower cambrian black series of Western Zhejiang province, China [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [24] 刘道荣, 徐虹, 周漪, 等. 浙西常山地区富硒土壤特征及成因分析[J]. *物探与化探*, 2019, **43**(3): 658-666.
- Liu D R, Xu H, Zhou Y, *et al.* Characteristics and genetic analysis of selenium-rich soil in Changshan County, western Zhejiang Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, **43**(3): 658-666.
- [25] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [26] DD 2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S].
- [27] 杨育振, 刘森荣, 杨勇, 等. 黄石市城市边缘区土壤重金属分布特征、风险评价及溯源分析[J]. *物探与化探*, 2021, **45**(5): 1147-1156.
- Yang Y Z, Liu S R, Yang Y, *et al.* Heavy metals in periurban soil of huangshi: their distribution, risk assessment and source identification [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, **45**(5): 1147-1156.
- [28] 贾ZY, 王JX, 周XD, *et al.* Identification of the sources and influencing factors of potentially toxic elements accumulation in the soil from a typical karst region in Guangxi, Southwest China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**, doi:

- 10.1016/j.envpol.2019.113505.
- [29] 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.
- [30] 后希康, 张凯, 段平洲, 等. 基于 APCS-MLR 模型的沱河流域污染来源解析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(10): 2350-2357.  
Hou X K, Zhang K, Duan P Z, *et al.* Pollution source apportionment of tuohe river based on absolute principal component score-multiple linear regression [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(10): 2350-2357.
- [31] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.  
Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on 61 elements of soils in China [J]. Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.
- [32] 解怀生, 郭先明, 潘卫丰, 等. 浙西北地区 1:25 万多目标地球化学调查成果报告[R]. 杭州: 浙江省地质调查院, 2017: 61.
- [33] 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].
- [34] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [35] 袁宏, 钟红梅, 赵利, 等. 基于 PCA/APCS 受体模型的崇州市典型农田土壤重金属污染源解析[J]. 四川环境, 2019, **38**(6): 35-43.  
Yuan H, Zhong H M, Zhao L, *et al.* Analysis of heavy metal pollution sources of typical farmland soils in chongzhou city based on PCA/APCS receptor model[J]. Sichuan Environment, 2019, **38**(6): 35-43.
- [36] 王美华, 刘道荣, 周漪, 等. 土地质量调查与污染防治团队 2018-2020 年度总结报告[R]. 杭州: 中化地质矿山总局浙江地质勘查院, 2020.
- [37] 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 等. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 1997, **21**(6): 451-459.  
Yan M C, Chi Q H, Gu T X, *et al.* Chemical compositions of continental crust and rocks in eastern china[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, **21**(6): 451-459.
- [38] 吴坤泉, 俞国华, 韩竟成, 等. 浙江省区域地层岩石地球物理地球化学参数研究报告[R]. 杭州: 浙江地矿厅地球物理地球化学勘查院, 1991.
- [39] 杨强, 喻文超, 陈尚超, 等. 常山县耕地污染源解析报告[R]. 温州: 浙江省第十一地质大队, 2021.
- [40] 王娟. 铜陵新桥矿区大气-植物-土壤系统重金属污染特征及铅同位素源解析[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.  
Wang J. Pollution characteristics and lead isotope source apportionment for heavy metals in atmosphere-plant-soil system around Xinqiao Mining area in Tongling [D]. Hefei: Anhui University, 2019.
- [41] 魏迎辉, 李国琛, 王颜红, 等. PMF 模型的影响因素考察——以某铅锌矿周边农田土壤重金属源解析为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(11): 2549-2559.  
Wei Y H, Li G C, Wang Y H, *et al.* Investigating factors influencing the PMF model: A case study of source apportionment of heavy metals in farmland soils near a lead-zinc ore[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(11): 2549-2559.
- [42] Kumar M, Furumai H, Kurisu F, *et al.* Tracing source and distribution of heavy metals in road dust, soil and soakaway sediment through speciation and isotopic fingerprinting [J]. Geoderma, 2013, **211-212**: 8-17.
- [43] Huang Y, Zhang S P, Chen Y, *et al.* Tracing Pb and possible correlated Cd contamination in soils by using lead isotopic compositions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **385**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121528.
- [44] 许可, 杨森, 任梦溪, 等. 复杂污染源下采煤沉陷区土壤重金属分布及行为特征[J]. 环境监测管理与技术, 2021, **33**(6): 29-34.  
Xu K, Yang S, Ren M X, *et al.* Distribution and behavior characteristics of heavy metals in soil from coal mining subsidence area with complex pollution sources[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, **33**(6): 29-34.
- [45] 卢新哲, 魏迎春, 黄春雷, 等. 长江下游典型黑色页岩区土壤重金属累积特征研究[J]. 环境生态学, 2020, **2**(10): 29-38.  
Lu X Z, Wei Y C, Huang C L, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in soil in typical black shale area in the lower reaches of the Yangtze river[J]. Environmental Ecology, 2020, **2**(10): 29-38.
- [46] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [47] NY 525-2012, 有机肥料[S].

## CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals .....	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China .....	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory .....	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City .....	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM <sub>2.5</sub> Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> During the Heating Period in Baoding .....	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution for Nanjing .....	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020 .....	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island .....	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models .....	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM <sub>2.5</sub> as Well as O <sub>3</sub> Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020 .....	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022 .....	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province .....	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an .....	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City .....	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin .....	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin .....	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River .....	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing .....	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes .....	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River .....	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City .....	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin .....	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir .....	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light .....	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar .....	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment .....	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar .....	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant .....	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis .....	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China .....	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China .....	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models .....	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye .....	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin .....	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain .....	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau .....	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields .....	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community .....	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N <sub>2</sub> O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas .....	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland .....	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield .....	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model .....	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province .....	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou .....	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China .....	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method .....	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics .....	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area .....	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone .....	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City .....	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City .....	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials .....	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables .....	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province .....	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning .....	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)