环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第6期
2023年6月15日

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, 贺曈, 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:以合肥市区为例 …… 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市"十三五"期间$PM_{2.5}$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, 戢运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期$PM_{2.5}$中碳质气溶胶的影响 …… 罗宇骞, 张凯, 赵妤希, 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, 窦焘焘, 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, 仝纪龙, 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$PM_{2.5}$和$O_{3\text{-}8h}$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, 傅宗玫 (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 …… 闫志雲, 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, 颜晓元, 逯超普 (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, 赵晟, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 …… 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采矿山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, 朱员正, 普布仓决, 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_2O排放及其功能基因的影响 …… 陈绮琦, 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 …… 蒋洪丽, 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, 李名闵, 申哲民 (3450)
云南5城市道路扬尘$PM_{2.5}$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, 张蕴凯, 张博晗, 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, 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, 向垒, 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 …… 卫晓锋, 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)
山东省典型污灌区土壤-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)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第6期 2023年6月
Vol.44, No.6 Jun., 2023

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[1], 吕童[1], 张蕴凯[1], 张博晗[1], 毕思琪[1], 周旭[1], 张炜[1], 曹红斌[1*], 韩增玉[2*]
(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 宁夏回族自治区生态环境监测中心, 银川 750004)

摘要: 基于西北某典型工业园区工厂内的地表土壤中 7 种重金属元素[As、Cd、Cu、Pb、Hg、Ni 和 Cr(Ⅵ)]的含量,分析该工业园区重金属污染特征,并采用潜在生态风险指数和地累积指数法分别进行生态风险和污染评价; 利用正定矩阵因子分解(PMF)模型和随机森林(RF)模型进行定量源解析,并结合采样企业排污资料和源排放成分谱经验数据识别特征元素,判定排放源类别. 结果表明,园区所有采样点位的重金属均未超过建设用地土壤污染风险管控标准(GB 36600-2018)中第二类建设用地筛选值; 但相比当地土壤背景值,除 As 和 Cr 以外的 5 种元素均有不同程度的富集,整体呈轻微污染和中度生态风险(RI =250.04); 其中 Cd 和 Hg 是该园区的主要风险元素; 源解析结果得到 5 类主要污染源,分别是化石燃料燃烧与化工生产源(33.73%和 9.71%,分别为 PMF 和 RF 所得源贡献率,下同),自然来源与废渣堆填(32.40%和 40.80%)、交通排放(24.49%和 48.08%)、燃煤与有色金属冶炼(5.43%和 0.11%)以及电镀与矿石冶炼(3.95%和 1.30%). 两种模型的总体变量模拟效果 R^2 均达到 0.96 以上,可以较好地预测重金属含量. 但结合园区内企业数量和道路密度的实际情况,园区土壤重金属的主要污染来源应以工业来源为主,PMF 模型模拟结果更贴近园区实际.

关键词:重金属; 源解析; 正定矩阵因子分解(PMF); 随机森林(RF); 工业园区
中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)06-3488-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202206290

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[1], LÜ Tong[1], ZHANG Yun-kai[1], ZHANG Bo-han[1], BI Si-qi[1], ZHOU Xu[1], ZHANG Wei[1], CAO Hong-bin[1*], HAN Zeng-yu[2*]
(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Ningxia Ecological and Environmental Monitoring Center, Yinchuan 750004, China)

Abstract: Based on the concentration data of seven heavy metal elements [As, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni, and Cr(Ⅵ)] in the surface soil of a typical industrial park in northwest China, the characteristics of heavy metal pollution in the industrial park were analyzed, and the ecological risk and pollution were evaluated using the potential ecological risk index and the index of geo-accumulation. The positive matrix factorization (PMF) model and random forest (RF) model were used for quantitative source analysis, and the emission data of sampling enterprises and empirical data of the source emission component spectrum were combined to identify the characteristic elements and determine the emission source category. The results showed that the heavy metals at all sampling points in the park did not exceed the second-class screening value of construction land in the soil pollution risk control standard for construction land (GB 36600-2018). However, compared with the local soil background values, five elements, excluding As and Cr, were enriched in different degrees, presenting slight pollution and moderate ecological risk (RI = 250.04). Cd and Hg were the main risk elements of the park. The results of source analysis showed that the five main sources of pollution were fossil fuel combustion and chemical production sources (33.73%, 9.71%, total source contribution rate of PMF and RF, respectively; the same below), natural sources and waste residue landfill (32.40%, 40.80%), traffic emissions (24.49%, 48.08%), coal burning and non-ferrous metal smelting (5.43%, 0.11%), and electroplating and ore smelting (3.95%, 1.30%). The simulation R^2 of the total variable of the two models were above 0.96, indicating that the models could predict heavy metals well. However, considering the actual situation of the number of enterprises in the park and roading density, the main pollution sources of soil heavy metals in the park should be industrial sources, and the simulation results of the PMF model were closer to the actual situation in the park.
Key words: heavy metals; source apportionment; positive matrix factorization (PMF); random forest (RF); industrial park

重金属是一类毒性较强、对人体健康和生态环境危害较大的物质[1],土壤重金属污染具有累积性、不可逆性及难以有效去除等特点[2],可以通过食物链富集,亦可通过扬尘吸入、皮肤接触等不同途径进入人体,对生态环境和居民身体健康产生严重威胁[3,4]. 我国西北地区工业园区的兴建带动了当地经济快速增长,但高污染和高耗能企业也带来了严重的环境问题,特别是以重金属污染为首的土壤环境污染问题亟待解决[5~7]. 然而大多数针对工业园区的研究只停留在污染特征和风险评价上,鲜见有针对土壤重金属来源的定量解析和系统的评价. 对于土壤重金属污染,最有效的解决方式就是确定重金属污染的来源并对源头加以控制.

目前,以污染区域为研究对象的受体模型是土壤重金属污染源解析的主流方法,如主成分分析(PCA)[8~10]、绝对主成分得分/多元线性回归(APCS/MLR)[11,12]、正定矩阵因子分解法(positive

收稿日期: 2022-06-25; **修订日期**: 2022-08-22
基金项目: 宁夏重点研发计划项目(2019BFG02020)
作者简介: 高越(1998~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染与来源解析和风险评价,E-mail: 202021051219@mail.bnu.edu.cn
* 通信作者,E-mail:caohongbin@bnu.edu.cn; hzy223@126.com

matrix factorization，PMF）[13~16]、UNMIX 模型[17,18]等. 其中 PMF 作为美国环保署（US EPA）官方推荐的定量源解析受体模型[19]，因其无需输入复杂源谱、操作简单、结果可靠等特点而应用广泛. 同时随着机器学习技术的发展，随机森林模型（random forest，RF）、地理加权回归（GWR）模型和贝叶斯最大熵（BME）等机器学习方法已逐渐应用于土壤污染源的分析[20~23]. 特别是 RF 模型克服了传统机器学习在数据分析方面的严格要求，训练过程调参简便，可以对输入数据特征变量的重要程度进行定量和排序，尤其适用于环境中污染物的定量来源分析[24,25]. 然而，目前大多数研究还是采用 RF 分析污染物浓度的主要影响要素，辅助进行源识别. 刘斌等[26]应用多元统计分析初步得到指征晋中盆地土壤重金属自然和人为来源的 3 个因子，采用 RF 模型探究污染企业距离、道路距离、土壤有机质含量等 9 个要素对土壤各重金属元素影响的重要度，结合各因子的元素组成判别具体的自然及人为来源；Huang 等[23]在湖北襄州的研究采用相关分析及 PCA 确定土壤重金属的同源性，进一步结合 RF 细化了耕地土壤重金属的主要人为源是工业污染、交通排放和农家肥施用；仅有个别研究[27]将 RF 模型应用于 $PM_{2.5}$ 的定量源解析，基于 PCA 因子得分计算其相对重要性作为源贡献率；尚未见将 RF 模型与 PMF 定量源解析方法相结合，分别计算各污染来源的贡献率，比较源成分组成的异同并相互佐证的研究.

本文选取西北地区某典型工业园区为研究对象，采集了园区内 11 个代表性企业的 113 个表层土壤样本；分析了 7 种土壤重金属浓度的空间分布特征；采用地累积指数及潜在生态风险指数评价了园区土壤重金属的污染程度和生态风险；最后，采用 PMF-RF 模型联用的方法定量解析土壤重金属来源，结合园区实际对两种分析结果加以验证，以期为西北地区有关部门加强工业园区的土壤污染治理提供依据.

1　材料与方法

1.1　样品采集与分析

所研究的工业园区位于我国西北地区，是以煤化工、合金制造和精细化工为主的大型综合性产业开发区. 园区规划面积约为 86.6 km^2，现有企业近 300 家. 参考国家标准《土壤质量 土壤采样技术指南》（GB/T 36197-2018）[28]，于 2020 年 8 月 13 日至 9 月 17 日在 11 个代表性企业厂区内部使用五点采样法采集 0~20 cm 表层土壤样本；并使用手持 GPS 仪器在中心点位确定采样点坐标. 共采集表层土壤样本 113 个. 采样点位置如图 1. 将采集好的样品在室内阴凉处自然风干，研磨后过 100 目筛（0.149 mm 孔径），<4℃避光保存备用.

本研究共测定土壤中 As、Cd、Cu、Pb、Hg、Ni 和 Cr（Ⅵ）这 7 种重金属元素含量，前处理方法、检测仪器和方法检出限如表 1 所示.

分析过程采用标准土壤 GSS-33（GBW 07389，中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所）对 As、Cd、Cu、Pb、Hg 和 Ni 进行质控，使用土壤中六价铬成分分析标准物质 GBW（E）070252（核工业 240 研究所）对 Cr（Ⅵ）进行质控，各重金属测定值均在标称值范围内（表 1），实验室内平行样相对标准偏差（RSD）<5%.

表 1　重金属元素测定方法、检测仪器、方法检出限及标准物质实测值/mg·kg^{-1}

Table 1　Determination methods, instruments, method detection limit and measured values of certified reference materials for heavy metals/mg·kg^{-1}

重金属	测定方法	检测仪器	方法检出限	标准物质实测值	保证值范围	文献
As	《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分：土壤总砷的测定》（GB/T 22105.2-2008）	原子荧光分光光度计 AFS-8220 HD-YQ-003	0.01	13.36±0.68	12.6~14.8	[29]
Hg	《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分：土壤总汞的测定》（GB/T 22105.1-2008）	原子荧光分光光度计 AFS－8220 HD-YQ-003	0.002	0.02±0.002	0.016~0.022	[30]
Cd 和 Pb	《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》（GB/T 17141-1997）	原子吸收分光光度计 Ice 3500 HD-YQ-020	0.005 和 0.05	0.14±0.01 和 22±1.63	0.13~0.15 和 20~24	[31]
Cu 和 Ni	《土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》（HJ 491-2019）	原子吸收光谱仪 Ice 3500 HD-YQ-119	0.786 和 2.88	24.77±1.36 和 32.23±0.77	23~27 和 31~33	[32]
Cr（Ⅵ）	《土壤和沉积物六价铬的测定 碱溶液提取-火焰原子吸收分光光度法》（HJ 1082-2019）	原子吸收光谱仪 Ice 3500 HD-YQ-119	0.4	2.98±0.30	2.6~3.2	[33]

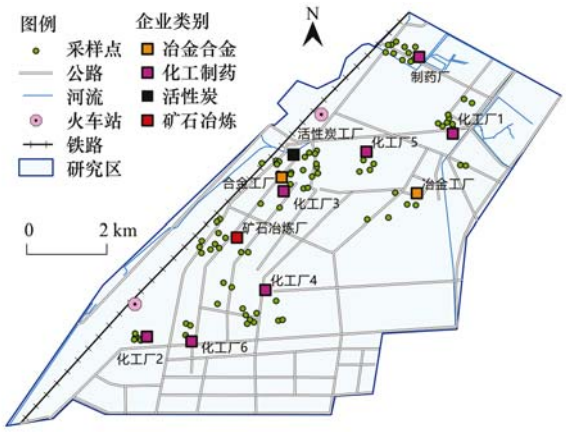


图 1 采样点和工厂分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites and plants

1.2 数据处理与空间分析

借助 Excel 和 SPSS(IBM SPSS Statistics 23)对实验数据进行统计分析,使用 ArcGIS(10.4.1 版本)将含有经纬度的地表重金属点位数据的空间分布可视化,插值方法为反距离权重插值(inverse distance weighted,IDW);其余统计图表使用 Origin 2021 和 CorelDRAW X7 制图处理.

1.3 污染及风险评价

1.3.1 地累积指数

地累积指数又被称为 Muller 指数,是用于研究沉积物及其它介质中重金属污染程度的定量指标[34].公式如下:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/kB_n)$$

式中,I_{geo}为地累积指数,C_n为单一元素含量,单位 mg·kg^{-1},B_n为对应元素的土壤背景值,单位 mg·kg^{-1},k为校正系数,一般取 1.5,用于修正背景值波动.由于土壤背景值中无 Cr(Ⅵ)的统计值,按总 Cr 的 1/7 将样品中 Cr(Ⅵ)测定值转化为总 Cr 代入后续计算[35].

地累积指数的污染等级为:无污染(≤0)、轻微(0~1)、轻度(1~2)、中度(2~3)、偏重(3~4)、重度(4~5)和极重(≥5).

1.3.2 潜在生态风险指数

潜在生态危害指数法是由瑞典科学家 Hakanson[36]从沉积学角度提出的生态风险评估方法,现已广泛应用于土壤等多介质的评估[5,23,37].其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_i = \sum_{i=1}^{n}\left(T_i \times \frac{C_i}{C_i^b}\right)$$

式中,E_i为单个元素的潜在生态风险指数,RI 为多元素的综合潜在生态风险指数,T_i为元素 i 的毒性响应系数,本研究采用的毒性系数分别为:As = 10,Cd = 30,Cu = Pb = Ni = 5,Hg = 40,Cr = 2;C_i为单个元素实测含量,C_i^b为该元素的参考值,本研究取宁夏省级土壤背景值[38],单位均为mg·kg^{-1}.潜在生态风险指数的 Cr(Ⅵ)也按 1/7 的比例转化.

由于本研究的重金属与 Hakanson 划分 RI 生态风险级别时采用的污染物类别有部分不同,因此根据重金属种类及其毒性系数将各生态风险等级对应 RI 限值区间进行适当调整[39,40],调整后的评价标准为:轻微($E_i \leqslant 40$,RI≤110)、中等($40 < E_i \leqslant 80$,$110 < RI \leqslant 220$)、强($80 < E_i \leqslant 160$,$220 < RI \leqslant 440$)、很强($160 < E_i \leqslant 320$)、极强($E_i > 320$,RI > 440).

1.4 源解析

使用受体模型与机器学习相结合的方法,综合 PMF 和 RF 模型的结果对该工业园区内土壤重金属来源进行定量源解析;结合实地走访调查获得的工厂分布、企业排污资料、重金属污染的空间分布和以往研究中各行业的特征污染物,根据各源的特征元素确定排放源类别,并定量确定其源贡献率.

1.4.1 PMF 模型

正定矩阵因子分解(PMF)的工作原理是:基于加权最小二乘法进行迭代计算,对分解矩阵做非负约束,利用数据标准偏差来优化因子分析[19].

PMF 将原始矩阵($\boldsymbol{X}_{n\times m}$)分解为 3 个矩阵,即:因子得分矩阵($\boldsymbol{G}_{n\times p}$)、因子载荷矩阵($\boldsymbol{F}_{p\times m}$)和残差矩阵($\boldsymbol{E}_{n\times m}$).PMF 模型不断分解受体矩阵 $\boldsymbol{X}$,以得到最优的因子得分和载荷矩阵 $\boldsymbol{G}$ 和 $\boldsymbol{F}$,最优的判定标准是目标函数 Q 有最小值.

目标函数 Q 计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\boldsymbol{x}_{i,j} - \sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{g}_{i,k}\times\boldsymbol{f}_{k,j}}{\boldsymbol{u}_{i,j}}\right)^2 = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(\frac{\boldsymbol{e}_{i,j}}{\boldsymbol{u}_{i,j}}\right)^2$$

式中,$\boldsymbol{x}_{i,j}$为第 i 个样品中第 j 个元素的含量,$\boldsymbol{g}_{i,k}$为因子 k 对第 i 个样品的相对贡献率,$\boldsymbol{f}_{k,j}$为因子 k 中第 j 个元素的含量,$\boldsymbol{e}_{i,j}$为残差,$\boldsymbol{u}_{i,j}$为第 i 个样品中第 j 个元素含量的不确定性大小.

PMF 模型需要输入两组数据,一组为样本元素的含量数据,另一组为与含量数据对应的不确定性(Unc)数据.计算不确定性的公式如下:

$$Unc = \begin{cases} (5/6)MDL, & C < MDL, \\ \sqrt{(\tau\times C)^2 + (0.5\times MDL)^2}, & C > MDL. \end{cases}$$

式中,Unc 为监测项目相对不确定度,MDL 为方法检出限(mg·kg^{-1}),C 为监测项目含量(mg·kg^{-1}),τ 为误差分数(error fraction),可以由化学分析中回收率来确定,一般取经验值 0.1[41~43].

结果检验采用 DISP 与 BootStrap 检验，当输出结果中 QRobust 与数据库中的数据量 QTheory 相近时，证明分析中的污染源数目选择合适，分析结果可靠[19]. 目前 EPA 公布的最新版本为 EPA PMF 5.0，使用该模型对 113 份地表土壤中 7 种金属元素测定数据进行分析，得到该区域土壤中重金属的来源及贡献率.

1.4.2　RF 模型

随机森林模型（RF）是 Breiman[44] 提出的以决策树为基学习器的集成学习算法. 它的基本原理是，利用 Bootstrap 重抽样从原始样本中有放回地抽取多组样本，每组样本分别构建决策树，并取代原始样本进行训练，所有决策树的平均得分作为最终结果，基于均方误差来表征变量特征重要性（feature importance）这一排序属性.

研究人员通常会将降维处理后的因子得分矩阵输入 RF 模型进行后续分析[23,26,27]. 本文将 PMF 得到的因子得分矩阵作为 RF 模型的输入变量，土壤重金属总量作为 RF 模型的预测变量，通过特征重要性来判断输入变量对拟合结果的影响；此外，特征重要性还可用于表征各因子对各重金属元素含量的贡献率[27,45]. 本研究中将 PMF 分解得到的因子得分矩阵作为输入变量，分别预测 7 种重金属含量和土壤重金属总量，并计算各因子（源）对不同元素的特征重要性以表征源贡献率. RF 模型的搭建和调参均通过 R v 4.0.6[46] 的 mlr3 程序包及其拓展包进行.

除输入数据外，RF 模型还需要确定 3 个重要参数：Ntree、Mtry 和 Nodesize. Ntree 决定了模型包含的决策树数目，参数过小会导致模型拟合不足，参数过大则会导致模型过拟合，调参范围为 200、300、400、500 和 600. Mtry 用于指定节点中用于二叉树的变量个数，调参范围为 1、2、3、4 和 5. Nodesize 决定决策树终端节点的最小大小，调参范围为 2、4、6、8 和 10. 对每个模型，本研究重复 50 次参数的随机组合进行十折交叉检验（10-fold cross validation），选取 RMSE 最小的参数组合为最优参数组合.

模型的验证除了使用与 PMF 一致的指标，即决定系数（coefficient of determination，R^2），还选用平均绝对误差（mean absolute error，MAE）、均方根误差（root mean square error，RMSE）来评估模拟结果的合理性. 各自公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{resi} - X_{obsi})^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(X_{obsi} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_{obsi}\right)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|X_{resi} - X_{obsi}|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{resi} - X_{obsi})}$$

式中，X_{resi}为第 i 个预测值，X_{obsi}为第 i 个观测值，n 为输入样本量.

2　结果与讨论

2.1　土壤重金属分布特征

对 113 份工厂内表层土壤样品的 7 种重金属元素含量进行化学分析，其描述性统计结果如表 2 所示. 背景值为文献[38]中宁夏省级土壤几何平均值，筛选值为《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》（GB 3600-2018）[47] 中第二类建设用地筛选值.

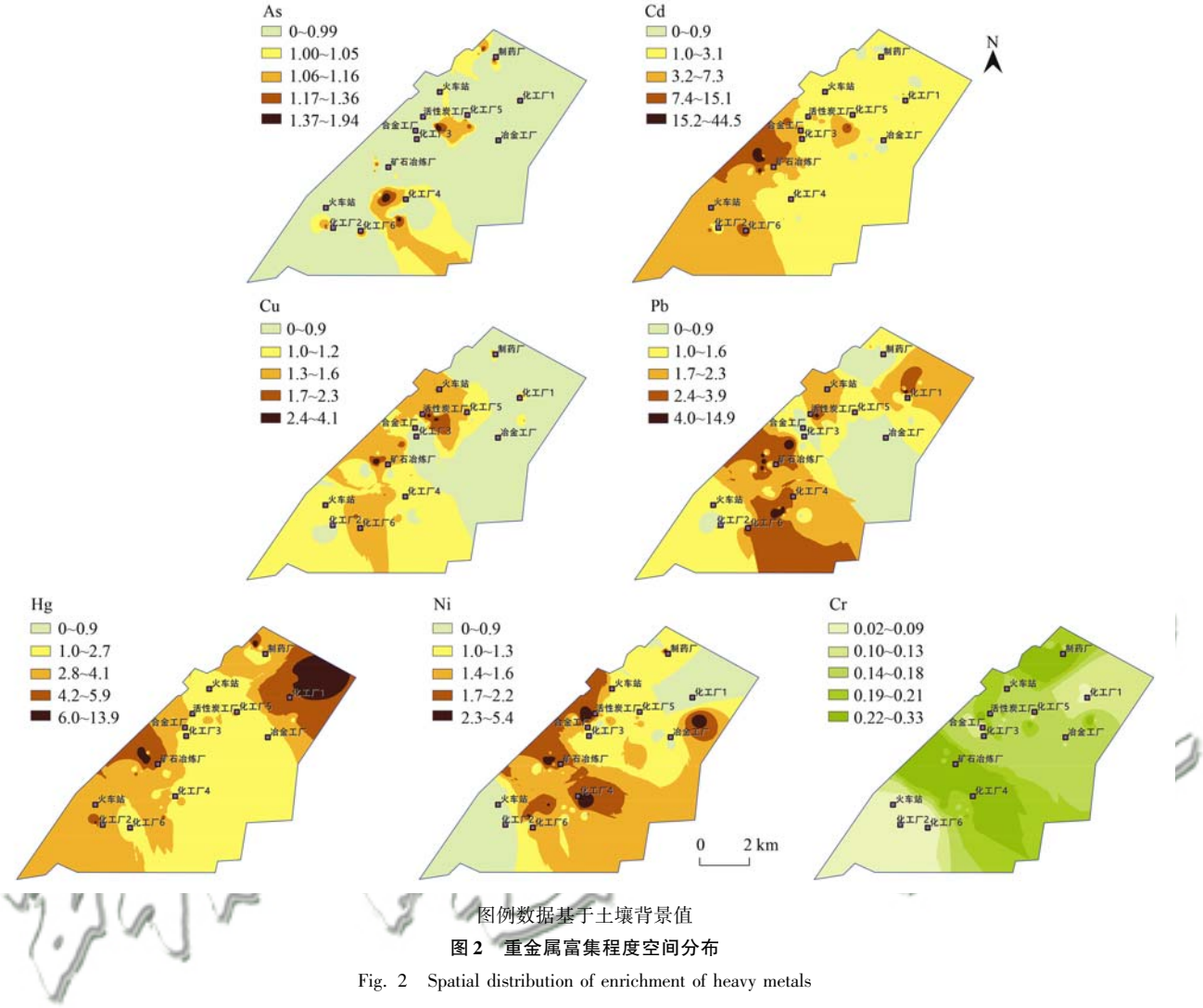
整体来看，该工业园区 7 种重金属元素的含量平均值和最大值均未超标，且远小于第二类用地筛选值. 以当地背景值为基准，计算元素的富集倍数，并使用反距离权重插值表征各点位的富集程度（图 2）. 相比背景值，除 As 和 Cr 以外的 5 种元素均有不同程度的富集，其中 Cd 和 Hg 的含量均值为背景值的 3.11 倍和 2.99 倍，呈现明显富集；Cu、Pb 和 Ni 富集倍数分别为 1.11、1.59 和 1.37，呈轻微富集；As 的整体富集倍数为背景值的 0.85 倍，仅有个别点位轻微富集；Cr 则全部未超过背景值，平均仅为背景值的 0.16 倍.

表 2　表层土壤重金属含量[1]（n = 113）

Table 2　Statistics of heavy metal concentrations in soil（n = 113）

统计指标	As	Cd	Cu	Pb	Hg	Ni	Cr（Ⅵ）
平均值/mg·kg^{-1}	9.73	0.34	23.15	31.94	0.06	49.42	1.36
标准差/mg·kg^{-1}	3.58	0.56	12.33	37.41	0.04	42.16	0.72
变异系数	0.37	1.66	0.53	1.17	0.69	0.85	0.53
最大值/mg·kg^{-1}	22.40	4.61	85.00	301.00	0.28	373.00	2.80
背景值/mg·kg^{-1}	11.50	0.10	20.90	20.10	0.02	36.10	59.7
筛选值/mg·kg^{-1}	60	65	18 000	800	38	900	5.7

1）Cr（Ⅵ）的背景值为土壤总铬含量



图例数据基于土壤背景值

图 2 重金属富集程度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of enrichment of heavy metals

从空间分布来看,不同元素的富集区域差异较大,但普遍在工厂附近富集. As 仅在制药厂和化工厂附近有轻微富集; Cd 和 Hg 在园区中西部均有富集,此外 Hg 还在东北部有明显富集; Pb 在园区中西部至东南部一带含量均偏高; Cu 和 Ni 的高值点则相对分散且富集程度相对较低; Cr 整体未超背景值,相对高值区域与 Ni 的高值点分布较为类似.

2.2 土壤重金属污染及风险评价

园区的地累积指数统计值见表 3. Cd、Hg 和 Pb 的平均值归属的污染等级为轻微污染,其他元素的地累积指数小于 0,即可认为基本无污染. 而除了 Cr 以外,其他 6 种元素的地累积指数最大值均达到轻微污染,说明这些元素在部分区域仍受到人为因素干扰; 其中 Cd 为轻度污染,Hg(0.97)和 Pb(1.00)接近轻度污染,说明 Cd、Hg 和 Pb 在研究区内部分区域存在富集.

该园区的潜在生态风险指数评价的描述性统计结果如表 4 所示,各元素单因素潜在生态风险指数(E_i)均值由高到低依次为:Hg > Cd≫As > Pb > Ni > Cu > Cr. Hg 和 Cd 的 E_i 值远大于其余 5 种元素,属于强生态风险; 其余 5 种元素为轻微生态风险. Hg 和 Cd 的高值也导致研究区的综合潜在生态风险指数(RI)达 250.04,等级达到强风险. 而 113 个点位中,Hg 和 Cd 的 E_i 最大值均可归类为极强风险,且分别有 98.23% 和 58.41% 的点位生态风险为中度及以上,说明 Hg 和 Cd 为该园区的主要生态风险元素.

综合两类指数的污染评价结果,可以发现 Cd 和 Hg 由于其毒性大、各点位含量高而成为该工业园区的主要污染元素. 而对比两者的评价结果,可以发现地累积指数反映的污染程度要普遍低于潜在生态风险指数反映的风险等级,这是由于潜在生态风险指数综合考虑了各重金属的毒性和富集程度,而地累积指数仅涉及相对于背景值的富集,这也是 Hg 和 Cd 潜在生态风险指数为中度至极强风险,而地累积指数结果仅为轻微污染的原因.

有学者在西北地区的研究也能证明 Cd 和 Hg 是当地工业园区土壤重金属污染的代表性元素. 樊新刚等[5]在宁夏石嘴山河滨工业园区的研究表明，园区 Cd 含量平均值是当地土壤背景值的 36.91 倍，且所有样本均超标；张松林[7]在宁夏石嘴山惠农区某工业园区的研究也发现，土壤中 Cd 含量平均值超出国家二级标准值(pH > 7.5)3.9 倍，具有较高的潜在生态风险；罗成科等[6]的研究表明，宁东基地工业园区的 Cr、Cd、Pb 和 Hg 含量平均值普遍高于土壤背景值，Hg 更是明显偏高，超出背景值 7 ~ 8.5 倍.

表 3　重金属地累积指数

Table 3　Index of geo-accumulation of heavy metals

项目	As	Cd	Cu	Pb	Hg	Ni	Cr
平均值	−0.25	0.34	−0.13	0.02	0.30	−0.04	−0.97
污染等级	无	轻微	无	轻微	轻微	无	无
最大值	0.11	1.48	0.43	1.00	0.97	0.84	−0.66
污染等级	轻微	轻度	轻微	轻微	轻微	轻微	无

表 4　重金属元素潜在生态风险指数统计与分布[1)]

Table 4　Statistics and distribution of the potential ecological risk index of heavy metals

项目	类型	E_i							RI
		As	Cd	Cu	Pb	Hg	Ni	Cr	
潜在生态风险指数统计	平均值	8.46	99.34	5.54	7.94	119.68	6.84	2.24	250.04
	最大值	19.48	1 349.27	20.33	74.88	556.44	51.66	4.60	1916.82
	最小值	2.49	4.39	1.44	0.77	35.64	1.25	0.33	77.60
潜在生态风险指数分布/%	轻微	100.00	41.59	100.00	98.23	1.77	99.12	100.00	10.62
	中	—	30.09	—	1.77	31.86	0.88	—	53.10
	强	—	13.27	—	—	47.79	—	—	25.66
	很强	—	8.85	—	—	15.93	—	—	—
	极强	—	6.19	—	—	2.65	—	—	10.62

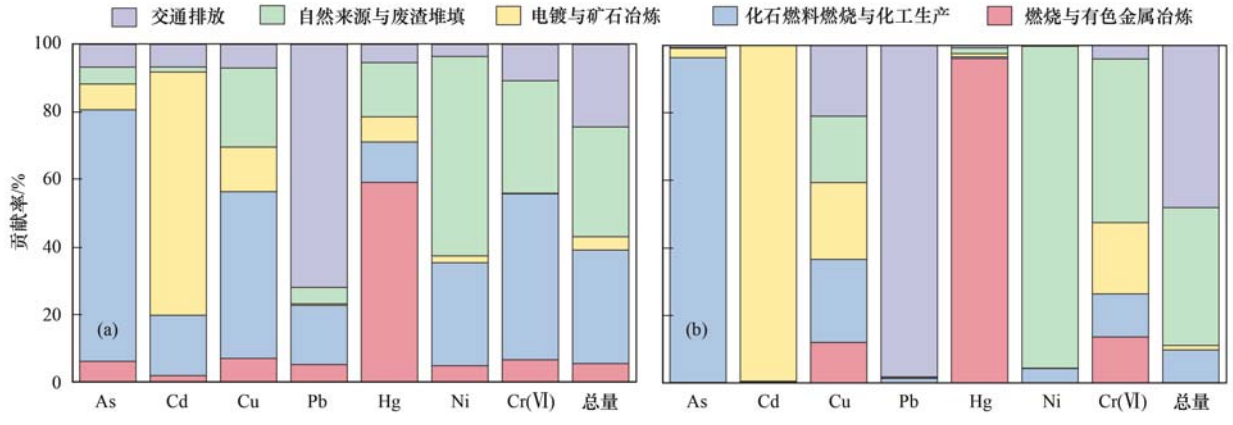
1)“—”表示内园区各点位相应元素的 E_i 和 RI 在该区间没有分布

2.3　源解析

2.3.1　PMF 模型

将 113 个点位土壤 7 种重金属含量数据输入 PMF 模型，总体变量(total variable)为 7 种重金属总量. 实际分析中，将 Cu 和 Cr(Ⅵ)设为 weak，即其不确定度数据变为原来的 3 倍参与后续计算；并排除 4 条异常值数据. PMF 的因子数(源个数)一般控制在 3 ~ 7 个[48]，需要综合考虑 Q 值大小、各元素及总体变量的决定系数 R^2 以及园区的实际情况来确定最合理的分类解释. 本研究最终确定因子个数为 5 个，矩阵旋转度 $F_{peak} = -0.1$. 模型通过了 DISP 和 Bootstrap 检验[19]. 模型输入元素的分类、决定系数 R^2 和信噪比见表 5. 模型预测的重金属总量的决定系数 $R^2 = 0.963\,3$，说明 PMF 模型整体拟合度良好，结果可信.

PMF 模型输出的各元素不同源的贡献率如图 3 所示.



(a)PMF，(b)RF

图 3　PMF 和 RF 模型各重金属元素源贡献率

Fig. 3　Source contribution ratio of heavy metals in PMF and RF model

表 5 PMF 模型参数设置[1)]

Table 5 Parameter settings for PMF model

重金属	等级	信噪比(S/N)	R^2
As	strong	9.0	0.997
Cd	strong	8.7	0.999 3
Cu	weak	8.7	0.288 1
Pb	strong	9.0	0.999 8
Hg	strong	8.7	0.999 9
Ni	strong	8.2	0.996 8
Cr(Ⅵ)	weak	4.2	0.137 13
总体变量	weak	8.7	0.963 3

1)模型内总体变量默认为 weak

2.3.2 RF 模型

将 PMF 模型分解得到的因子得分矩阵作为特征变量(自变量)输入 RF 模型,各元素含量和总量含量作为预测变量(因变量),分别对 7 种元素和总量各自建立单独的 RF 模型,提取其特征重要性参数以获取各污染源贡献率,结果如图 3 所示.

综合 PMF 和 RF 模型的解析结果,对 5 类来源进行判定. FAC1 的特征污染物为 Hg(59.1%、96.2%,分别为 PMF 和 RF 模型所得各源对土壤中该元素的贡献率,下同). 参考前人研究,煤炭燃烧和有色金属冶炼是我国土壤 Hg 污染的主要来源之一[49~52]. 煤炭燃烧仍然是园区内各工厂的主要动力来源; 并参考图 4 中各排放源均一化贡献率的空间分布,可知 FAC1 的主要贡献区域位于园区东北部冶金工厂附近,同时在产企业污染源信息调查也显示 Hg 是该工厂废水中的特征污染物之一; 该主要贡献区域与图 2 中 Hg 的高值区域也基本重合,同时矿石冶炼厂附近 Hg 也存在相对高值. 因此,FAC1 被认为是煤炭燃烧和有色金属冶炼来源.

FAC2 的主要构成元素为 As(74.5%, 96.3%)和 Cu(49.3%, 24.7%). As 是典型的化石燃料燃烧源的标志元素[13,53,54],同时它也是园区北部制药厂废水中含有的污染物之一(在产企业污染源信息调查); 有研究报告称 Cu 会在化工生产厂区附近富集[55],同时 Cu 也是化肥中的重要污染成分[56,57]. 从空间分布上来看,As 和 Cu 在制药厂和化工厂附近区域存在富集(图 2),其中化工厂 5 主要从事化肥生产,且 FAC2 的源贡献率也在化工制药企业附近较高. 故 FAC2 可被判断为化石燃料燃烧与化工生产的复合来源.

FAC3 以 Cd(72.0%, 99.5%)为主要特征元素. Cd 是矿石冶炼精炼的标志元素[58~61],也有文献表示 Cd 会在电镀钢及其它合金的防腐蚀工艺过程中产生[12]. 由图 4 可知,FAC3 的均一化贡献率在矿石冶炼厂和合金工厂附近有高值点,元素 Cd 也在该区域富集,因此 FAC3 可以归类为电镀与矿石冶炼源.

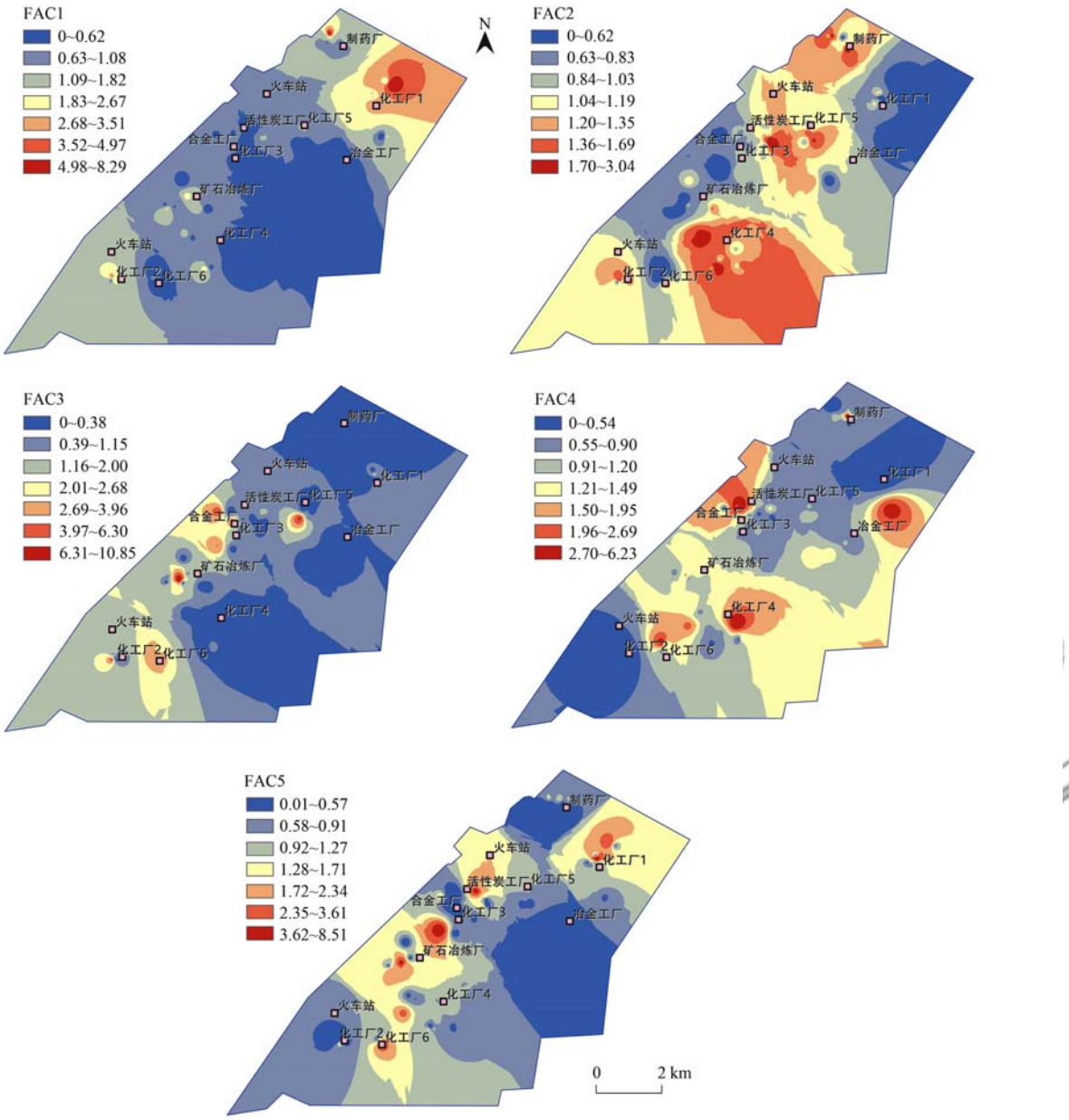
FAC4 的特征元素是 Ni(59.0%, 95.4%)和 Cr(33.4%, 48.4%). Cr 可能来源于自然风化作用[13,62,63],且实测的整体含量远低于背景值; Ni 是一种易受土壤母质和成土过程影响的元素[64],也可能来自电镀冶金等工业排污[65]. Ni 含量平均值接近该地土壤背景值,且污染等级总体为无污染; 但它的变异系数(表 2)较高,在园区中部至南部均有富集,表现出较强的空间分异性. 经实地调查发现,这些样点所在工厂均存在不同程度的废渣违规堆放,这可能是 Ni 在部分区域偏高的原因. 因此 FAC4 应识别为自然来源和废渣堆填. FAC4 的源贡献率空间分布也印证了这一点.

FAC5 的主要贡献元素为 Pb(72.0%, 98.2%). Pb 是机动车燃油和尾气排放的特征元素[8,14,53,66],从 FAC5 的源贡献空间分布可以看出(图 4),该源的分布较为分散,高值点零星分布在整个园区内,在火车站等交通枢纽附近也有高值点. 结合园区内道路分布(图 1),可以将 FAC5 判断为交通排放源.

综上所述,源解析结果得到 5 类主要污染源,分别是化石燃料燃烧与化工生产源(33.73%、9.71%,分别为 PMF,RF 所得各源对土壤重金属的总贡献率,下同)、自然来源与废渣堆填(32.40%, 40.80%)、交通排放(24.49%, 48.08%)、燃煤与有色金属冶炼(5.43%, 0.11%)以及电镀与矿石冶炼(3.95%, 1.30%).

2.3.3 模型结果评价

PMF 模型更注重对总体变量的解释,会忽略部分不确定度较高的元素(如 Cu 和 Cr),致使其拟合度降低. 但 PMF 的优点在于,各元素的源贡献率,特别是总体变量的源贡献率更贴合园区实际,如化石燃料燃烧与化工生产源(33.73%,各源对土壤重金属的总贡献率,下同)是园区内重要污染来源,而机动车排放(24.49%)则相对较低. 本研究采样点均位于各工厂内部,包括 6 个化工厂、2 个冶金合金厂以及活性炭生产厂、矿石冶炼厂和制药厂各 1 个,化工企业的占比很高; 园区内道路密度相对较低(图 1),且大部分为厂矿专用公路,车流量很小; 从现场实际走访的情况来看,这些工厂均存在不同程度的废渣违规堆放,因此废渣堆填也是园区土壤重金属污染的重要来源之一. 根据园区实际情况,该园区的污染来源应以工业来源为主,即化石燃料燃烧与化工生产源和自然来源与废渣堆填源的贡献率应高于交通排放源,这也与其他工业园区的源解析结



均一化为 avg = 1

图 4　排放源均一化贡献率空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of emission source contribution

果相符[67,68]，PMF 模型的结果更合理. RF 模型得到的各源贡献率比例中，交通排放源（48. 08%）的占比偏高，高于化石燃料燃烧与化工生产源（9. 71%）和自然来源与废渣堆填源（40. 80%），与园区实际情况不符.

相对 PMF 模型的源解析结果，可以看出 RF 模型的各源的最主要的特征元素种类没有发生变化，但该最主要特征元素的源贡献率均有所上升，例如在源贡献率中（图 3），As 对 FAC2 的单源贡献率由 PMF 的 74. 5% 上升至 96. 3%，Ni 对 FAC4 的贡献率由 59. 0% 提高至 95. 4%，即污染源特征元素的“区分度”提高. RF 模型对各元素的预测含量与实际含量之间的回归分析散点拟合如图 5 所示. 相对于 PMF 模型，RF 模型在保持总变量 R^2（PMF 和 RF 的 R^2 分别为0. 963 3和0. 966 7）基本持平的情况下，提高了 Cu 和 Cr 的 R^2，模型解释率提高，显示了较高的预测精度，但各源的贡献率占比不太符合实际.

在输入相同的因子得分矩阵（即源谱）的情况下，RF 模型与 PMF 模型解析出来的污染源类别是一致的，具体表现在源的组成和特征元素相似；但源贡献率存在差异，原因是二者计算源贡献率的算法不同. PMF 将各原始变量的因子载荷作为源贡献率，表达提取的公因子对原始变量的影响程度；RF 则是将输入的因子得分矩阵作为特征，评估使用每个特征构建的决策树的性能，将特征的相对重要性数值作为源贡献率[27]. 相较于 PMF 模型，RF 模型

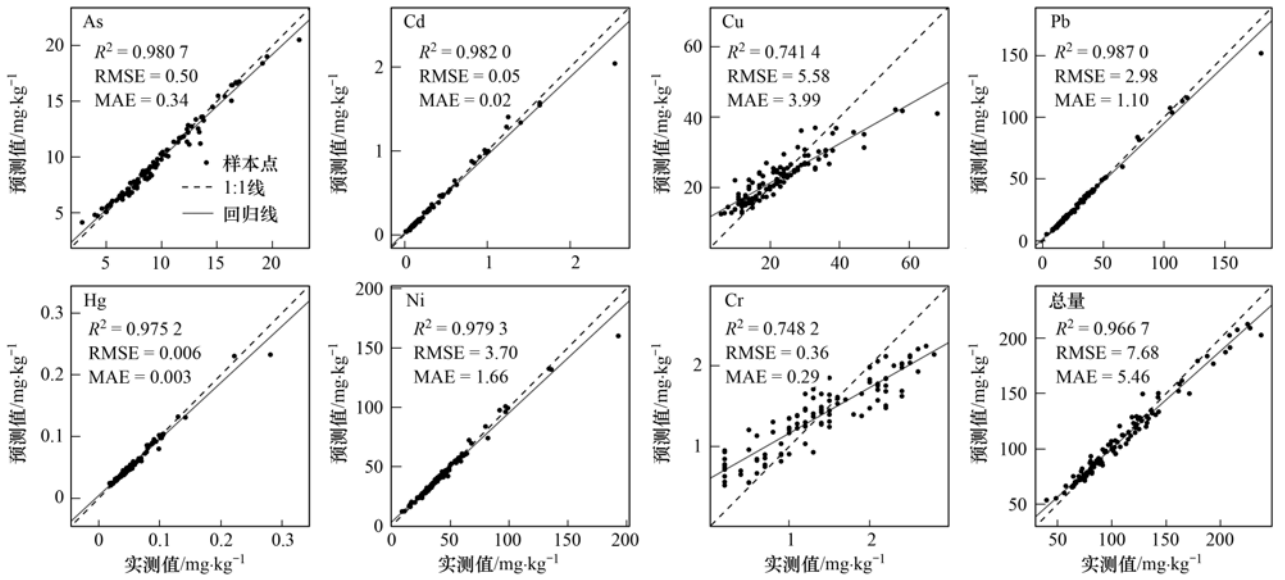


图 5 RF 模型预测含量与实际含量散点拟合

Fig. 5 Scatter-fitting for actual monitoring value and predicted values in RF model

在数据量更大的情况下能发挥更好的效果[23,26,27].

2.4 不确定性分析

由于土壤背景值缺少 Cr(Ⅵ)的准确数据,使用 1/7 这一经验值将测定值 Cr(Ⅵ)转换为总 Cr 参与污染和风险评价后续计算,这可能导致结果出现偏差. 此外,两个源解析模型各有优劣,PMF 源贡献率特征更符合园区实际情况,但个别元素的 R^2 偏低,RF 的各元素 R^2 拟合度更好,预测精度较高,但源贡献率特征与实际稍有出入. 作为机器学习方法的一种,RF 模型需要大量数据做支撑,因此增加训练模型所用的实际数据会提升模型效果,未来可将其应用到更大区域范围内,增加采样点位,并增加其他环境变量作为协变量[23,26],以取得更好的预测效果.

3 结论

(1)该工业园区土壤重金属的含量均远小于第二类建设用地土壤筛选值,但元素的空间离散程度大,并且除 As 和 Cr 之外的重金属含量均高于当地土壤背景值,且 Cd 和 Hg 富集倍数较大,表明受到了人为因素的干扰. 从空间分布上来看,不同元素的富集区域差异较大,但普遍在工厂附近富集.

(2)Hg 和 Cd 的潜在生态风险等级为强,其余 5 种元素为轻微生态风险; 地累积指数 Cd、Hg、Pb 为轻微污染,其他元素基本无污染. 结合富集倍数综合来看,Cd 和 Hg 是该工业园区的主要污染元素.

(3)该园区土壤重金属的主要来源可分为 5 类,分别是化石燃料燃烧与化工生产源(33.73%, 9.71%,分别为 PMF 和 RF 所得各源对土壤重金属的总贡献率,下同)、自然来源与废渣堆填(32.40%, 40.80%)、交通排放(24.49%, 48.08%)、燃煤与有色金属冶炼(5.43%, 0.11%)以及电镀与矿石冶炼(3.95%, 1.30%).

(4)PMF 和 RF 模型总体变量的 R^2 均达到 0.96 以上,RF 的单元素 R^2 更是都达到了 0.7 以上,模型预测重金属含量的能力较高; 源贡献比例方面,结合园区企业数量与道路密度情况,其污染来源应以工业源为主,PMF 模型的解释度更贴近园区实际情况.

参考文献:

[1] Järup L. Hazards of heavy metal contamination[J]. British Medical Bulletin, 2003, **68**: 167-182.

[2] Carr R, Zhang C S, Moles N, *et al*. Identification and mapping of heavy metal pollution in soils of a sports ground in Galway City, Ireland, using a portable XRF analyser and GIS[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2008, **30**(1): 45-52.

[3] 孙贤斌, 李玉成. 淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征[J]. 地理科学, 2013, **33**(10): 1238-1244.
Sun X B, Li Y C. The spatial distribution of soil heavy metals and variation characteristics of Datong abandoned coal mine Area in Huainan city[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, **33**(10): 1238-1244.

[4] 王菲, 吴泉源, 吕建树, 等. 山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3144-3150.
Wang F, Wu Q Y, Lv J S, *et al*. Spatial characteristics and environmental risk of heavy metals in typical gold mining area of Shandong Province[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 3144-3150.

[5] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1887-1894.
Fan X G, Mi W B, Ma Z N, *et al*. Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan, Northwest China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1887-1894.

[6] 罗成科，毕江涛，肖国举，等. 宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征及其评价[J]. 生态环境学报，2017，**26**(7)：1221-1227.
Luo C K, Bi J T, Xiao G J, *et al*. Pollution characteristics and assessment of heavy metals in soil of different industry zones of Ningdong base in Ningxia, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(7): 1221-1227.

[7] 张松林. 西北工业园区盐土重金属污染的盐生植物生态修复研究——以宁夏石嘴山惠农区为例[D]. 重庆：西南大学，2020.
Zhang S L. Research on phytoremediation of halophytes for heavy metal pollution of saline soil in northwest industrial park-a case study of Huinong District, Ningxia, China [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.

[8] 张慧，郑志志，杨欢，等. 基于多元统计和地统计的肇源县表层土壤重金属来源辨析[J]. 土壤，2017，**49**(4)：819-827.
Zhang H, Zheng Z Z, Yang H, *et al*. Discrimination of heavy metal sources in topsoil in Zhaoyuan county based on multivariate statistics and geostatistical[J]. Soils, 2017, **49**(4): 819-827.

[9] Chen X D, Lu X W, Yang G. Sources identification of heavy metals in urban topsoil from inside the Xi'an Second Ringroad, NW China using multivariate statistical methods[J]. CATENA, 2012, **98**: 73-78.

[10] 罗帅，马新月，王东，等. 重庆市场地土壤污染特征分析及行业来源识别[J]. 生态环境学报，2020，**29**(4)：810-818.
Luo S, Ma X Y, Wang D, *et al*. Analysis of soil pollution characteristics and identification of industry sources in contaminated sites in Chongqing city, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(4): 810-818.

[11] 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]. Environment Science, 2017, **38**(6): 2513-2521.

[12] 杨安，王艺涵，胡健，等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学，2020，**41**(2)：886-894.
Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al*. Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 886-894.

[13] Liang J, Feng C T, Zeng G M, *et al*. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **225**: 681-690.

[14] 夏子书，白一茹，王幼奇，等. 基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析[J]. 环境科学，2022，**43**(1)：432-441.
Xia Z S, Bai Y R, Wang Y Q, *et al*. Spatial Distribution and source analysis of soil heavy metals in a small watershed in the mountainous area of Southern Ningxia based on PMF model[J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 432-441.

[15] Hu W Y, Wang H F, Dong L R, *et al*. Source identification of heavy metals in Peri-Urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach [J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 650-661.

[16] 陈锦芳，方宏达，巫晶晶，等. 基于 PMF 和 Pb 同位素的农田土壤中重金属分布及来源解析[J]. 农业环境科学学报，2019，**38**(5)：1026-1035.
Chen J F, Fang H D, Wu J J, *et al*. Distribution and source apportionment of heavy metals in farmland soils using PMF and lead isotopic composition [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(5): 1026-1035.

[17] 卢鑫，胡文友，黄标，等. 基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. 环境科学，2018，**39**(3)：1421-1429.
Lu X, Hu W Y, Huang B, *et al*. Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1421-1429.

[18] Liao S Y, Jin G Q, Khan M A, *et al*. The quantitative source apportionment of heavy metals in peri-urban agricultural soils with UNMIX and input fluxes analysis[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, **21**, doi: 10.1016/j.eti.2020.101232.

[19] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al*. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide[EB/OL]. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&direntryid=308292, 2015-08-20.

[20] Feng R, Zheng H J, Gao H, *et al*. Recurrent Neural Network and random forest for analysis and accurate forecast of atmospheric pollutants: A case study in Hangzhou, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **231**: 1005-1015.

[21] Fei X F, Christakos G, Xiao R, *et al*. Improved heavy metal mapping and pollution source apportionment in Shanghai City soils using auxiliary information [J]. Science of the Total Environment, 2019, **661**: 168-177.

[22] Li H, Fu P H, Yang Y, *et al*. Exploring spatial distributions of increments in soil heavy metals and their relationships with environmental factors using GWR[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, **35**(10): 2173-2186.

[23] Huang H, Zhou Y, Liu Y J, *et al*. Source Apportionment and ecological risk assessment of potentially toxic elements in cultivated soils of Xiangzhou, China: A combined approach of geographic information system and random forest [J]. Sustainability, 2021, **13**(3), doi: 10.3390/su13031214.

[24] He X R, Song X J, Pang Y, *et al*. Distribution, sources, and ecological risk assessment of SVOCs in surface sediments from Guan River Estuary, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(7): 4001-4012.

[25] Stojić A, Stojić S S, Reljin I, *et al*. Comprehensive analysis of PM_{10} in Belgrade urban area on the basis of long-term measurements [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(11): 10722-10732.

[26] 刘斌，郭星，朱宇恩. 基于随机森林模型的土壤重金属源解析——以晋中盆地为例[J]. 干旱区资源与环境，2019，**33**(1)：106-111.
Liu B, Guo X, Zhu Y E. Analysis of soil heavy metal sources in Jinzhong basin based on random forest model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(1): 106-111.

[27] 张志豪，陈楠，祝波，等. 基于随机森林模型的武汉市城区大气 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学，2022，**43**(3)：1151-8.
Zhang Z H, Chen N, Zhu B, *et al*. Source analysis of ambient $PM_{2.5}$ in Wuhan city based on random forest model [J]. Environment Science, 2022, **43**(3): 1151-1158.

[28] GB/T 36197-2018，土壤质量 土壤采样技术指南[S].

[29] GB/T 22105.2-2008，土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分：土壤中总砷的测定[S].

[30] GB/T 22105.1-2008，土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分：土壤中总汞的测定[S].

[31] GB/T 17141-1997，土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法[S].

[32] HJ 491-2019，土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰

原子吸收分光光度法[S].
[33] HJ 1082-2019, 土壤和沉积物 六价铬的测定 碱溶液提取-火焰原子吸收分光光度法[S].
[34] Muller G. Heavy metals in the sediments of the rhine-changes since 1971[J]. Umschau in Wissenschaft Und Technik, 1979, **79**(24): 778-783.
[35] 李宁, 夏天翔, 刘增俊, 等. 铬渣污染土壤 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 组分中六价铬的生物可给性及健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2019, **14**(5): 276-286.
Li N, Xia T X, Liu Z J, *et al*. Bioaccessibility and health risk assessment of hexavalent chromium in PM_{10} and $PM_{2.5}$ fractions of chromium ore processing residue contaminated soils[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, **14**(5): 276-286.
[36] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
[37] 曹莉华, 张天舒, 付佳, 等. 能源型工业园区土壤重金属污染分布特征及污染源研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2017, **38**(2): 209-216.
Cao L H, Zhang T S, Fu J, *et al*. Distribution characteristics and pollution sources of heavy metal pollution in soil of energy type industrial parks[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2017, **38**(2): 209-216.
[38] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
[39] 王帅, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江河口表层沉积物中重金属污染评价及来源[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(10): 1110-1118.
Wang S, Hu G R, Yu R L, *et al*. Pollution assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments from Jiulong River Estuary[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(10): 1110-1118.
[40] 王玉, 辛存林, 于奭, 等. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4756-4766.
Wang Y, Xin C L, Yu S, *et al*. Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. Environment Science, 2022, **43**(9): 4756-4766.
[41] Liu J W, Chen Y J, Chao S H, *et al*. Emission control priority of $PM_{2.5}$-bound heavy metals in different seasons: A comprehensive analysis from health risk perspective[J]. Science of the Total Environment, 2018, **644**: 20-30.
[42] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al*. Seasonal and spatial variation of trace elements in multi-size airborne particulate matters of Beijing, China: Mass concentration, enrichment characteristics, source apportionment, chemical speciation and bioavailability[J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 257-265.
[43] Yang H N, Chen J, Wen J J, *et al*. Composition and sources of $PM_{2.5}$ around the heating periods of 2013 and 2014 in Beijing: Implications for efficient mitigation measures[J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**: 378-386.
[44] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, **45**(1): 5-32.
[45] Huang L, Zhu Y H, Zhai H H, *et al*. Recommendations on benchmarks for numerical air quality model applications in China - Part 1: $PM_{2.5}$ and chemical species[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, **21**(4): 2725-2743.
[46] Team R C. R: A language and environment for statistical computing[EB/OL]. https://www.semanticscholar.org/paper/R%3A-A-language-and-environment-for-statistical-Team/659408b243cec55de8d0a3bc51b81173007aa89b, 2022-08-24.
[47] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
[48] Liu J, Chen Y, Chao S, *et al*. Levels and health risks of PM2.5-bound toxic metals from firework/firecracker burning during festival periods in response to management strategies[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **171**: 406-413.
[49] 吕博, 赵玲双, 刘赟妮, 等. 汞污染的来源及修复技术[J]. 现代农业科技, 2017, (1): 188, 199.
[50] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al*. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **261**: 387-397.
[51] Li Y, Wang Y B, Gou X, *et al*. Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(6): 1124-1134.
[52] 朱晓丽, 薛博倩, 李雪, 等. 基于 PMF 模型的宝鸡铅锌尾矿库周边农田土壤重金属源解析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, **51**(1): 43-53.
Zhu X L, Xue B Q, Li X, *et al*. Sources apportionment of heavy metals in farmland soil around lead-zinc tailings reservoir based on PMF model[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, **51**(1): 43-53.
[53] 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.
[54] 蒋成爱, 吴启堂, 陈杖榴. 土壤中砷污染研究进展[J]. 土壤, 2004, **36**(3): 264-270.
Jiang C A, Wu Q T, Chen Z L. Arsenic contamination in the soil[J]. Soils, 2004, **36**(3): 264-270.
[55] Zhang T, Liu F, Yu X Z, *et al*. Risk assessment and ecotoxicological diagnosis of soil from a chemical industry park in Nanjing, China[J]. Ecotoxicology, 2021, **30**(7): 1303-1314.
[56] 乔红雍. 施肥对农田表层土壤重金属含量的影响及污染评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
Qiao H Y. Effect of fertilization on the heavy metal content and pollution evaluation of farmland topsoil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
[57] 陈景春, 易廷辉, 陈丽. 重庆市市售化肥重金属含量调查分析[J]. 湖南农业科学, 2017, (6): 41-44.
Chen J C, Yi T H, Chen L. Investigation of heavy metal concentrations of commercial fertilizers in Chongqing[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017, (6): 41-44.
[58] Kartal Ş, Aydın Z, Tokaltoğlu Ş. Fractionation of metals in street sediment samples by using the BCR sequential extraction procedure and multivariate statistical elucidation of the data[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **132**(1): 80-89.
[59] Cloquet C, Carignan J, Libourel G, *et al*. Tracing source pollution in soils using cadmium and lead isotopes[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(8): 2525-2530.
[60] 黎伟田. 湖南柿竹园矿区及周边土壤镉污染分布特征与来源研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
Li W T. Distribution characteristics and sources of Cd-contamination in Shizhuyuan mine and its surrounding soils, Hunan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

[61] 常慧. 贵州省典型污染区镉的空间分布和来源识别——以万山汞矿区为例[D]. 北京：中国地质大学(北京), 2019.
Chang H. Spatial distribution and source identification of cadmium in typical polluted areas of Guizhou Province：A case study of Wanshan mercury mine[D]. Beijing：China University of Geosciences (Beijing), 2019.

[62] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, *et al*. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. Chemosphere, 2017, **168**：1658-1668.

[63] Jiang H H, Cai L M, Wen H H, *et al*. An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals [J]. Science of the Total Environment, 2020, **701**, doi：10. 1016/j. scitotenv. 2019. 134466.

[64] 郑袁明, 陈煌, 陈同斌, 等. 北京市土壤中 Cr, Ni 含量的空间结构与分布特征[J]. 第四纪研究, 2003, **23**(4)：436-445.
Zheng Y M, Chen H, Chen T B, *et al*. Spatial distribution patterns of Cr and Ni in soils of Beijing [J]. Quaternary Sciences, 2003, **23**(4)：436-445.

[65] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南经济快速发展区土壤 Ni 的形态分布影响因素——以昆山市为例[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(10)：1953-1959.
Wan H Y, Zhou S L, Zhao Q G. Factors influencing chemical forms of soil Ni in the rapidly developing region of south Jiangsu Province ——A case study from Kunshan city[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(10)：1953-1959.

[66] Duong T T T, Lee B K. Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics [J]. Journal of Environmental Management, 2011, **92**(3)：554-562.

[67] Xu Y, Shi H D, Fei Y, *et al*. Identification of soil heavy metal sources in a large-scale area affected by industry [J]. Sustainability, 2021, **13**(2), doi：10.3390/su13020511.

[68] 张瑞. 某典型工业园周边农田土壤重金属的健康风险评估及来源解析[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2020.
Zhang R. Health risk assessment and source apportionment of heavy metals in farmland soil around a typical industrial park [D]. Yangling：Northwest A&F University, 2020.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 6

Jun. 15, 2023

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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3043)

Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, *et al.* (3054)

Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in $PM_{2.5}$ During the Heating Period in Baoding ····· LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, *et al.* (3063)

Transport Influence and Potential Sources of $PM_{2.5}$ Pollution for Nanjing ····· XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3098)

Health Benefit Evaluation for $PM_{2.5}$ as Well as $O_{3\text{-}8h}$ Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020 ····· ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, *et al.* (3108)

Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022 ····· LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, *et al.* (3117)

Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province ····· WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, *et al.* (3130)

Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an ····· ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, *et al.* (3142)

Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City ····· LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3184)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing ····· JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, *et al.* (3198)

Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes ····· GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, *et al.* (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, *et al.* (3217)

Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City ····· LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, *et al.* (3228)

Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin ····· YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, *et al.* (3237)

Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir ····· CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3278)

Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar ····· HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, *et al.* (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, *et al.* (3301)

Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis ····· FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, *et al.* (3309)

Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China ····· HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, *et al.* (3321)

Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China ····· JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, *et al.* (3329)

Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models ····· DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, *et al.* (3343)

Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye ····· SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, *et al.* (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, *et al.* (3364)

Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of *Larix principis-rupprechtii* Forest in Luya Mountain ····· MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3396)

Effects of Different Planting Years of *Dendrocalamus brandisii* on Soil Fungal Community ····· ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, *et al.* (3408)

Effects of Biochar Amendment on N_2O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas ····· CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, *et al.* (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, *et al.* (3426)

Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield ····· MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, *et al.* (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, *et al.* (3450)

Characterization and Health Risk of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province ····· HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3520)

Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone ····· LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, *et al.* (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, *et al.* (3544)

Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City ····· TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3585)

Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables ····· QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, *et al.* (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-rui, *et al.* (3609)

Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning ····· NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, *et al.* (3619)