

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

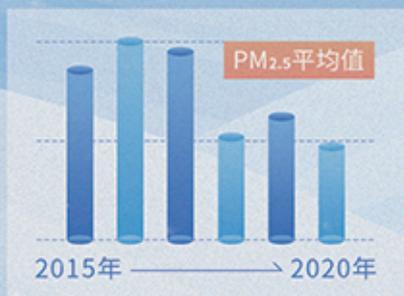
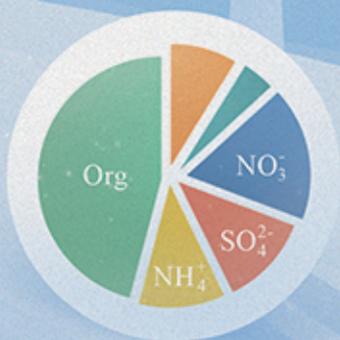
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM_{2.5} 污染特征分析..... 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)

天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析..... 郝困, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)

长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响..... 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)

滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价..... 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)

典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性..... 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓雨, 徐勃, 耿春梅(3934)

大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源..... 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径..... 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)

京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估..... 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)

2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征..... 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)

钢铁生产行业二氧化硫污染特征变化及其排放因子..... 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)

长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价..... 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)

基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析..... 鹿阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军(4008)

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例..... 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算..... 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)

河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响..... 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源..... 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价..... 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)

天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策..... 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例..... 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽(4097)

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析..... 杜瑛琦, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)

太湖氧化亚氮(N₂O)排放特征及潜在驱动因素..... 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价..... 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果..... 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)

环境 pH 条件下 Fe²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素..... 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)

新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价..... 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)

宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征..... 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素..... 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法..... 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)

姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估..... 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测..... 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)

柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险..... 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性..... 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞瑛, 赵海洋(4232)

橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力..... 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力..... 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)

连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响..... 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响..... 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响..... 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春(4292)

水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系..... 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强(4301)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响..... 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响..... 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)

基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响..... 鹿发虎, 李晓琦, 段荆阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)

汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子..... 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)

岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较..... 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松(4353)

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素..... 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响..... 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)

秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N₂O 排放的影响..... 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响..... 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响..... 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比..... 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)

《环境科学》征订启事(4211) 《环境科学》征稿简则(4312) 信息(3922, 4031, 4107)

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

于林松^{1,2,3,4}, 万方^{1,2,3}, 范海印^{1,2}, 康桂玲^{1,2}, 刘辉^{1,2}, 王东平^{1,2}, 徐佳^{1,2}

(1. 山东省物化探勘查院, 济南 250013; 2. 山东省土壤地球化学工程实验室, 济南 250013; 3. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 济南 250013; 4. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059)

摘要: 研究名特优产品土壤重金属分布、来源及其潜在风险对科学管理、安全利用土壤和作物资源具有重要意义。以姜湖贡米产地为研究对象, 对名特优产地土壤中的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 进行采样和测定, 利用多元统计法进行重金属的相关性讨论, 采用 ArcGIS 10.2 进行重金属空间分布插值分析, 利用富集因子法和 PMF 法对重金属污染进行定量源解析, 并进行了潜在生态风险评价。结果表明: ① 研究区土壤重金属 As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 含量均低于农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618-2018) 规定的筛选值, 土壤生态环境风险低; Cr 和 Ni 最大值均超风险筛选值, 但风险低; 研究区 pH 主要分布范围为 6.05~6.69, 是适合水稻生长的 pH 范围。② 墨河对 pH 和重金属的空间分布具有指示意义。这与元素的表生地球化学特征息息相关; 而 Hg 和 Cd 受人为影响显示了不同的空间分布特征, Hg 沿河流西侧为中高值分布区, Cd 的空间分布南北差异较为显著。③ 基于富集因子法和 PMF 的定量源解析结果显示, 研究区重金属主要来源为耕地农业源、混合源、燃煤源和自然源。各种来源的贡献率分别占 24.2%、35.4%、9.5% 和 30.9%。④ 研究区 Hg 中强生态风险指数沿墨河西侧分布, 而 Cd 的中度潜在生态风险点集中在墨河两侧耕地中, 其他元素潜在生态风险指数 (E_r) 均 < 40。Cd 和 Hg 为研究区主要潜在生态风险元素, 而 Cd 仍是研究区耕地土壤中的主要潜在污染元素。

关键词: 姜湖贡米; 重金属; 空间分布; 源解析; 潜在生态风险指数

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4199-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202112133

Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province

YU Lin-song^{1,2,3,4}, WAN Fang^{1,2,3}, FAN Hai-yin^{1,2}, KANG Gui-ling^{1,2}, LIU Hui^{1,2}, WANG Dong-ping^{1,2}, XU Jia^{1,2}

(1. Shandong Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Ji'nan 250013, China; 2. Shandong Provincial Engineering Laboratory for Soil Geochemistry, Ji'nan 250013, China; 3. Shandong Provincial Engineering Research Center for Geological Prospecting, Ji'nan 250013, China; 4. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Taking the Jianghugongmi producing area as the research object, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn in the soil of the study area were sampled and determined. The correlation of heavy metals was discussed using the multivariate statistical method, the spatial distribution interpolation analysis of heavy metals was carried out using ArcGIS 10.2, the quantitative source analysis of heavy metal pollution was carried out using the enrichment factor (EF) and PMF methods, and the potential ecological risk was evaluated. The results showed that the contents of the soil heavy metals As, Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn were lower than the screening values specified in the standard for soil pollution risk control of agricultural land (GB 15618-2018), and the soil ecological environment risk was low; the maximum values of Cr and Ni exceeded the risk screening values, but the risk was low. The main distribution range of pH in the study area was 6.05-6.69, which was suitable for rice growth. The Mohe River indicated the spatial distribution of pH and heavy metals, which was closely related to the supergene geochemical characteristics of the elements. However, Hg and Cd showed different spatial distribution characteristics under human influence. Hg was distributed in the middle and high value distribution area along the west side of the river, and the spatial distribution of Cd was significantly different from north to south. The quantitative source analysis results based on the EF method and PMF showed that the main sources of heavy metals in the study area were agricultural sources, mixed sources, coal sources, and natural sources. The contribution rates of various sources accounted for 24.2%, 35.4%, 9.5%, and 30.9%, respectively. The medium strong ecological risk points of Hg in the study area were distributed along the west side of the Mohe River, whereas the moderate potential ecological risk points of Cd were concentrated in the cultivated land on both sides of the Mohe River, and the potential ecological risk index (E_r) of the other elements was < 40. Cd and Hg were the main potential ecological risk elements in the study area, whereas Cd was still the main potential pollution element in the cultivated land soil in the study area.

Key words: Jianghugongmi; heavy metals; spatial distribution; source apportionment; potential ecological risk index

耕地土壤是农业生产的主要载体和生态环境的重要组成部分,其质量好坏与人们生活密切相关。据统计^[1],我国耕地土壤重金属中-重度污染或超标的点位比例为 2.5%,覆盖面积 23 253 km² (约 3 488 万亩),轻微-轻度污染或超标的点位比例为 5.7%,覆盖面积 52 660 km² (约 7 899 万亩)。文献[2]显示,当

前影响农用地土壤环境质量的主要污染物仍是重金属,其中镉为首要污染物。由此可见,日益加剧的土

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-01-06

基金项目: 山东省地质勘查基金项目(2018(49)); 山东地矿局地质勘查项目(KC2018010)

作者简介: 于林松(1980~),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为土地资源环境及农业地质, E-mail: sean_yls@163.com

壤重金属污染已经严重影响了我国农业的可持续发展. 土壤重金属污染难降解、持久性强, 且能够通过粮食等作物进入食物链, 从而危害人体健康^[3,4]. 有研究表明^[5,6], 近年来耕地土壤重金属污染相关领域发文量持续增长. 这其中有相当一部分研究集中在耕地重金属生态风险评价与污染源解释方面^[7,8]. 比如, 尚二萍等^[9]基于中国五大粮食主产区耕地土壤重金属实测数据和历史数据的对比研究表明, 我国粮食主产区耕地土壤重金属点位超标率为 21.49%, 整体以轻度污染为主, 其中 Cd 和 Hg 超标以人为源为主, 其余重金属以自然源为主. 魏洪斌等^[10]对宜兴市耕地土壤重金属调查结果显示, Cd 和 Hg 为宜兴市主要污染元素, Cd 的生态风险贡献率达 57.46%, 重金属污染主要为化工源. 柴磊等^[11]的调查发现, 兰州市耕地土壤重金属呈现不同程度的超标现象, 72.25% 的样点出现 Hg 的强生态风险, 定量源解析结果显示 8 种重金属有 4 种主要来源. 由此可见, 加强对耕地重金属污染状况的风险评价是应对粮食安全生产的必要举措.

山东省是我国典型的北方水稻高产产区之一^[12], 水稻主要沿河湖及涝洼地分布, 可划分为济宁滨湖稻区、临沂库灌区及沿黄稻区^[12,13]. 姜湖贡米是山东省名特优农产品. 其产地处于沭河流域之墨河小流域, 属于临沂库灌稻区. 姜湖贡米米质晶莹剔透, 软筋香甜, 适口性强, 营养丰富, 加之特定的产地条件和丰富的人文历史, 2012 年 8 月被确认为中国国家农产品地理标志产品. 目前, 有关山东稻米产地土壤重金属污染的研究相比较于其他果蔬产地土壤重金属污染研究还较少, 相关研究主要集中在山东稻米产地环境质量^[13,14]、土壤肥力和营养指标评

价^[14,15]等方面. 而针对山东省名特优稻米产地土壤重金属污染状况的专门研究尚未见报道. 本文以山东省姜湖贡米产地表层土壤(0~20 cm)为研究对象, 分析土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 这 8 种重金属的含量, 采用统计分析、地理信息制图和表生地球化学等方法, 探讨耕地土壤重金属相关性及其空间分布特征. 通过富集因子与 PMF 定量源解析方法对姜湖贡米产地土壤重金属来源进行判识, 同时对产地环境潜在生态风险进行评价, 以期姜湖贡米的安全生产及山东省名特优产业的持续发展提供地球化学依据.

1 研究区概况

研究区位于山东省郯城县南部沂沭河流域之墨河小流域(图 1), 是山东省名特优“姜湖贡米”主要产地, 是地理标志保护的区域. 地理坐标为: 118°13'10"~118°19'53"E, 34°28'24"~34°34'09"N. 该区属东亚暖温带季风气候, 常年风向 ESE, 四季分明, 雨热同季. 年均日照时数为 2354.5 h, 日照率为 53%. 年平均气温为 13.2℃, 无霜期 212 d. 年平均降雨量为 835.5 mm, 其中 ≥0℃ 的(农耕期)降水量 809.4 mm, 占年总量的 97%; ≥10℃ 的(喜温作物生长季)降水量 733.5 mm, 占年总量的 88%; ≥20℃ 的(喜温作物活跃生长季)降水量 569.6 mm, 占年总量的 68%. 这种雨热同季的特点, 有利于水稻的生长^[16]. 研究区位于沂沭河冲积平原中部, 地势平坦, 平均海拔为 38.0 m. 研究区位于鲁中隆起区的马头凹陷和沂沭断裂带的郯城凹陷. 区内第四系覆盖广泛, 厚度大. 成土母质主要为全新世临沂组(Qhl)河流冲积相碎屑沉积和黑土湖组(Qhl)

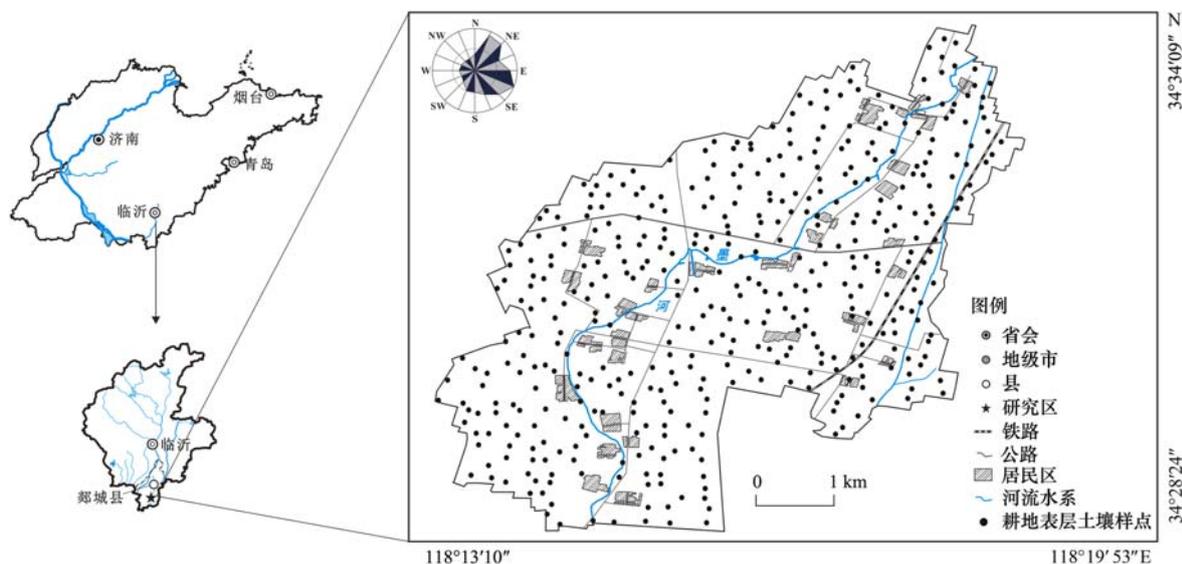


图 1 研究区位置及采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites and topographic map in the study area

湖沼相沉积,主要岩性分别为黏土质粉砂、含砾中粗砂和粉砂质黏土、黏土质粉砂。土壤类型以水稻土为主,中部沿墨河有带状黏性潮土分布。研究区以农业为主,耕地面积约 47 km²。耕地类型主要为水浇地和水田。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析测试

以研究区土地利用现状为工作底图,重点对姜湖贡米产地所在的墨河两侧耕地分布区进行了样品采集。本次参与统计的耕地土壤样品为 427 件。采样过程中严格按规范操作,连续取地表至 20 cm 深的表层土柱样,每个样点由 5 个子样混合组成 1 件样品。原始新鲜样品质量 ≥ 1 500 g。

土壤样品置于通风处自然风干,过 10 目(孔径 2 mm)尼龙筛;缩分法取 100 g 样品研磨过 200 目(孔径 75 μm)尼龙筛,用于重金属元素分析。重金属元素分析方法为:① Pb、Ni、Cr、Zn、Cu 和 TFe₂O₃ 采用 X-射线荧光光谱法测定(Axios^{max}, PANalytical B. V., Holland)。称取 4.00 g 样品,均匀放入低压聚乙烯塑料环中,置于压力机上,经粉末压饼法成型后用于测定。② Cd 采用石墨炉原子吸收光谱法测定(GF-AAS, PE600, thermo Elemental, USA)。称取 0.250 0 g 样品,置于聚四氟乙烯坩埚中,加入混合酸(HF-HClO₄-HNO₃)进行消解,定容摇匀用于测定。③ As 和 Hg 采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定(AFS9750, 北京海光仪器, 中国)。称取 0.500 0 g 样品,置于比色管中,加入王水,水浴溶解,用 10% 盐酸定容摇匀用于测定。pH 采用电位法(PHS-3C, 上海精密科学仪器有限公司)测定。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的检出限分别为 0.2、0.02、2、1、0.000 3、2、1 和 2 mg·kg⁻¹, pH 的最小显示单位 0.01。所有指标均优于土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295-2016)的要求。试验所用玻璃器皿均用 10% 硝酸溶液浸泡 24 h,所有试剂均为优级纯,分析用水均为超纯水。测试过程中,每 50 件样品插入一件重复样和 4 件土壤国家标准物质(GBW-07403)进行质量控制,样品重复性检验合格率 91.3%~98.8%,异常点重复检查合格率 96.0%~100%,标样测定结果均在允许误差范围内。土壤样品分析测试工作由山东省地质矿产勘查开发局中心实验室完成。

2.2 数据处理

本研究中数据处理和相关参数统计采用 SPSS 19.0(IBM Inc., Armonk, NY, USA)和 Origin 2022(Origin Lab Corporation., Northampton, MA, USA)

软件。原始数据及各项统计参数小数点保留位数综合考虑国标检出限规定与实验室实际检出限的可靠位数而定。采用 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和 Bartlett 球面试验对样品数据的适用性进行检验^[17]。图件制作采用 ArcGIS 10.2(Esri, Redlands, CA, USA),图形处理采用 CorelDraw X8(Corel, Ottawa, Canada)。土壤重金属污染物的来源解析采用 PMF 模型分析软件(Ver. 5.0, EPA, USA)。

2.3 富集因子(EF)

估算人为来源对沉积物影响的常用方法是计算高于背景水平的重金属含量的归一化富集因子(enrichment factor)^[18,19]。即将测量的重金属含量相对于样品参考金属进行标准化。Fe 常被作为一种可接受的标准化元素,用于计算富集因子^[20,21]。由于 Fe 通常具有相对较高的天然含量,且 Fe 的分布与其他重金属相关性较差,受到的人为来源影响相对较小^[22]。其计算公式如下:

$$EF = (C_i/Fe)_{\text{实测值}} / (C_i/Fe)_{\text{背景值}} \quad (1)$$

式中, $(C_i/Fe)_{\text{实测值}}$ 为研究区土壤中 i 元素与 Fe 的比值; $(C_i/Fe)_{\text{背景值}}$ 为土壤地球化学背景值中 i 元素与 Fe 元素的比值。本文中 Fe 据 Fe₂O₃ 换算而来,原子量据 2005 年 IUPAC 元素周期表(IUPAC 2005 standard atomic weights), Fe 为 55.845, O 为 15.999 4。研究认为^[23],当 $EF < 0.5$ 时,表明重金属元素主要来源于地壳;当 $0.5 \leq EF \leq 1.5$ 时,表明重金属元素主要来自成土母岩或自然风化过程;当 $EF > 1.5$ 时,则表明重金属来自非成土母质或非自然风化过程,比如点源与非点源污染和人为影响等。

2.4 正定矩阵因子分解模型(PMF)

环境污染物的来源分析是污染治理的基础。PMF(positive matrix factorization)模型作为典型的受体模型是一种有效的污染物来源解析方法^[24,25],近年来得到广泛应用^[26~28]。该模型是将原始矩阵(X_{ij})分解为源成分谱矩阵(F_{ki})和分担率矩阵(G_{ik}),以及一个残差矩阵(E_{ij})。其表达式如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p (G_{ik} \times F_{kj}) + E_{ij} \quad (2)$$

式中, X_{ij} 为受体中的含量矩阵,表示 j 元素在 i 土壤样品中的含量(mg·kg⁻¹); p 为因子(即污染源)个数; G_{ik} 为因子贡献矩阵,表示 i 样品在污染源 k 中的含量(mg·kg⁻¹); F_{kj} 为因子分量谱矩阵,表示污染源 k 分量中 j 元素的含量(mg·kg⁻¹); E_{ij} 为残差矩阵,其是根据定义目标函数计算得到的。PMF 模型通过引入不确定性信息,对矩阵 X 中各元素的预测误差进行归一化,得到非负极限下的最优矩阵 G 和 F ,使目标函数 Q 最小。目标函数 Q 定义如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}^i}{U_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

式中, Q 为 PMF 的关键参数, 模型运行会显示两个版本的 Q ; U_{ij} 为元素的不确定度, 表示 j 元素在 i 土壤样品中的不确定度, 不确定度的两种计算方式为: ①当各元素的含量小于或等于相应的方法检出限 (MDL) 时, 不确定度公式为式 (4); ②当各元素的含量大于相应的方法检出限时, 不确定度公式为式 (5). 其计算公式如下:

$$U_{ij} = (5/6) \times \text{MDL} \quad (4)$$

$$U_{ij} = \sqrt{(\delta \times C)^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (5)$$

式中, δ 为相对标准偏差, C 为元素含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), MDL 为重金属方法检出限 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

2.5 潜在生态风险评价 (PERI)

潜在生态风险指数 (potential ecological risk index, PERI) 最早由瑞典学者 Hakanson^[29,30] 提出. 该方法结合毒理学、环境化学和生态效应, 通过直观和可解释的定量值来表达重金属的潜在生态风险, 是目前最为常用的评价土壤重金属污染程度和生态风险的方法^[30-33]. 其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \times (C^i/C_n^i) \quad (6)$$

$$\text{PERI} = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (7)$$

式中, C^i 为土壤重金属元素 i 的含量, C_n^i 为土壤重金属元素 i 的地球化学背景值, E_r^i 为土壤重金属元素 i 的潜在生态危害指数; T_r^i 为土壤重金属 i 的毒性响应系数, 本文参照 Hakanson^[29] 提出的重金属毒性水平顺序: $\text{Hg} (= 40) > \text{Cd} (= 30) > \text{As} (= 10) > \text{Pb} = \text{Cu} = \text{Ni} (= 5) > \text{Cr} (= 2) > \text{Zn} (= 1)$; PERI 为特定环境的综合生态风险指数, 为耕地土壤环境中每种重金属的所有风险因素的总和. 单元素潜在生态危害指数 (E_r^i) 从低到高分 5

个等级^[27,29,30]: 当 $E_r^i < 40$ 时, 为轻微生态危害; 当 $40 \leq E_r^i < 80$ 时, 为中等生态危害; 当 $80 \leq E_r^i < 160$ 时, 为强生态危害; 当 $160 \leq E_r^i < 320$ 时, 为很强生态危害; 当 $E_r^i \geq 320$ 时, 为极强生态危害. 潜在生态危害综合指数 (PERI) 从低到高分 4 个等级^[27,29,30]: 当 $\text{PERI} < 150$ 时, 为轻微生态危害; 当 $150 \leq \text{PERI} < 300$ 时, 为中等生态危害; 当 $300 \leq \text{PERI} < 600$ 时, 为强生态危害; 当 $\text{PERI} \geq 600$ 时, 为很强生态危害.

3 结果与讨论

3.1 表层土壤中重金属含量特征

描述性统计分析结果表明 (表 1), 土壤中 pH 和重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{Zn})$ 变化分别为 4.82 ~ 7.78 和 3.5 ~ 12.12、0.03 ~ 0.28、34.19 ~ 202.06、11.71 ~ 47.30、0.018 ~ 0.141、11.58 ~ 149.73、17.85 ~ 61.98 和 26.93 ~ 176.51 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与临沂市表层土壤地球化学背景值对比, 研究区土壤中 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 均值明显偏高, 超临沂市背景值点位的占比分别为 63.5%、48.7%、66.1%、82.9% 和 51.1%; 与中国表层土壤 A 层均值对比, 研究区土壤中 Cd、Cr 和 Pb 均值偏高, 超 A 层均值点位的占比分别为 74.7%、66.5% 和 51.5%. 其中, Cd、Cr 和 Pb 的平均含量均超过临沂市和中国 A 层背景值, 说明这些重金属在研究区存在不同程度的积累现象. 与农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618-2018) 相比, 土壤中的 As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 均低于农用地土壤污染风险筛选值, Cr 和 Ni 最大值高于风险筛选值. 统计结果显示, 重金属 Cr 和 Ni 的峰度与偏度较高, 表明其呈右偏态分布, 存在部分尖峰高值数据.

表 1 表层土壤重金属含量统计/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Heavy metal concentrations in the surface soils/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	pH	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
平均值 ± 均值标准	6.21 ± 0.019	7.16 ± 0.07	0.13 ± 0.002	68.21 ± 0.7	23.13 ± 0.28	0.040 ± 0.015	25.52 ± 0.45	27.15 ± 0.22	62.44 ± 0.83
最小值	4.82	3.50	0.03	34.19	11.71	0.018	11.58	17.85	26.93
最大值	7.78	12.12	0.28	202.06	47.30	0.141	149.73	61.98	176.51
标准偏差	0.40	1.44	0.04	14.53	5.72	0.016	9.24	4.61	17.17
变异系数/%	6.46	20.18	34.92	21.29	24.73	38.70	36.22	16.99	27.50
峰度	1.64	-0.40	-0.08	15.92	0.91	7.72	76.01	11.19	6.97
偏度	0.41	0.10	0.39	2.11	0.82	2.27	6.02	1.99	1.80
临沂市背景值 ¹⁾	6.43	6.50	0.125	61.10	23.70	0.028	27.30	26.10	64.50
中国背景值 ²⁾	/	11	0.097	61	23	0.065	27	26	74
	pH ≤ 6.5	30	0.3	150	50	0.5	70	90	200
风险筛选值 ³⁾	6.5 < pH < 7.5	25	0.3	200	100	0.6	100	120	250
	pH ≥ 7.5	20	0.6	250	100	1.0	190	170	300

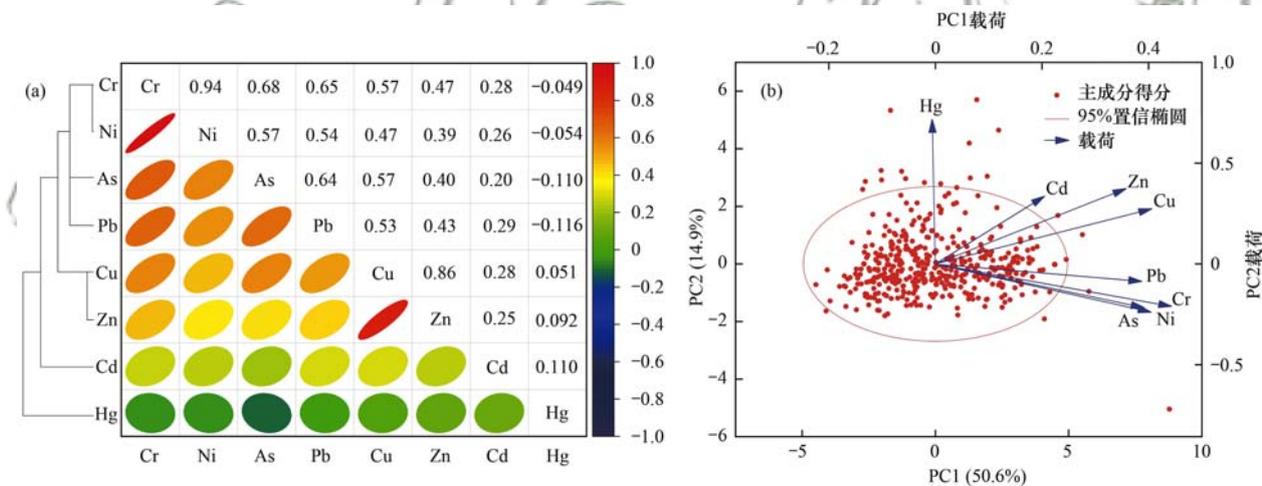
1) 表示临沂市表层土壤地球化学背景值, 来源见文献[37]; 2) 表示中国表层土壤 A 层背景值, 来源见文献[38]; 3) 表示农用地土壤污染风险管控标准 (GB 15618-2018)

变异系数是概率分布离散程度的一种归一化度量方式。一般来说离散程度越大, 变异系数就越大。根据相关研究对于变异系数(CV)大小的分级^[34,35], pH 的变异系数为 6.5%, 属于低度变异, 数据离散性不大; As、Cr、Cu、Pb 和 Zn 的变异系数分别为 20.2%、21.3%、24.7%、17.0% 和 27.5%, 属于中度变异, 而 Cd、Hg 和 Ni 的变异系数分别为 34.9%、38.7% 和 36.2%, 属于高度变异。总体而言, 研究区表层土壤 pH 值域分布较为稳定, pH 均值为 6.21, 分布在 6.05 ~ 6.69 间的点位为 256 个, 占比为 60.0%, 总体呈偏弱酸性, 认为是适合水稻生长的 pH 范围^[13,36]; 8 种重金属为中、高度变异, 其空间分布存在一定差异性。

3.2 重金属元素的相关性

对研究区表层土壤样品的 8 种重金属数据进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。首先, 对样品数据的可用性进行度量, 取样足够度 KMO 值为 0.743, 按 Kaiser 给出的 KMO 度量标准^[39], 认为研究区元素测试结果可以用作主成分分

析; Bartlett 球形检验 Sig. (概率 P 值) 为 $0.000 < \text{显著性水平 } \alpha(0.05)$, 认为变量样本数据主成分分析的效果非常好, 其分析结果能较好地反映元素之间的联系^[40]。其次, 对变量样本进行数据标准化处理, 使之变成无量纲统一尺度的数据集, 并得到相关性系数矩阵[图 2(a)]和提取成分矩阵(表 2)。最后, 选取主成分分析提取的解释总方差中初始特征值大于 1 的前两个因子作为“有意义”的主要影响因子, 累计方差贡献率达 65.5%。表 2 中, 将主成分载荷系数矩阵中取值大于 0.5 的变量作为对应因子的主要载荷元素, PC1 因子主要载荷元素为 Cr、Cu、Ni、As、Pb、Zn 和 Cd, 其方差贡献率为 50.6%; PC2 因子主要载荷元素为 Hg, 方差贡献率为 14.9%。有研究认为^[41], 在 PCA 成分图解中[图 2(b)], 载荷变量线越靠近, 表明相互关系越强。据此, 可将 PC1 因子分为 3 个组, 得到更为细化的分类, 即 PC1-1(As、Pb、Cr、Ni)、PC1-2(Cu、Zn) 和 PC1-3(Cd)。这一结论与图 2(a) 中聚类分析显示的重金属分类结果一致。



(a) 系数矩阵, (b) PCA 成分; (a) 中不同颜色椭圆对应相关系数

图 2 研究区表层土壤 8 种重金属相关性系数矩阵和 PCA 成分

Fig. 2 Correlation plot and PCA plot of eight heavy metals in the surface soil of the study area

表 2 提取成分矩阵及解释方差¹⁾

Table 2 Extract component matrix and explained variance

因子	提取主成分矩阵								解释的总方差		
	Cr	Cu	Ni	As	Pb	Zn	Cd	Hg	初始特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
PC1	0.893	0.818	0.815	0.789	0.780	0.720	0.412	-0.012	4.4	50.6	50.6
PC2	-0.23	0.299	-0.261	-0.237	-0.094	0.408	0.366	0.783	1.2	14.9	65.5

1) 提取方法为主成分分析法

3.3 重金属元素的空间分布

研究区经历了全新世以来河流冲洪积作用的反复叠加, 表生地球化学性质相似的元素通常表现为较为一致的地球化学场特征^[42]。研究区重金属元素含量的空间分布特征(图 3)也从一定程度上印证了元素含量变异程度的差异和元素相关性所反映的表

生地球化学特征。土壤 pH 常被看作土壤的主要变量^[43], 它反映了重金属元素所处的酸碱环境, 可以指示土壤化学元素的分布情况。pH 表现为沿河略偏高的趋势, 而两侧则相对偏低[图 3(a)]。这种流域性差异也同时体现在重金属元素 As、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的空间分布上。具体来看: As 和 Pb 两

个中度变异元素沿河流附近呈现连续的中低值分布区[图 3(b)和 3(h)],可能与河流附近 pH 升高导致的元素缓慢水解或淋失有关^[44];而在河流两侧为中高值分布区,As 和 Pb 可被黏土矿物吸附存在于土壤中. Cr 和 Ni 表现了近于一致的空间分布特征. Cr 和 Ni 在河流附近相对贫化,而两侧黏土中含量相对偏高[图 3(d)和 3(g)].从 Cr 和 Ni 的表生地球化学特征来看, Cr 表生条件下易发生氧化变为 6 价的铬酸根离子,变得易溶;而 Ni 在中偏酸性条件下易溶,造成二者在墨河附近含量偏低; Cr 和 Ni 均易被有机质固定的特性^[43,44],决定了其在墨河两侧耕地中含量偏高. Cu 和 Zn 同为亲铜元素,其分布与 Cr 和 Ni 有一定差异性,二者空间分布相对较为杂乱,说明存在一定的外源扰动.有研究认为,在富含有机质土壤的表层, Cu 和 Zn 具有一定的富集现象^[28,43].本研究发现,河流两侧水稻土中 Fe、Mn 和 Al 等元素相对较为富集, Cu、Zn 等与之相关的

元素也有增多的趋势;而在河流附近,由于 Cu 和 Zn 有一定的水解性^[44],致使其含量出现了降低的趋势, Cu 的水解要略高于 Zn. Hg 的电负性为 1.8~2.0,有研究认为含汞的矿物(主要为辰砂)是一种稳定矿物,其迁移的数量并不多^[44].而从 Hg 的空间分布来看[图 3(f)],其在河流偏西的耕地土壤中呈现明显的中高值分布区.这一特征显然不是汞在自然背景下表生地球化学特征的体现,更多与人类活动引起的汞含量增加密切相关. Cd 的空间分布与其他元素有一定差异.从 Cd 的空间分布来看[图 3(c)],南北差异较显著:中南部呈现明显的面积状高值区,北部高值与低值呈间杂状分布.有研究认为, Cd 在表生条件下具有较强的主极化能力,自然状态下能被土壤的胶体溶液强烈吸附^[43,44].南部为姜湖贡米的优势产区,其土壤类型为水稻土,水稻土胶体具有较大的比表面积,可对 Cd 起到一定的固定作用.

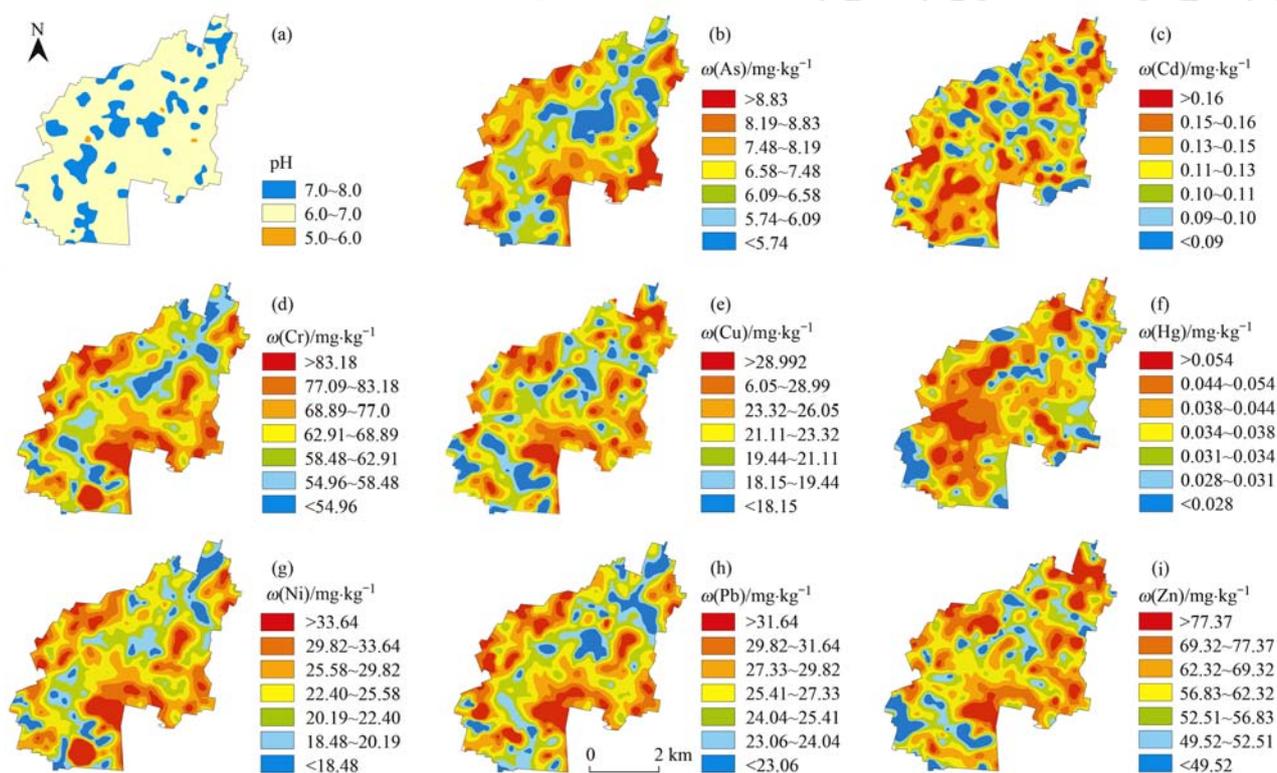


图 3 研究区表层土壤 pH 及 8 种重金属空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of pH and eight heavy metals in in the surface soil of the study area

3.4 重金属来源鉴定

研究区表层土壤不同重金属元素富集因子(EF)趋势见图 4.从中可知,研究区 As、Cr、Ni 和 Pb 元素的富集因子集中分布于 0.5~1.5 之间,代表重金属可能主要来自成土母岩或自然风化过程. Cu 和 Zn 亦主要分布在 0.5~1.5 之间,但存在部分点位 >1.5,代表这部分重金属点位受到了外源因素

影响. Hg、Cd 富集因子箱式图上边缘超过 1.5,代表重金属元素受到了人为来源不同程度影响,特别是 Hg,其富集因子 75% 分位值超过 1.5,表明其受到人为来源的强烈扰动.

基于重金属元素富集因子分析的不确定性,为进一步明确重金属的准确来源,对研究区内的重金属元素进行 PMF 定量源解析.运用 EPA PMF5.0 软

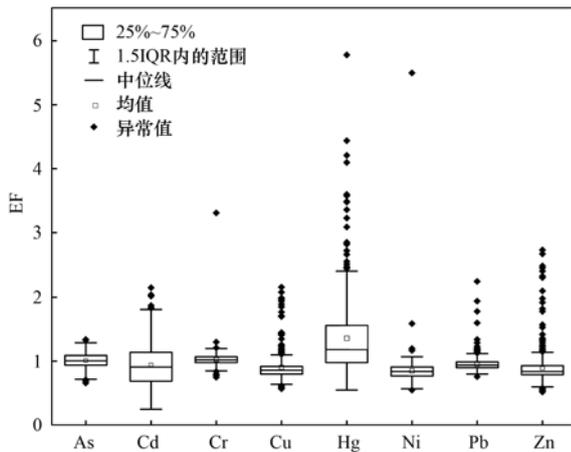


图4 研究区土壤8种重金属富集因子分布箱式图

Fig. 4 Box diagram of enrichment factor distribution of eight heavy metals in the study area

件, 设定因子数(2~5), 运算次数设为20次, 随机选择初始点依次运行PMF模型. 通过比较不同因子

数下 Q_{Robust}/Q_{True} 确定最佳因子个数 (Q_{Robust} 为 PMF 模型在 Robust 模式下得到的目标函数 Q 的最优解^[25~28], Q_{True} 为目标函数 Q 的真值). 本研究中, 输入的重金属含量数据和重金属含量不确定度数据反映的重金属 S/N 均较大, 被定义为“strong”. 经调试运算, 对比因子数为3和4时的方案预测信息. 当因子个数为3时, 该模型中 $Q_{Robust} = 2\ 655.2$ 、 $Q_{True} = 2\ 434.9$, 超过标度残差(大小在 $-3 \sim 3$) 数据为43个, 计算方案存在不确定性; 当因子个数为4时, 该模型中 $Q_{Robust} = 1\ 299.0$ 、 $Q_{True} = 1\ 376.7$, 标度残差在 $-3 \sim 3$ 之间, 计算方案较为稳定. 实测值与模型预测值拟合结果见图5. 从中可知, As、Cr、Ni 和 Pb 的拟合系数 R^2 均 >0.5 , Cd、Cu、Hg 和 Zn 的 R^2 均 >0.9 , 说明此次 PMF 模型总体拟合效果较好, 模型的因子数可以充分地解释原始数据中所包含的重金属源信息^[25]. PMF 模型解析的4个因子代表了4种

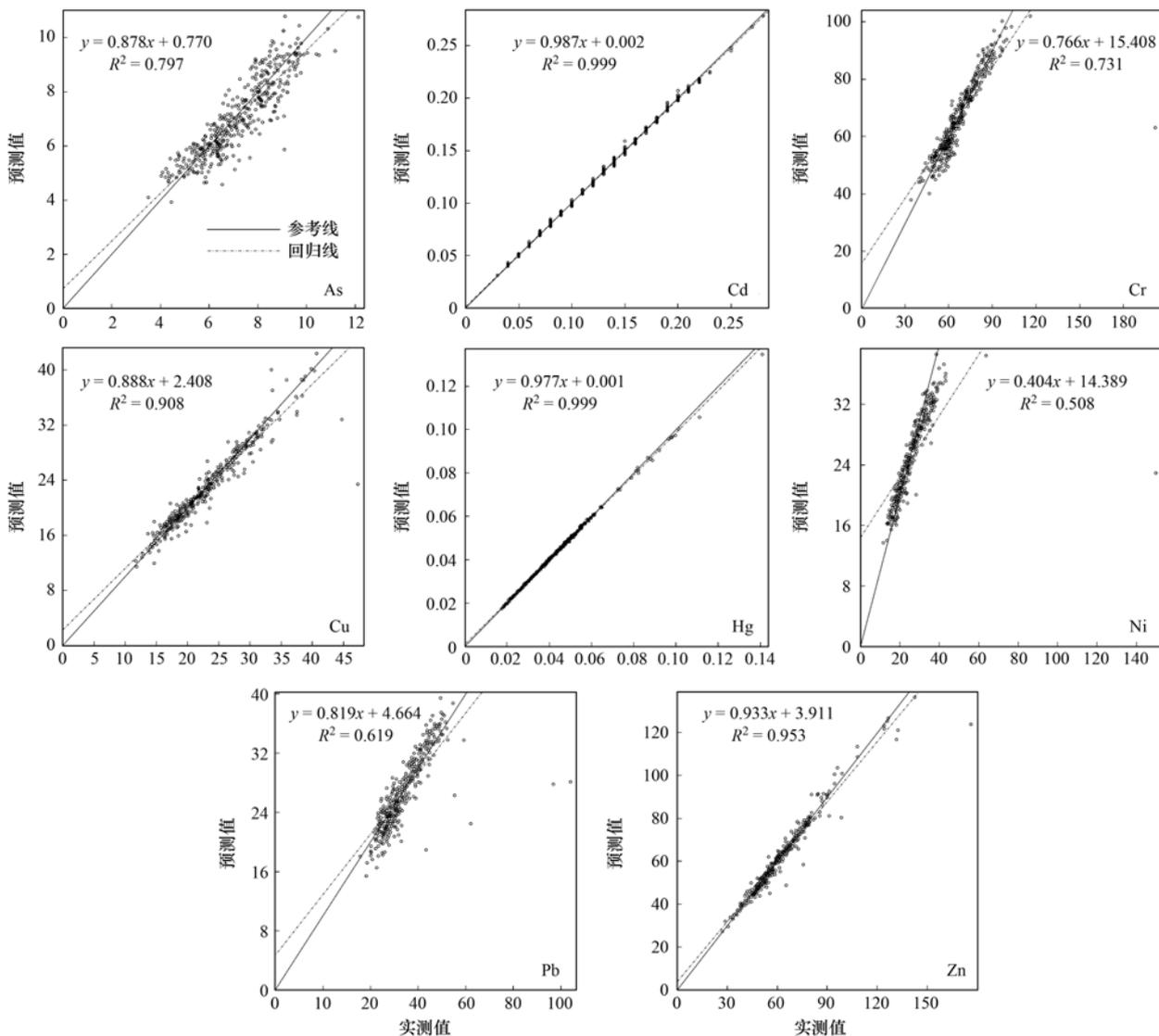


图5 实测值与PMF模型预测值拟合结果

Fig. 5 Fitting results between measured value and predicted value based on PMF model

重金属来源信息. 由图 6 可知, 因子 1 表示 Cd 的高贡献率, 这与重金属的相关性分析结论是一致的, 对应 PC1-3 中 Cd 的分类; 同理, 因子 2 表示 Cu 和 Zn 的高贡献率, 因子 3 对应 Hg 的高贡献率, 因子 4 对应 As、Cr、Ni 和 Pb 的高贡献率, 分别对应了重金属相关性分析中的 PC1-2(Cu、Zn)、PC2(Hg) 和 PC1-1(As、Cr、Ni、Pb).

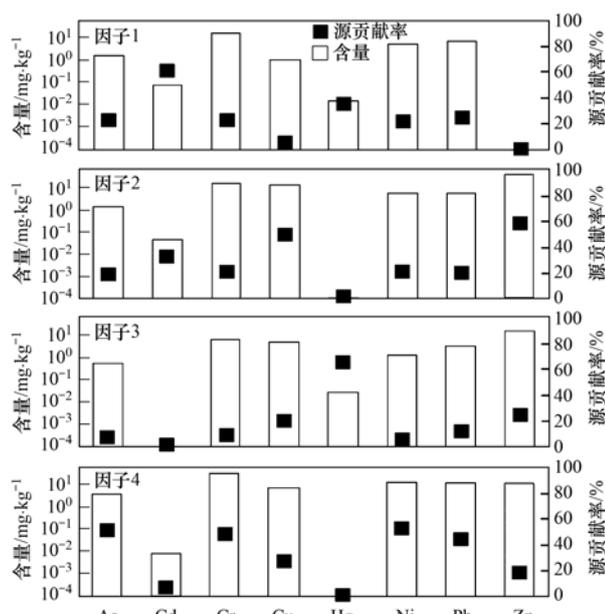


图 6 研究区土壤重金属 PMF 分析污染源成分谱

Fig. 6 Factor profiles and source contributions of eight heavy metals based on PMF in the study area

图 6 中, 因子 1 占比较高的元素是 Cd, 贡献率为 61.7%. 研究区耕地土壤中 Cd 含量具强变异性, 空间分布差异显著. 有研究表明, Cd 的外部来源因素包括工业源与化石燃料燃烧^[45]、汽车尾气与交通粉尘^[46]和农药化肥^[47,48]等. 有研究认为无工业企业分布情况下, 重金属 Cd 通常是农业生产的标志元素^[48]. 研究区为传统农耕区, 无工业企业分布, 而 Cd 在中南部河流拐弯处存在大面积高值分布, 这一区域正是传统姜湖贡米的优势产区. 因此, 因子 1 表示耕地农业源.

因子 2 中载荷比重大的元素包括 Cu 和 Zn, 对其贡献率分别为 49.3% 和 58.5%. 研究区 Cu 和 Zn 含量为中等分异, 表现为相对杂乱的空间分布特征. 李仁英等^[49]的研究指出, 果园土壤中的 Cu、Zn 元素全量存在较大的空间变异性, 可能与农药等的大量施用相关; 田欣等^[50]也有类似发现, 认为果园土壤中 Cu 与其他重金属之间均未表现出显著或极显著相关性, Zn 经常伴随农药化肥的使用而逐步累积. 研究区虽为姜湖贡米产地, 但区内北部、中东部和中西部散布银杏园和果园种植基地. 其分布区域对应了 Cu 和 Zn 空间分布的中高值分布区. 此外,

Cu 和 Zn 常用作改善和优化机动车性能的添加成分而广泛用于轮胎和制动系统中^[51], 车辆使用磨损、尾气排放及火车制动摩擦等都可以导致 Cu、Zn 在周边土壤中的局部富集^[51,52]. 本研究中 Cu 和 Zn 空间分布与交通线路叠加效果较好, 如图 3(e) 和 3(i) 中河流拐弯处近东西向公路、东部铁路沿线等均对应了 Cu 和 Zn 的中高值分布. 综合以上论述, 认为 Cu 和 Zn 的分布可能同时叠加了农药源和交通源等排放特征. 因此, 认为因子 2 表示混合源.

因子 3 占比较高的元素是 Hg, 其贡献率为 64.8%. 研究区 Hg 富集因子数 > 1.5, 离群数据较多, 属强变异元素. 有研究认为, Hg 的污染来源包括工业源^[53,54]、污水灌溉^[50,55]、农药^[47]、生活垃圾^[53]和燃煤取暖^[50,56,57]等, 均与人类的生产生活密切相关^[53]. 研究区为典型的农耕区, 自然村落多沿河流分布. 调研结果表明, 研究区冬季取暖及做饭等主要燃料来源为燃煤. 重金属空间分布如图 3(f) 所示, Hg 的中高值区沿墨河略偏西侧呈带状分布, 表明河流附近部分采样点不同程度受到了 Hg 的污染. 据郯城气象站(站台编号 58034)1999~2018 年气象资料, 研究区近 20 年风向频率(图 1)以东偏南风(ESE)为主, 主导风向频率为 10.55%. 常年风向影响了沿河燃煤废气排放及降尘的分布, 致使河流略偏西侧表层土壤中 Hg 的富集. 因此, 因子 3 表示燃煤源.

因子 4 中主要载荷元素为 As、Cr、Ni 和 Pb, 对其贡献率分别为 51.6%、48.2%、53.3% 和 43.9%. 研究区重金属富集因子分布图上, As、Cr、Ni 和 Pb 富集因子集中分布于 0.5~1.5 之间. 有研究认为, Cr 和 Ni 的强相关分布与成土母质或者成土过程相关^[27,43,44]. 综合 Cr 和 Ni 的表生地球化学特征及其对成土母质的反映, 认为 As、Pb 亦主要与平原区河流冲积母质的自然叠加成土过程有关. 以上观点与图 3 中反映的 As、Cr、Ni 和 Pb 沿墨河及其两侧的元素空间分布特征反映的信息一致. 而这一结论与 Nanos 等^[58]对西班牙 Duero River 流域土壤重金属源解析的研究结论一致. 因此, 可认为因子 4 表示自然源.

根据以上讨论, 研究区有 4 种重金属来源, 即耕地农业源、农药源与交通源叠加的混合源、燃煤源和自然源, 其来源的贡献率分别为 24.2%、35.4%、9.5% 和 30.9% (图 7). 因子 1(Cd) 和因子 3(Hg) 作为单元素主导的污染源贡献占比达 33.7%, 而 Cd 仍是研究区耕地中的主要潜在污染元素.

3.5 潜在生态风险评价

以临沂市表层土壤地球化学背景值^[37]作为参比值, 对研究区耕地土壤重金属元素潜在生态风险指数进行了统计(表 3), 并绘制了研究区重金属元

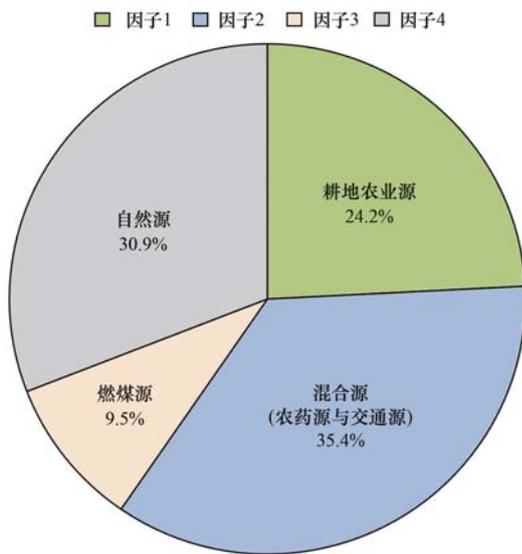


图7 基于 PMF 的土壤重金属不同污染源贡献率
Fig. 7 Contribution rate of soil heavy metals from different pollution sources based on PMF model

素生态风险占比谱系图(图8). 潜在生态风险占比谱系中显示重金属元素色带排序为: Hg > Cd > As > Pb > Ni > Cu > Cr > Zn, 其代表了重金属元素生态风险的高低. 从图8中可以直观地看出 Hg 和 Cd 是研究区生态风险关键主导因子. Hg 和 Cd 元素对研究区土壤潜在生态危害的贡献率分布范围为 26.9% ~ 80.0% 和 8.0% ~ 46.9%, 均值分别为 48.2% 和 26.1%, 其中位数分别为 47.4% 和 26.0%, 二者累积生态风险贡献率 > 70%, 说明 Hg 和 Cd 为研究区土壤主要生态风险元素.

利用 ArcGIS 10.2 制作了研究区生态风险指数空间分布(图9). 从图9(a)中可以看出, Hg 中度生态危害风险点较多, Hg 的中度生态危害风险指数 [$E_r(Hg)$] 分布范围为 40 ~ 79.5, 风险点为 310 个, 占中等以上风险点比例为 87.6%; 强生态危害风险点主要沿墨河分布, 且墨河西侧 Hg 的强生态风险

表3 土壤重金属元素潜在生态风险指数及超标点统计¹⁾

Table 3 Statistical table of potential ecological risk index of soil heavy metals and exceeding standard points

项目	元素	平均值	范围	标准偏差	变异系数/%	> 轻微生态危害 风险点数/个	超标率 /%	生态风险贡献率 /%
E_r	As	11.0	5.4 ~ 18.7	2.2	20.2	/	/	3.2 ~ 18.7
	Cd	30.4	7.2 ~ 67.2	10.6	34.9	84	19.7	7.9 ~ 46.9
	Cr	2.2	1.1 ~ 6.6	0.48	21.3	/	/	0.7 ~ 4.5
	Cu	4.9	2.5 ~ 9.9	1.2	24.7	/	/	1.3 ~ 9.2
	Hg	57.1	24.9 ~ 201.2	22.1	38.7	354	82.9	26.9 ~ 79.9
	Ni	4.7	2.1 ~ 27.4	1.7	36.2	/	/	1.2 ~ 18.9
	Pb	5.2	3.4 ~ 11.9	0.88	16.9	/	/	1.7 ~ 10.2
	Zn	1.0	0.4 ~ 2.8	0.27	27.5	/	/	0.3 ~ 2.5
PERI		116.45	63.9 ~ 277.1	26.6	22.8	39	9.1	/

1) “/”表示无数据

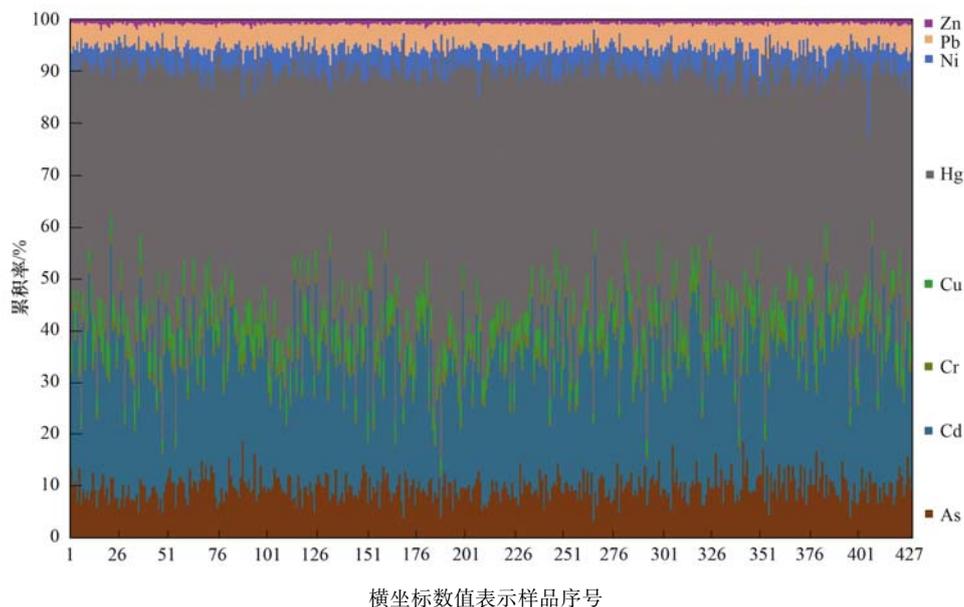


图8 8种重金属生态风险(E_r^i)累积率图谱

Fig. 8 Accumulation rate of ecological risk (E_r^i) of eight heavy metals

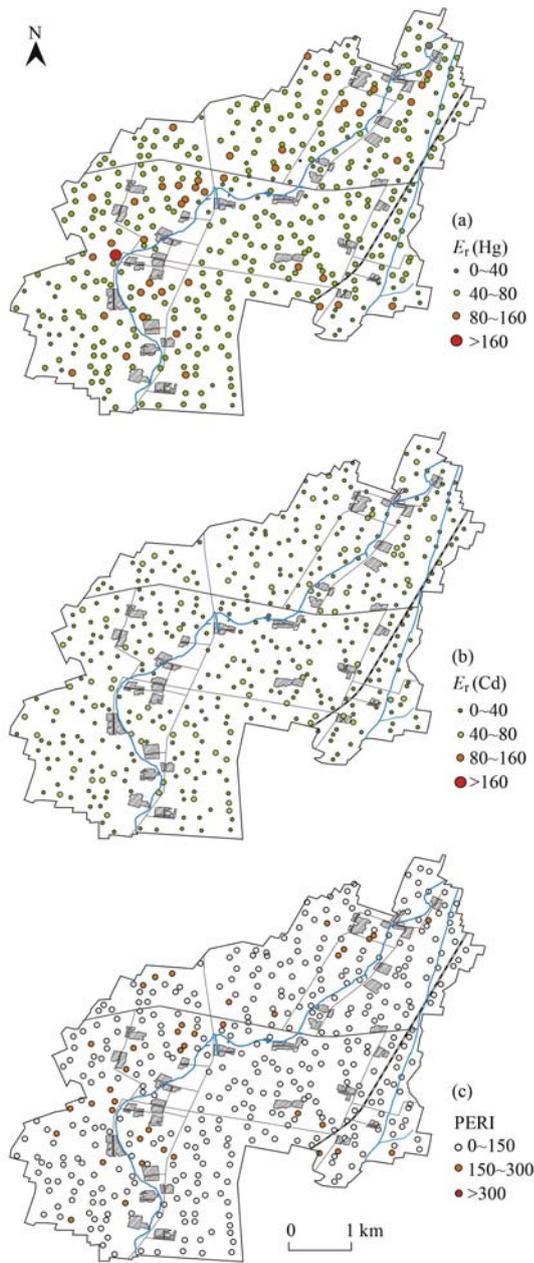


图9 土壤重金属(Hg和Cd)生态风险指数(E_r)及8种重金属综合风险指数(PERI)空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of potential ecological risks of Hg, Cd, and eight heavy metals in the study area

点数高于东侧, E_r (Hg)分布范围为80.9~158.9,风险点为43个,占中等以上风险点比例为12.1%;唯一的Hg很强风险点 E_r (Hg)为201.2,位于姜湖贡米产地所在乡镇南部附近.从图9(b)中可以看出,Cd中度危害指数风险点位零散分布于研究区耕地中,在姜湖贡米的优势产区存在风险点位,中等风险点 E_r (Cd)为40.8~67.2,点位为84个.从图9(c)中可以看出,重金属综合风险指数(PERI)显示在墨河西部存在较多中等生态风险点,在研究区东南亦有零星中等风险点,研究区中等生态风险PERI分布范围为152.1~277.1,风险点为39个.研究区生

态风险PERI体现了与 E_r (Hg)较为一致的分布特征,进一步印证了Hg为该区生态风险的主导因子.

4 结论

(1)研究区土壤重金属As、Cd、Cu、Hg、Pb和Zn含量均低于农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)规定的筛选值,认为土壤生态环境风险低;Cr和Ni最高值均超风险筛选值,但风险低.研究区As、Cd、Cr、Hg和Pb均值明显超过临沂市表层土壤地球化学背景值,说明这些重金属在研究区存在不同程度的积累现象.研究区pH主要范围为6.05~6.69,是适合水稻生长的pH范围.

(2)墨河对pH和重金属的表生地球化学特征具有指示意义.pH、As、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn沿墨河为中低值分布区,墨河两侧为中高值分布区;Hg沿河流西侧为中高值分布区;Cd的空间分布南北差异较为显著.重金属元素表生地球化学特征与富集因子的差异表明,人类活动等外源因素影响了重金属的空间分布.

(3)基于PMF的定量源解析结果认为,研究区重金属主要来源分为4类,即耕地农业源、混合源、燃煤源和自然源.各种来源的贡献率分别占24.2%、35.4%、9.5%和30.9%,而Cd和Hg均为单元素主导的污染源,其污染源贡献率占比达33.7%.

(4)随着人类生产生活活动的加剧,研究区Hg潜在生态风险指数呈现了沿墨河的规律性变化,而Cd的中度潜在生态风险点主要集中在墨河两侧耕地中,其他元素潜在生态风险指数(E_r)均 <40 ,为轻微生态危害.沿墨河分布的Hg污染明显受到了常年风向影响,而Cd仍是研究区耕地土壤中的潜在主要污染元素.

参考文献:

- [1] 国土资源部中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告(2015年)[R]. 北京: 中华人民共和国国土资源部中国地质调查局, 2015.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2020中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2021.
- [3] 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.
- [4] 王娟, 苏德纯. 基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 493-500.
Wang J, Su D C. Analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies in wheat and maize fields based on bibliometrics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(3): 493-500.
- [5] 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.
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.
- [6] 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.
- [7] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. *农业现代化研究*, 2018, **39**(6): 1030-1043.
Huang D Y, Zhu Q H, Zhu H H, *et al.* Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, **39**(6): 1030-1043.
- [8] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J]. *中国土壤与肥料*, 2020, (2): 83-92.
Zhou J M. The present status of heavy metal(loid)s pollution in farmland soils and analysis of polluting sources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020, (2): 83-92.
- [9] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4670-4683.
Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, *et al.* Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- [10] 魏洪斌, 罗明, 吴克宁, 等. 长江三角洲典型县域耕地土壤重金属污染生态风险评价[J]. *农业机械学报*, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
Wei H B, Luo M, Wu K N, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metal pollution in cultivated soil at typical county level in Yangtze River delta[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
- [11] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
Chai L, Wang X, Ma L, *et al.* Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- [12] 吴修, 杨连群, 陈峰, 等. 山东省水稻生产现状及发展对策[J]. *山东农业科学*, 2013, **45**(5): 119-125.
- [13] 刘君, 张猛, 张士荣, 等. 山东省水稻产地土壤重金属污染风险评价[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2019, **36**(2): 112-118, 125.
Liu J, Zhang M, Zhang S R, *et al.* Pollution risk evaluation of heavy metals in paddy soils in Shandong province[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2019, **36**(2): 112-118, 125.
- [14] 庞绪贵, 高宗军, 王敏, 等. 鲁西北平原特色农产品产地生态地质地球化学环境研究[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [15] 谭肖波, 薄本玉, 周付彬, 等. 济宁南部优质大米产地土壤地球化学特征[J]. *山东国土资源*, 2009, **25**(7): 42-45.
Tan X B, Bo B Y, Zhou F B, *et al.* Geochemical charactersitics of soil in high-quality rice production in southern Jining city[J]. *Shandong Land and Resources*, 2009, **25**(7): 42-45.
- [16] 时光宇. 水稻生长期降雨及利用情况分析[J]. *安徽农业科学*, 2016, **44**(15): 193-195.
Shi G Y. Analysis of precipitation and rainwater use efficiency during the growth period of rice [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, **44**(15): 193-195.
- [17] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **195**: 355-364.
- [18] Abraham G M S, Parker R J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **136**(1-3): 227-238.
- [19] Gu Y G, Wang Z H, Lu S H, *et al.* Multivariate statistical and GIS-based approach to identify source of anthropogenic impacts on metallic elements in sediments from the mid Guangdong coasts, China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **163**: 248-255.
- [20] Deely J M, Fergusson J E. Heavy metal and organic matter concentrations and distributions in dated sediments of a small estuary adjacent to a small urban area[J]. *Science of the Total Environment*, 1994, **153**(1-2): 97-111.
- [21] Ravichandran M, Baskaran M, Santschi P H, *et al.* History of trace metal pollution in Sabine-Neches Estuary, Beaumont, Texas [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(6): 1495-1503.
- [22] Niencheski L F, Windom H L, Smith R. Distribution of particulate trace metal in Patos Lagoon Estuary (Brazil) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, **28**(2): 96-102.
- [23] Zhang L P, Ye X, Feng H, *et al.* Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, **54**(7): 974-982.
- [24] 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.
- [25] USEPA. EPA positive matrix factorization 5.0 fundamentals and user guide. [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-research/epa-positive-matrix-factorization-50-fundamentals-and-user-guide>, 2014-04-14.
- [26] 比拉力·依明, 阿不都艾尼·阿不里, 师庆东, 等. 基于 PMF 模型的准东煤矿周围土壤重金属污染及来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(9): 185-192.
Imin B, Abliz A, Shi Q D, *et al.* Pollution and source identification of heavy metals in surrounding soils of Eastern Junggar Coalfield based on PMF model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(9): 185-192.
- [27] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, Southwestern, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [28] Guan Q Y, Wang F F, Xu C Q, *et al.* Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: a case study in Hexi Corridor, Northwest China[J]. *Chemosphere*, 2018, **193**: 189-197.
- [29] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [30] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝. Hakanson 指数法在评价土壤重金属生态风险上的应用进展[J]. *土壤通报*, 2019, **50**(4): 1002-1008.
- [31] Shi M Y, Wang Z W, Wang J B. Assessment for ecological risk of soil heavy metals with Hakanson index method: a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(4): 1002-1008.
- [31] Chen Y X, Jiang X S, Wang Y, *et al.* Spatial characteristics of

- heavy metal pollution and the potential ecological risk of a typical mining area: a case study in China [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018, **113**: 204-219.
- [32] Baran A, Wieczorek J, Mazurek R, *et al.* Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(1): 435-450.
- [33] Jiang X, Lu W X, Zhao H Q, *et al.* Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, **14**(6): 1599-1610.
- [34] 鞠铁男, 吴啸, 师华定, 等. 海沟河小流域耕地土壤重金属污染与生态风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 2018, **8**(5): 556-562.
- Ju T N, Wu X, Shi H D, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of arable land soil in Haigou small watershed [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, **8**(5): 556-562.
- [35] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys [A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability* [C]. The Netherlands: Pudoc Wageningen, 1985.
- [36] Chang C Y, Yin R S, Zhang H, *et al.* Bioaccumulation and health risk assessment of heavy metals in the soil-rice system in a typical seleniferous area in central China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2019, **38**(7): 1577-1584.
- [37] 庞绪贵, 代杰瑞, 陈磊, 等. 山东省 17 市土壤地球化学背景值[J]. *山东国土资源*, 2019, **35**(1): 46-56.
- Pang X G, Dai J R, Chen L, *et al.* Soil geochemical background value of 17 cities in Shandong Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, **35**(1): 46-56.
- [38] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- Chi Q H, Yan M C. *Handbook of elemental abundance for applied geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [39] 庄树林. 环境数据分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- Zhuang S L. *Environmental data analysis* [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [40] 李强, 曹莹, 何连生, 等. 典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5930-5937.
- Li Q, Cao Y, He L S, *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of soil heavy metals at typical smelting industry sites [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5930-5937.
- [41] Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of heavy metals in soils using multivariate statistics and geostatistics [J]. *Pedosphere*, 2013, **23**(4): 437-444.
- [42] 迟清华, 马生明. 流域上游基岩与下游冲积平原土壤化学组成的对比 [J]. *地质通报*, 2008, **27**(2): 188-195.
- Chi Q H, Ma S M. Comparison between the chemical composition of bedrocks in the upper reaches and that of alluvial plain soils in the lower reaches of a drainage area [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(2): 188-195.
- [43] 李学垣. 土壤化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- Li X H. *Soil chemistry* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [44] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- Liu Y J, Cao L M. *Introduction to element geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [45] Li Z Y, Ma Z W, van der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [46] Men C, Liu R M, Xu F, *et al.* Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 138-147.
- [47] Chen L, Wang G M, Wu S H, *et al.* Heavy metals in agricultural soils of the Lihe River watershed, East China: spatial distribution, ecological risk, and pollution source [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(12), doi: 10.3390/ijerph16122094.
- [48] Zhang Z X, Lu Y, Li H P, *et al.* Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 235-243.
- [49] 李仁英, 张民, 杨浩. 山东省主要果园土壤中 Cu、Zn 的形态、含量及分布 [J]. *农村生态环境*, 2002, **18**(4): 41-44.
- Li R Y, Zhang M, Yang H. Forms, contents and distribution of Cu, Zn in some orchard soils in Shandong Province [J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, **18**(4): 41-44.
- [50] 田欣, 贺婧, 罗玲玲, 等. 贺兰山东麓葡萄产地土壤重金属空间分布特征及来源解析 [J]. *西南农业学报*, 2021, **34**(3): 641-646.
- Tian X, He J, Luo L L, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of heavy metals in vineyard soil at east piedmont of Helan Mountains [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, **34**(3): 641-646.
- [51] 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 an industrially developed city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 934-944.
- [52] 韩琳, 徐夕博. 基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- Han L, Xu X B. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- [53] Liu R H, Wang Q C, Lu X G, *et al.* Distribution and speciation of mercury in the peat bog of Xiaoxing'an mountain, Northeastern China [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **124**(1): 39-46.
- [54] Chonokhuu S, Batbold C, Chuluunpurev B, *et al.* Contamination and health risk assessment of heavy metals in the soil of major cities in Mongolia [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(14), doi: 10.3390/ijerph16142552.
- [55] Cai L M, Xu Z C, Bao P, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and source of arsenic and heavy metals in the agricultural soils in Shunde, Southeast China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **148**: 189-195.
- [56] 黄界颖, 单平, 伍震威, 等. 典型燃煤电厂周边土壤汞的形态分布及污染源解析 [J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(7): 10-17.
- Huang J Y, Shan P, Wu Z W, *et al.* Speciation and source apportionment of Hg in soils around a typical coal-fired power plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(7): 10-17.
- [57] Tian H Z, Wang Y, Xue Z G, *et al.* Trend and characteristics of

atmospheric emissions of Hg, As, and Se from coal combustion in China, 1980-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(23): 11905-11919.

[58] Nanos N, Rodríguez Martín J A. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: spatial variability in the Duero River basin (Spain)[J]. *Geoderma*, 2012, **189-190**: 554-562.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water; A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Comcob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)