

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精催化 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 张力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)	

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例

方嘉¹, 何影¹, 黄乃涛², 支裕优¹, 傅伟军^{1*}

(1. 浙江农林大学环境与资源学院, 临安 311300; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210018)

摘要: 为探究农田土壤重金属污染特征、来源及其人体健康风险, 为农田污染治理提供重要科学依据, 采集了浙江省典型电子垃圾拆解区周边农田 133 个表层(0~20 cm)土壤样本, 测定了土壤 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、As 和 Hg 含量, 运用多种方法评价重金属污染程度及生态风险, 采用正定矩阵因子分解法(PMF)融合地统计学, 解译污染来源及定量各个污染源的贡献度, 将源解析结果和人体健康风险评价模型相结合, 从来源暴露角度评价了各个污染源对人体健康的风险。结果表明, $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{As})$ 和 $\omega(\text{Hg})$ 平均值: 0.76、65.22、92.02、103.92、198.49、36.65、5.97 和 0.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd 和 Cu 含量平均值均高于农用地土壤污染风险筛选值, 点位污染占比分别为 85.71% 和 96.24%。Pb、Cr、Zn 和 Ni 含量平均值超过浙江省温黄平原土壤背景值, As 和 Hg 在限值内。污染评价结果表明, 土壤综合潜在生态风险以轻-中度为主, 占比达 90.98%, 较高和高度风险占比都为 4.51%, Cd 为主要潜在生态风险元素。研究区重金属污染来源主要为电子垃圾拆解工序污染源(26.82%)、燃煤及交通排放混合源(34.50%)、自然母质及农业投入混合源(25.59%)和电子垃圾酸洗径流及固废淋溶来源(13.09%)。儿童重金属暴露健康风险显著大于成年人, 自然母质和农业投入混合源对人体健康风险贡献最多, Cr 是对人体健康风险影响最大的元素。

关键词: 农田土壤; 土壤重金属; 空间分布; 污染源解析; 健康风险评价

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-4027-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202208153

Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province

FANG Jia¹, HE Ying¹, HUANG Nai-tao², ZHI Yu-you¹, FU Wei-jun^{1*}

(1. College of Environment and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210018, China)

Abstract: In order to explore the characteristics and sources of heavy metals in farmland soil and their risks to human health and to provide an important scientific basis for farmland pollution control, 133 surface soils (0-20 cm) were collected from typical agricultural production areas in Zhejiang Province, and the contents of soil Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni, As, and Hg were determined. Various methods were applied to evaluate the degree of heavy metal pollution in farmland and its ecological risks in the study area. The method of combining Kriging interpolation and positive definite matrix factor analysis (PMF) was applied to analyze the pollution sources and quantify the contribution of each pollution source. Combined with the health risk assessment model, the risk to human health of each pollution source was evaluated from the perspective of source exposure. The results showed that the average $\omega(\text{Cd})$, $\omega(\text{Pb})$, $\omega(\text{Cr})$, $\omega(\text{Cu})$, $\omega(\text{Zn})$, $\omega(\text{Ni})$, $\omega(\text{As})$, and $\omega(\text{Hg})$ were 0.76, 65.22, 92.02, 103.92, 198.49, 36.65, 5.97, and 0.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The average contents of Cd and Cu were higher than the risk screening values of soil contamination of agricultural land, and 85.71% and 96.24% of soil was contaminated by heavy metals. The average contents of Pb, Cr, Zn, and Ni exceeded the soil background values of the Wenhuan Plain in Zhejiang Province, and the As and Hg contents were within the limit values. The potential soil ecological risks were mainly light-moderate, accounting for 90.98%, and both high and higher risk accounted for 4.51%; Cd was the main potential ecological risk element. The main sources of heavy metal pollution in the study area were the sources of the electronic waste dismantling process (26.82%), the mixed sources of coal combustion and traffic emissions (34.50%), mixed sources of natural parent materials and agricultural inputs (25.59%), and e-waste pickling runoff and solid waste leaching sources (13.09%). The health risk of heavy metal exposure to children was significantly greater than that in adults. Mixed sources of natural parent materials and agricultural inputs contributed the most to human health risks, and Cr was the element with the greatest contribution to human health risks.

Key words: farmland; soil heavy metal; spatial distribution; pollution source apportionment; health risk assessment

当前,土壤重金属污染因其毒性强、耐持久和生物降解性差等特点,受到国内外学者的重点关注^[1-6]。据统计,我国土壤污染超标率达 16.1%,重金属是主要污染物,其中耕地重金属超标(中-重度)污染点位占比为 2.5%,面积达 23 523 km^2 (约 3 488 万亩)^[7]。农田重金属来源主要有化肥和农药的过量施用、交通运输和工业排放等^[8-10]。有研究发现中国一些地区的电子垃圾拆解活动也是农田土壤重金属的

重要来源^[11,12]。据报道,全球电子垃圾产量已达 53.6 Mt,并且 2030 年有望达到 74 Mt,中国是最大的电子垃圾生产国,输入量占世界输入量的一半^[13,14]。废旧电器拆解多在家庭小作坊进行,不规范的拆解流程,

收稿日期: 2022-08-17; 修订日期: 2022-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801302)

作者简介: 方嘉(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染源解析及风险评价, E-mail: fangjia@stu.zafu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: fuweijun@zafu.edu.cn

如露天焚烧、酸解和线路板破碎等导致大量重金属和有机污染物进入环境,在土壤中富集^[15]. 人体接触土壤重金属的途径主要有皮肤接触、手-口意外食入和呼吸吸入,富集在人体后产生健康危害^[16~18]. 因此识别解析农田土壤污染源,评价健康风险,可为农田重金属污染防治提供科学依据.

相关性分析和主成分分析常用来识别土壤重金属的相互关系,定量污染源种类^[19~21]. 地统计学等空间分析方法用来可视化农田土壤重金属污染状况,帮助识别潜在污染源^[22~24]. 因此,有研究结合以上方法对电子垃圾拆解区农田重金属污染进行源解析,发现电子垃圾拆解活动是土壤重金属的主要外来源,然而,这些方法无法准确获得污染源对重金属的贡献率^[21]. 为了准确获得污染源的贡献率,减少污染源对农田的重金属输入,已有研究应用正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)成功进行污染源解析,得到污染源的个数和每个污染源对某个重金属的贡献率^[25~30]. 也有学者应用健康风险评价模型估算了土壤重金属健康风险,他们大多从含量角度计算了健康风险,但重金属来源不同,其有效性、毒性和生物可利用度有很大不同^[11]. 前人研究仅单独进行污染源解析或评价人体接触重金属的健康风险,少有研究将电子垃圾拆解区农田重金属人体健康风险评价进行源分配. 因此,本文选取浙江省某电子垃圾拆解区农田作为研究对象,系统分析了重金属污染特征、潜在生态风险、污染源及其贡献率,再计算每个源中重金属健康风险,量化污染源对人体健康风险. 本研究系统整合了重金属污染源解析和风险评价,以期对重金属污染防治提供理论支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于浙江省东南部,属亚热带季风气候,年平均气温和降雨量分别为 17.6℃ 和 1 583 mm. 研究区地形以平原为主,西北部为丘陵地带,东南部地势较低,行政面积为 27.09 km²,适宜各种作物的栽种. 本研究区在 20 世纪 90 年代到 21 世纪初存在着大量家庭作坊式电子垃圾回收拆解点,许多位于农田附近,虽然大部分非法电子垃圾拆解点已关闭,但过去粗放的回收拆解方式已使大量污染物进入环境,对当地居民存在较大健康风险.

1.2 样品采集与分析

本研究根据当地地形分布状况,利用 100 m × 100 m 网格采样法及 3S 技术,共采集了 133 个表层(0~20 cm)土样(图 1). 每个样品由在半径为 5 m

范围内用木铲采集的 5 个子样品混合而成,总重量为 1 kg,采用 GPS 定位仪记录采样点经纬度信息.

土壤样品经自然风干后,去除土壤中的石块和植物根系等异物,取土研磨,分别过 10 目和 100 目的筛,以供检测备用. 使用 HNO₃-HCl-HF-HClO₄ 对土样进行消解,选用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Fisher Scientific, 美国)对土壤 Cd、Pb、Zn、Cr、Cu、Ni、As 和 Hg 进行测定,检出限分别为 0.01、0.2、0.025、2、0.06、0.025、0.6 和 0.005 mg·kg⁻¹. 为保证准确度,每 30 个样品插入 1 个重复样和 4 个标准物质(GSS-30、GSS-32、GSB-5、GSB-27)进行质量控制,样品回收率在 96%~108%,测定误差在允许范围内.

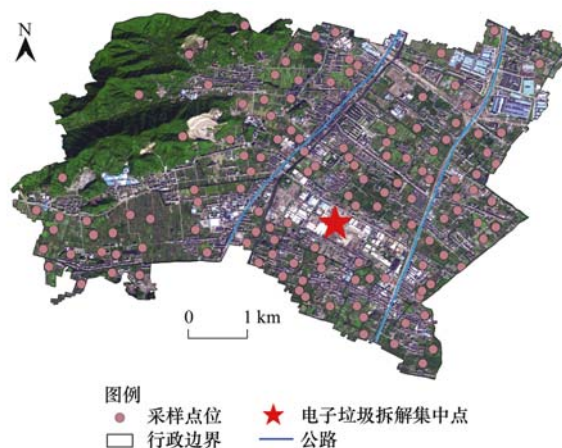


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 材料与方法

1.3.1 单因子污染指数法

利用单因子污染指数法评价研究区农田某一重金属污染程度,其计算公式如下所示^[6]:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为某一重金属的单因子污染指数, C_i 为某一重金属的实测值(mg·kg⁻¹), S_i 为某一重金属评价标准值(mg·kg⁻¹),选择浙江省温黄平原土壤环境背景值作为参比值^[31],单因子污染指数分级标准见文献[6].

1.3.2 地累积指数法

地累积指数法可用于评价研究区表层土壤的重金属污染程度,其公式如下所示^[30]:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i/(K \times C_b)] \quad (2)$$

式中, I_{geo} 为某一重金属的地累积指数, C_i 为某一重金属的实测值(mg·kg⁻¹), C_b 为某一重金属评价参比值(mg·kg⁻¹),选择浙江省温黄平原土壤环境背景值作为参比值, K 为考虑各地岩石差异可能会导致背景值变化而设的系数,一般为 1.5^[6],地累积指

数分级标准见文献[6].

1.3.3 潜在生态风险评价指数

潜在生态风险评价指数考虑了环境中多种重金属污染物的综合影响, 可用来评价研究区中土壤重金属对环境的危害程度^[28,29], 其公式如下:

$$E_i = T_i \times C_i / B_i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

式中, E_i 为重金属 i 的单项潜在生态风险指数, T_i 为重金属 i 的毒性相应系数 ($Cd = 30, Pb = Cu = Ni = 5, Hg = 40, Cr = 2, Zn = 1, As = 10$)^[30], C_i 为重金属 i 的实测值 ($mg \cdot kg^{-1}$), B_i 为重金属 i 的评价标准值 ($mg \cdot kg^{-1}$), 选择浙江省温黄平原土壤环境背景值作为评价标准, RI 为重金属综合潜在生态风险指数, 潜在生态风险指数划分等级见文献[30,32].

1.3.4 正定矩阵因子分解模型

本研究通过相关性分析结合土壤重金属空间分布, 初步识别了重金属来源的人为源和自然源. 再采用 PMF 模型准确给出重金属潜在来源及各个源对重金属贡献度.

PMF 是由 USEPA 推荐使用的一种受体模型分析方法, 将多维度数据原始矩阵 X 通过因子化分解成两个矩阵: 源剖面矩阵 F_{kj} 和贡献矩阵 G_{ik} 及残差矩阵 e_{ij} , 其公式为^[27,28,33,34]:

$$X = \sum_{k=1}^p F_{kj} G_{ik} + e_{ij} \quad (5)$$

因子贡献和分布用最小化目标函数 Q 来确定, 其公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (e_{ij} / u_{ij}) \quad (6)$$

式中, u_{ij} 为土壤中重金属的不确定度. 不确定度公式如下:

$$u_{ij} = \begin{cases} (5/6) \times MDL, & C \leq MDL \\ \sqrt{(EF \times C)^2 + (0.5 \times MDL)^2}, & C > MDL \end{cases} \quad (7)$$

式中, C 为重金属实测值 ($mg \cdot kg^{-1}$), EF 为相对不确定度, MDL 表示样品检出限 ($As, Hg, Cr, Cd, Pb, Cu, Zn$ 和 Ni 的检出限分别为 0.01、0.005、5、0.05、0.2、1、0.5 和 5 $mg \cdot kg^{-1}$).

1.3.5 人体健康风险评价

本研究采用美国环保署 (USEPA) 推荐的暴露风险模型进行土壤重金属对人体健康风险评价. 表层土壤颗粒主要通过意外食入、皮肤接触和意外吸入这 3 种途径进入到人体当中, 3 种不同途径吸收污染土壤颗粒日均暴露量公式如下^[11]:

$$ADD_{\text{意外食入}} = \frac{C_i \times \text{IngR} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (8)$$

$$ADD_{\text{皮肤接触}} = \frac{C_i \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (9)$$

$$ADD_{\text{意外吸入}} = \frac{C_i \times APM \times \text{InhR} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (10)$$

以上公式相关参数含义及参考值见文献[11].

重金属潜在非致癌效应通常采用单个重金属的非致癌风险指数 (hazard quotient, HQ) 和总非致癌风险指数 (hazard index, HI) 来表征^[33]:

$$HQ = ADD / RfD \quad (11)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i = \sum_{i=1}^n (ADD_i / RfD_i) \quad (12)$$

式中, RfD 为参考剂量. 非致癌风险判断标准见文献[20].

潜在致癌风险 (carcinogenic risk, CR) 表示因暴露于某些污染物导致癌变的概率, 公式如下^[20]:

$$CR = ADD \times SF \quad (13)$$

$$TCR = \sum_j^m \sum_i^n CR_{ij} \quad (14)$$

式中, SF 为致癌斜率因子, TCR 为重金属总致癌风险, SF 参考值和致癌风险判断标准见文献[12,20].

1.3.6 数据处理

采用 SPSS 21.0 和 Microsoft excel 2019 软件对重金属含量统计分析、污染评价、潜在生态风险评价与人体健康风险评价, EPA PMF 5.0 软件进行 PMF 源解析, 采用 ArcGIS 10.8 软件对土壤重金属含量进行普通克里格插值得到重金属空间分布图, 相关性分析图和桑基图采用 Origin 2021 绘制.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量描述统计分析

研究区表层土壤重金属 $\omega(Zn)$ 、 $\omega(Cu)$ 、 $\omega(Cr)$ 、 $\omega(Pb)$ 、 $\omega(Ni)$ 、 $\omega(As)$ 、 $\omega(Cd)$ 和 $\omega(Hg)$ 平均值为: 198.49、103.92、92.02、65.22、36.65、5.97、0.76 和 0.20 $mg \cdot kg^{-1}$ (表 1), 含量平均值为浙江省温黄平原土壤环境背景值的 1.81、3.68、1.40、1.47、1.23、0.83、3.30 和 0.84 倍. 相比浙江省温黄平原土壤环境背景值, Cu 、 Pb 、 Cd 、 Cr 、 Zn 、 Ni 、 Hg 和 As 的超标率分别为: 96.24%、86.47%、85.71%、84.96%、83.46%、75.94%、24.81% 和 18.80%. 以农用地土壤污染风险筛选值作为标准^[35], Cd 、 Cu 、 Zn 和 Pb 的超标率为 69.92%、66.17%、23.31% 和 18.05%, 土壤样品其

余重金属含量均在限值内,说明研究区农田土壤有了一定程度的 Cd、Cu、Zn 和 Pb 富集.

表1 土壤重金属含量描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistics of soil heavy metal contents									
项目	pH	Cd	Hg	As	Pb	Cu	Ni	Zn	Cr
最小值/mg·kg ⁻¹	4.34	0.05	0.04	2.32	26.81	9.39	7.34	49.6	20.96
最大值/mg·kg ⁻¹	8.52	7.69	0.74	11.2	286.31	1 001.61	59.41	1 527.99	152.36
平均值/mg·kg ⁻¹	5.92	0.76	0.2	5.97	65.22	103.92	36.65	198.49	92.02
标准差/mg·kg ⁻¹	0.88	1.16	0.1	1.44	30.57	114.52	10.35	164.06	24.45
变异系数/%	14.86	152.63	50	24.12	46.87	110.2	28.24	82.65	26.57
背景值 ²⁾ /mg·kg ⁻¹	— ¹⁾	0.23	0.237	7.19	44.37	28.27	29.88	109.57	65.65
风险筛选值 ³⁾ /mg·kg ⁻¹	pH≤5.5	0.3	1.3	40	70	50	60	200	150
	5.5<pH≤6.5	0.3	1.8	40	90	50	70	200	150
	6.5<pH≤7.5	0.3	2.4	30	120	100	100	250	200
	pH>7.5	0.6	3.4	25	170	100	190	300	250
超标率/%	—	85.71	24.81	18.8	86.47	96.24	75.94	83.46	84.96
超标率/%	—	69.92	0	0	18.05	66.17	0	23.31	0

1) “—”表示没有相关数据; 2) 背景值:浙江省温黄平原土壤重金属背景值^[31]; 3) 筛选值:农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018)^[35]

变异系数(CV)用来表示土壤重金属变异程度^[30]. 重金属变异系数为: Cd (152.63%) > Cu (110.20%) > Zn (82.65%) > Hg (50.00%) > Pb (46.87%) > Ni (28.24%) > Cr (26.57%) > As (24.12%). 陈林等^[30]研究指出,变异系数小于16%时为弱变异,重金属主要受自然源影响;介于16%~36%为中等变异,重金属主要受自然和人为因素混合影响;变异系数大于36%时为强变异,重金属主要受人为因素影响.除Ni、Cr和As为中等变异外,其余皆为强变异,说明人类活动成为了土壤重金属含量和空间分布的重要影响因素^[2,22,36]. 研究区农田土壤中有明显的Cd、Cu、Pb和Zn等重金属的累积,与工业排放、交通运输和化肥农药等外部输入源的重金属一致^[11,37,38].

2.2 重金属污染评价

以农用地土壤污染风险筛选值为限量标准,

重金属单因子污染指数平均值为: Cu (3.68) > Cd (3.32) > Zn (1.81) > Pb (1.47) > Cr (1.4) > Ni (1.23) > Hg (0.85) > As (0.83), 土壤重金属污染占比为: Cu (96.24%) > Pb (86.46%) > Cd (85.71%) > Cr (84.97%) > Zn (83.46%) > Ni (75.94%) > Hg (24.81%) > As (18.8%) (表2), Cd和Cu的SPI平均值在3以上,总体为中度污染,中-重度污染比例分别达到25.56%和38.34%,说明部分土壤有较为严重的Cd和Cu污染. Cr、Pb、Ni和Zn总体表现为轻微污染,As和Hg总体为无污染,大部分土壤样品中Cr、Pb、Ni和Zn为轻微-轻度污染,0.75%和1.5%的土壤样品的Pb污染水平分别为中度和重度,18.8%和23.31%的土壤样品受到As和Hg的轻微污染,而仅有0.75%的土壤样品受到Hg的轻度或中度污染.

表2 不同污染程度下土壤样品数量和占比统计汇总

Table 2 Summary of statistical values related to the number and proportion of soil samples at different degrees of pollution									
项目	类别	SPI _{Cr}	SPI _{Pb}	SPI _{Cd}	SPI _{Hg}	SPI _{As}	SPI _{Cu}	SPI _{Ni}	SPI _{Zn}
SPI 平均值		1.4	1.47	3.32	0.85	0.83	3.68	1.23	1.81
样品数量/个	无污染	20	18	19	100	108	5	32	22
	轻微污染	110	102	57	31	25	45	101	82
	轻度污染	3	10	23	1	0	32	0	12
	中度污染	0	1	17	1	0	22	0	14
	重度污染	0	2	17	0	0	29	0	3
样品占比/%	无污染	15.03	13.53	14.29	75.19	81.2	3.76	24.06	16.54
	轻微污染	82.71	76.69	42.86	23.31	18.8	33.83	75.94	61.65
	轻度污染	2.26	7.52	17.29	0.75	0	24.07	0	9.02
	中度污染	0	0.75	12.78	0.75	0	16.54	0	10.53
	重度污染	0	1.5	12.78	0	0	21.8	0	2.26

土壤样点重金属地累积指数(I_{geo})平均值分别为: Cd (2.23) > Cu (0.85) > Pb (-0.12) > Cr (-0.15) > Ni (-0.35) > As (-0.88) >

Hg (-0.96) > Zn (-1.43). 土壤地累积污染占比为: Cu (74.44%) > Cd (61.90%) > Cr (53.38%) > Pb (42.86%) > Ni (22.56%) > Hg (6.01%) > Zn

(1.50%) > As(0.75%) (表3). 土壤点位 Cd 污染最严重, 总体为中度-重度污染, 35.34% 的土壤点位 Cd 为轻度污染, 中度污染为 15.79%, 中度-重度污染为 4.51%, 重度污染为 3.01%, 重度-极度污染为 2.26%, 无污染比例为 39.10%; 土壤点位 Cu 总体为轻度污染, 42.11% 的土壤点位 Cd 为轻度污染, 中度污染为 21.05%, 中度-重度污染为 8.27%, 重度污染为 2.26%, 重度-极度污染为 0.75%, 无污染比例为 25.56%; 其余重金属地累积指数均小于 0, 总体为无污染状态, 但 Cr 和 Pb 的轻度污染及以上水平也分别为 53.38% 和 35.33%.

重金属潜在生态风险平均值为: Cd(99.69) >

Hg(34.09) > Cu(18.38) > As(8.3) > Pb(7.35) > Ni(6.13) > Cr(2.8) > Zn(1.81), 除 Cd 外, 其余重金属生态风险为轻微风险, Cd 生态风险达到了较高风险. 土壤样品 Cr、Pb、As、Zn 和 Ni 是轻微风险. 有 28.57% 土壤样品 Cd 生态风险为较高风险或更严重的生态风险, 其中较高风险为 17.29%, 高度风险为 6.02%, 极高风险为 5.26%. Hg 中度生态风险为 23.31%, 较高风险为 1.50% (表4). 根据 RI 分级, 该地区总体生态风险为中轻度风险, 这可能是由于重金属的毒性响应系数不同, 虽然 Cr、Zn、Ni、Pb、Cu 含量平均值相比于其他重金属很高, 但是它们的毒性响应系数相对来说很低^[2].

表3 不同地累积污染下土壤样品数量和占比统计汇总
Table 3 Summary of statistical values related to the number and proportion of soil samples under different geo-accumulation pollution

项目	类别	I_{geoCr}	I_{geoPb}	I_{geoCd}	I_{geoHg}	I_{geoAs}	I_{geoCu}	I_{geoNi}	I_{geoZn}
I_{geo} 平均值		-0.15	-0.12	2.23	-0.96	-0.88	0.85	-0.35	-1.43
样品数量/个	无	62	86	52	125	132	34	103	131
	轻度	71	44	47	7	1	56	30	2
	中度	0	2	21	1	0	28	0	0
	中度-重度	0	1	6	0	0	11	0	0
	重度	0	0	4	0	0	3	0	0
	重度-极度	0	0	3	0	0	1	0	0
	极度	0	0	0	0	0	0	0	0
样品占比/%	无	46.62	64.67	39.1	93.99	99.25	25.56	77.44	98.5
	轻度	53.38	33.08	35.34	5.26	0.75	42.11	22.56	1.5
	中度	0	1.5	15.79	0.75	0	21.05	0	0
	中度-重度	0	0.75	4.51	0	0	8.27	0	0
	重度	0	0	3.01	0	0	2.26	0	0
	重度-极度	0	0	2.26	0	0	0.75	0	0
	极度	0	0	0	0	0	0	0	0

表4 不同程度生态风险(ER)和潜在生态风险(RI)下土壤样本数量和占比统计汇总
Table 4 Summary of statistical values related to the number and proportion of soil samples at different degrees of ecological risk (ER) and potential ecological risk (RI)

项目	类别	ER _{Cr}	ER _{Pb}	ER _{Cd}	ER _{Hg}	ER _{As}	ER _{Cu}	ER _{Ni}	ER _{Zn}	RI
ER 平均值		2.8	7.35	99.69	34.09	8.3	18.38	6.13	1.81	178.57
样品数量/个	轻微风险	133	133	38	100	133	120	133	133	83
	中度风险	0	0	57	31	0	11	0	0	38
	较高风险	0	0	23	2	0	1	0	0	6
	高度风险	0	0	8	0	0	1	0	0	6
	极高风险	0	0	7	0	0	0	0	0	— ¹⁾
样品占比/%	轻微风险	100	100	28.57	75.19	100	90.23	100	100	62.41
	中度风险	0	0	42.86	23.31	0	8.27	0	0	28.57
	较高风险	0	0	17.29	1.5	0	0.75	0	0	4.51
	高度风险	0	0	6.02	0	0	0.75	0	0	4.51
	极高风险	0	0	5.26	0	0	0	0	0	—

1) “—”表示没有相关数据

2.3 重金属含量空间分布

重金属 Cu、As、Ni 和 Zn 的空间分布相似, 高值区分布在研究区中部和东南部, Pb 高值区在西南部和东南部, Hg 和 Cd 的高值区位于中

部, Cr 的高值区分布在南部和东北部. 除 Pb、Hg 和 Cd 外, 其余重金属含量均呈现出由西向东逐渐增加走向(图2). 除 Pb 外, 其余重金属含量在东南部和中部土壤中有着较高程度的累积, 经实

地走访,研究区东南部是居民集中工作生活点,东南部和中部工厂集中,旧时家庭作坊式电子垃圾拆解回收点也集中于此.有一条省道从北至南

贯穿东部,一条国道从北至南贯穿西部,可见,人类活动是造成重金属在东南部农田土壤中累积的重要因素.

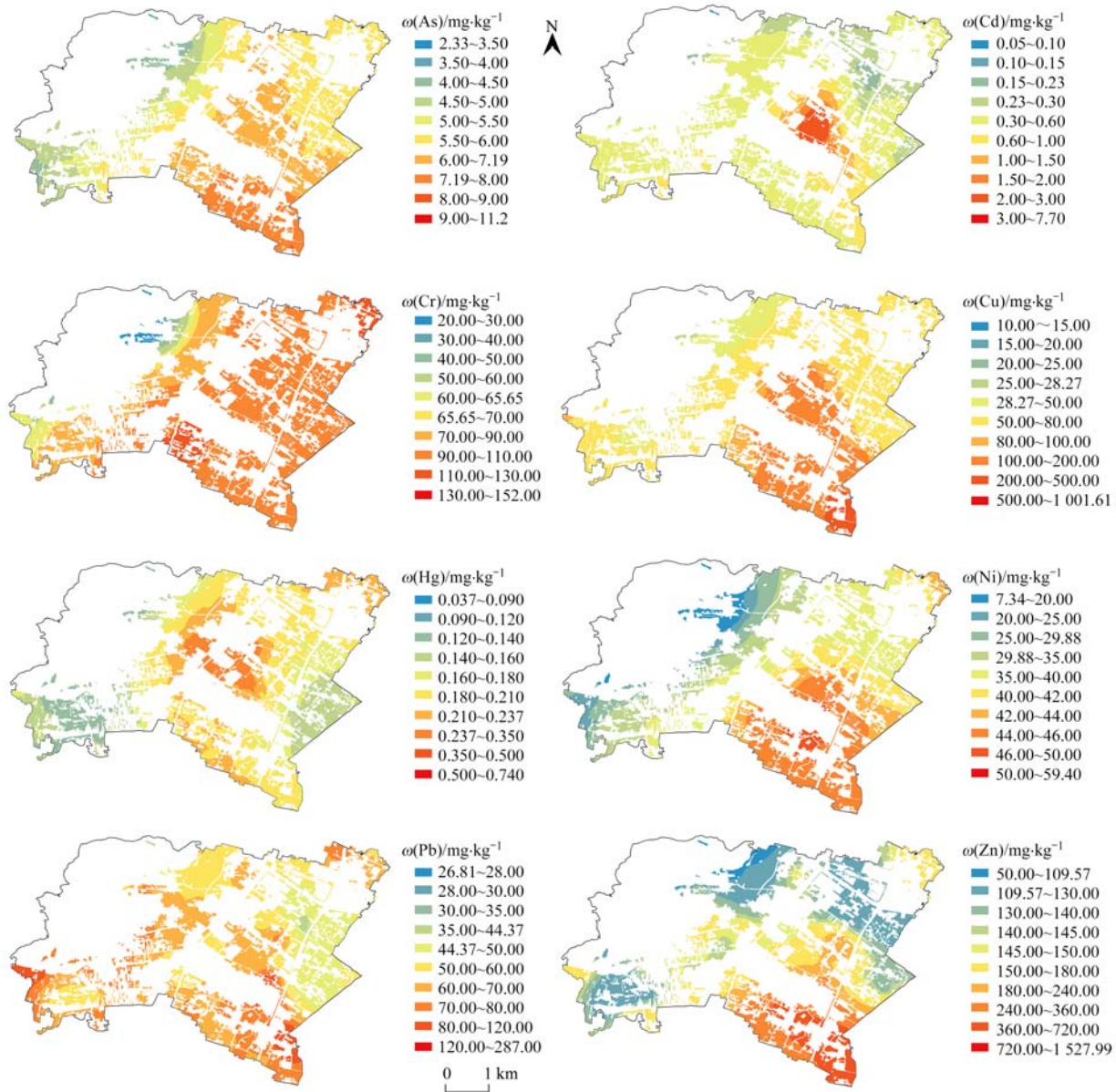


图2 研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil heavy metal contents in the study area

2.4 重金属污染源解析

相关性分析显示,As 与 Cr、Ni、Zn 和 Cu 呈显著正相关($P < 0.05$); Cd 与 Cu 呈显著正相关($P < 0.05$); Cr 与 Ni 的 Pearson 系数大于 0.9 ($P < 0.05$); Cu 与 Ni、Pb、Zn 和 Hg 呈显著正相关($P < 0.05$); Pb 与 Zn 呈显著正相关($P < 0.05$) (图 3), 以上结果说明这些重金属可能有着相似或相同的污染源^[6]. As 与 Cd、Pb 和 Hg, Cd 与 Ni、Pb 和 Hg, Cr 与 Cu、Zn, Ni 和 Zn, Pb 与 Hg, Zn 与 Hg 的相关性较弱,可能来自不同污染源. 电子垃圾拆解站点中不合

浓度的重金属元素,这被认为可能是重金属的重要污染来源^[38~40].

本研究应用 PMF 模型对研究区农田土壤重金属进行源解析(图 4),运行 EPA 5.0 软件,设定因子数为 3~6,运算次数根据系统推荐值为 20 次,随机选择初始点依次运行 PMF 模型. 发现因子数的变化对源解析的结果有着显著的影响,经运算,确定因子数设为 4 时, Q_{Robust} 与 Q_{True} 比值趋于稳定,达到最佳模型拟合效果,重金属元素含量大部分残差都位于 $-3 \sim 3$ 之间. 除 As 的拟合 R^2 为 0.465 外, Cd、Cr、Cu 和 Ni 的拟合 R^2 均大于 0.9,其余元素的 R^2 均大

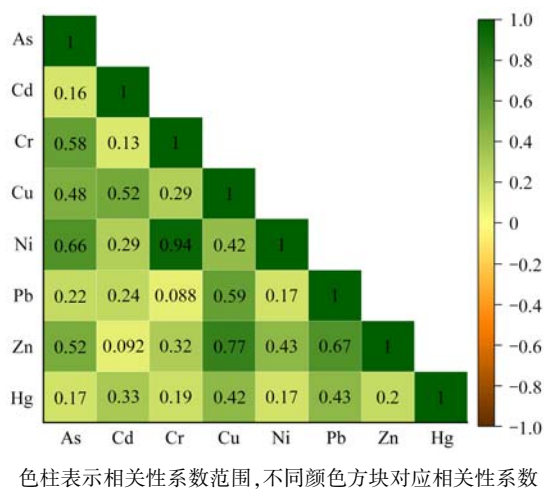


图3 重金属相关性系数矩阵

Fig. 3 Correlation plot of heavy metals

于 0.7,表明模型整体拟合效果较好,可以较好地解析污染源信息^[29].

因子1的主要载荷元素为 Cu 和 Zn,贡献率分别为 59.1% 和 41.8%. Cu 和 Zn 的变异系数均属强变异,且含量平均值明显超过背景值,说明土壤 Cu 和 Zn 受到人为活动的影响^[41]. 在相关性分析中,Cu 与 Zn 的相关系数为 0.77,相关性强,Cu 和 Zn 空间分布基本一致,说明它们很有可能来自同一污染源. Cu 和 Zn 高值区是旧时家庭作坊电子垃圾拆解点集中地区,罗勇等^[42]发现电子垃圾拆解工序是附近农田表土中 Cu 和 Zn 的主要来源,电子垃圾拆解点表土 Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量都高于焚烧地的表土重金属,其中电子垃圾拆解点表土 Zn 和 Cu 含量平均值分别达到了焚烧地表土 Zn 和 Cu 含量平均值的

2.99 倍和 1.31 倍;而 Pb 含量相比较低,这可能是由于 Pb 熔点较低,拆解工序导致 Pb 留存于土壤中的量较少,而焚烧所需温度较高,导致电子废物中的 Pb 大量释放进入环境,这可能是电子垃圾拆解工序中 Pb 的贡献率较低的原因^[39,41,42]. 因子1可看作是电子垃圾拆解工序污染源.

对因子2贡献率较高的元素是 Pb 和 Hg,变异系数均属强变异,说明 Pb 和 Hg 受人为活动影响较大. Pb 与 Hg 的相关性系数为 0.43,属低相关性,说明该因子有多种污染来源. 研究区处于中国东部经济发达地区,全年交通频繁,Pb 高值区附近有一条省道和国道. 有研究发现汽车尾气排放、轮胎损耗以及含铅汽油会导致大量 Pb 进入环境中^[40,43,44]. 虽然我国在 21 世纪初就停止使用含铅汽油,但是产生的重金属已经累积在周边农田土壤中,Pb 经大气干湿沉降,随气流飘散,吸附累积在周边土壤和农作物上^[38]. 有研究表明,土壤 Hg 的主要来源是煤炭的燃烧^[45]. 过去在电子垃圾回收拆解中,焚烧需要大量的煤作为燃料,Hg 在煤炭燃烧过程中变成气态进入大气,并通过大气沉降进入土体. 煤的燃烧会产生 Pb,导致土壤 Pb 污染的进一步加剧^[46]. 因子2可看作燃煤及交通排放混合源.

因子3对 As、Cr 和 Ni 的贡献率较高,这与前人研究的结果一致^[11]. 其中对 Cr 和 Ni 的贡献率分别达到了 73.6% 和 71%,而对 As 为 60%. 相关性分析中,Cr 与 Ni 呈现出显著的正相关关系,说明它们有着共同来源. 有 75.94% 的土壤点位 Ni 含量高于背景值,有 84.96% 的土壤点位 Cr 含量高于背景

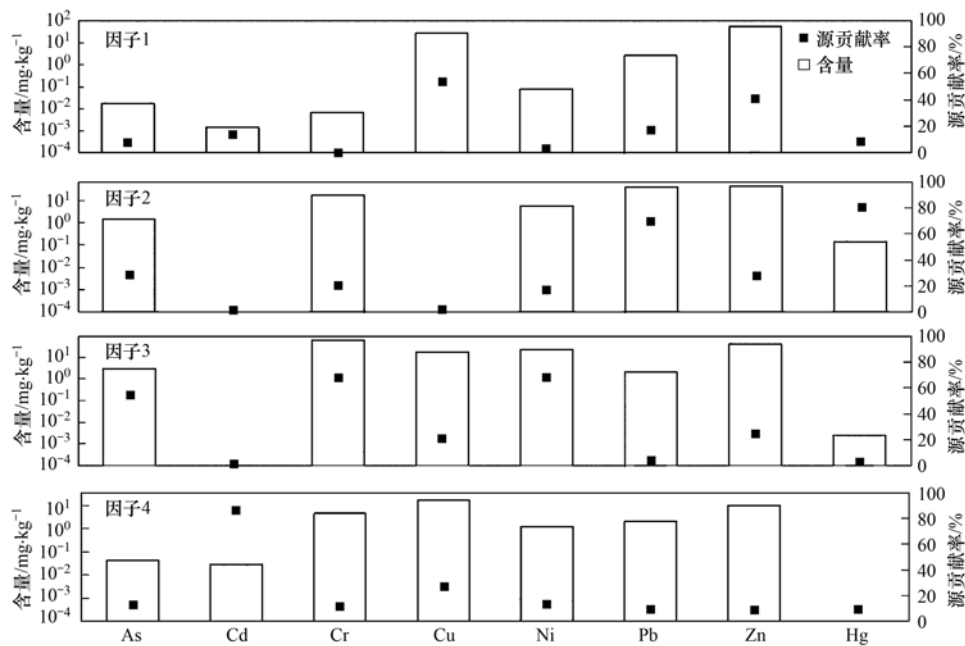


图4 土壤重金属 PMF 污染源成分谱

Fig. 4 Factor profiles and source contributions of soil heavy metals based on PMF

表 5 4 种不同来源重金属对人体非致癌风险评价

Table 5 Assessment of non-carcinogenic risk caused by heavy metals from four sources															
项目	儿童					女性					男性				
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	总和	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	总和	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	总和
Cd	1.47E-03	2.63E-12	6.40E-12	8.97E-03	1.04E-02	3.13E-04	5.60E-13	1.36E-12	1.91E-03	2.22E-03	2.35E-04	4.21E-13	1.02E-12	1.44E-03	1.67E-03
Hg	4.47E-04	4.26E-03	7.54E-05	5.28E-04	5.31E-03	3.25E-05	3.09E-04	5.48E-06	3.84E-05	3.86E-04	2.42E-05	2.31E-04	4.08E-06	2.86E-05	2.88E-04
Cu	9.34E-03	2.03E-13	3.59E-03	4.73E-03	1.77E-02	9.11E-04	1.98E-14	3.50E-04	4.62E-04	1.72E-03	6.57E-04	1.43E-14	2.52E-04	3.33E-04	1.24E-03
As	1.99E-02	8.08E-02	1.61E-01	3.34E-02	2.95E-01	4.31E-03	1.75E-02	3.49E-02	7.25E-03	6.39E-02	3.22E-03	1.31E-02	2.60E-02	5.41E-03	4.77E-02
Pb	2.36E-02	1.01E-01	5.02E-03	1.50E-02	1.45E-01	5.76E-03	2.47E-02	1.23E-03	3.65E-03	3.53E-02	4.14E-03	1.78E-02	8.83E-04	2.63E-03	2.54E-02
Ni	4.26E-04	2.34E-03	9.88E-03	1.88E-03	1.45E-02	1.07E-04	5.89E-04	2.48E-03	4.73E-04	3.65E-03	7.67E-05	4.22E-04	1.78E-03	3.39E-04	2.62E-03
Cr	9.50E-04	7.98E-02	2.70E-01	4.45E-02	3.95E-01	2.13E-04	1.79E-02	6.05E-02	9.98E-03	8.86E-02	1.58E-04	1.32E-02	4.47E-02	7.38E-03	6.55E-02
Zn	1.25E-01	8.27E-02	7.78E-02	2.83E-02	3.14E-01	2.32E-02	1.53E-02	1.44E-02	5.25E-03	5.82E-02	1.83E-02	1.21E-02	1.13E-02	4.13E-03	4.58E-02
HI	1.81E-01	3.51E-01	5.27E-01	1.37E-01	1.20E+00	3.49E-02	7.63E-02	1.14E-01	2.90E-02	2.54E-01	2.68E-02	5.68E-02	8.50E-02	2.17E-02	1.90E-01

表 6 4 种不同来源重金属对人体致癌风险评价

Table 6 Assessment of carcinogenic risk caused by heavy metals from four sources															
项目	儿童					女性					男性				
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	总和	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	总和	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	总和
Cd	3.20E-07	5.73E-16	1.39E-15	1.95E-06	2.27E-06	3.20E-07	5.73E-16	1.39E-15	1.95E-06	2.27E-06	2.29E-07	4.10E-16	9.96E-16	1.40E-06	1.62E-06
Hg	— ¹⁾					—					—				
Cu	—					—					—				
As	1.93E-06	7.85E-06	1.56E-05	3.25E-06	2.87E-05	6.6E-07	2.7E-06	5.39E-06	1.12E-06	9.87E-06	4.96E-07	2.02E-06	4.02E-06	8.35E-07	7.37E-06
Pb	5.50E-08	2.36E-07	1.17E-08	3.49E-08	3.37E-07	5.50E-08	2.36E-07	1.17E-08	3.49E-08	3.37E-07	3.93E-08	1.68E-07	8.37E-09	2.49E-08	2.41E-07
Ni	1.45E-07	7.97E-07	3.36E-06	6.40E-07	4.95E-06	1.16E-07	6.38E-07	2.69E-06	5.12E-07	3.96E-06	8.28E-08	4.56E-07	1.92E-06	3.66E-07	2.83E-06
Cr	7.20E-08	6.05E-06	2.04E-05	3.37E-06	2.99E-05	7.25E-08	6.08E-06	2.06E-05	3.39E-06	3.01E-05	5.18E-08	4.35E-06	1.47E-05	2.42E-06	2.15E-05
Zn	—					—					—				
TCR	2.52E-06	1.49E-05	3.94E-05	7.29E-06	6.61E-05	1.22E-06	9.65E-06	2.87E-05	7.01E-06	4.65E-05	8.99E-07	6.99E-06	2.06E-05	3.65E-06	3.36E-05

1) “—”表示没有相关数据

值, As 含量平均值低于背景值, 但有 18.8% 的土壤点位 As 含量超过背景值. 虽然自然母岩通常被认为是土壤中 Cr 和 Ni 的主要来源^[47,48], 但是 Cr 和 Ni 含量平均值略高于当地土壤背景值且污染比例较高, 氮肥和磷肥等化肥和有机肥的施用导致一定量的 Cr 和 Ni 留存在土壤中^[48,49], Ni 则有可能会受到土壤有机质、Fe 和 Al 等土壤理化性质的影响而富集, 从而导致土壤 Ni 含量略高于土壤背景值^[50]. As 作为另一个主要载荷因子, 有报道称成土母质的自然成土过程是土壤中 As 的重要来源^[29], 杀虫剂和化肥的过量施用也会导致土壤中 As 的累积^[11,47]. 因此, 因子 3 可被认为是自然母质及农业投入混合源.

因子 4 的标志元素是 Cd, 贡献率达 86.7%. Cd 的变异系数为 152.63%, 属强变异, Cd 含量平均值是背景值的 3 倍以上, 说明人为源和自然源都对 Cd 在土壤中的累积有着影响. Cd 的高值区位于电子垃圾拆解点集中区域. 已有研究表明, 电子垃圾拆解站附近的农田土壤中的 Cd 污染非常严重, 电子垃圾拆解过程中的酸洗产生的废水和电子垃圾固废堆放是电子垃圾周边农田 Cd 污染的主要来源^[41]. 因子 4 可视为电子垃圾酸洗径流及固废淋溶来源.

综上所述, 研究区农田土壤重金属共有 4 种来源: 电子垃圾拆解工序污染源、燃煤及交通排放混合源、自然母质及农业投入混合源和电子垃圾酸洗径流及固废淋溶来源, 其来源贡献率分别为 26.82%、34.50%、25.59% 和 13.09%.

2.5 源暴露人体健康风险评价

不同污染源对成年男性、女性和儿童健康风险如表 5 和表 6 所示. 污染源对儿童、男性和女性的重金属 HI 分别为: 1.2、2.54E-01 和 1.9E-01, 对儿童的 HI > 1, 该值几乎大于成年男性和女性 HI 值一个数量级, 表明当地土壤重金属对儿童存在一定非致癌风险^[51], 这可能与儿童的体重较小、身体机

能相较成年人弱以及行为特点和习性有关^[50]. 各个污染源的重金属对儿童的 HI 排序为: Cr > Zn > As > Pb > Cu > Ni > Cd > Hg, 各种重金属对儿童造成的 HI 均小于 1, 说明单一重金属对儿童不存在非致癌风险, 但在多种重金属综合作用下, HI 会大大增加. 各个污染源的重金属对女性造成的 HI 排序为: Cr > As > Zn > Pb > Ni > Cd > Cu > Hg, 对男性的 HI 排序与女性一致. 由于当前研究资料缺少 Hg、Zn 和 Cu 的 RfD 数据, 所以本研究仅计算了土壤 Cr、Pb、As、Ni 和 Cd 对当地居民的 CR, CR 都处于 1E-06 ~ 1E-04 范围之内, 属于可接受水平, 对儿童、女性和男性的 CR 排序均为: Cr > As > Ni > Cd > Pb. 然而, 有些重金属的暴露途径未计算致癌风险, 但是重金属对儿童、女性和男性的致癌风险已经很接近致癌风险临界值 (1E-04), 该地区的实际致癌风险可能比本研究评定的致癌风险更高.

对于 3 类人群, 因子 3 (自然母质和农业投入混合源) 是造成健康风险的主要因子, 对 CR 和 HI 的贡献度最高 (图 5). 因子 3 的主要载荷元素为: Cr、As 和 Ni, 其 RfD 值低, 致癌和非致癌效应较强^[11]. As 的致癌作用仅次于 Cr, 这是由于评价重金属致癌风险时, Cr 和 As 的 4 种暴露途径的 SF 值都被考虑在内, 而其他重金属仅考虑了 1 ~ 2 种暴露途径, Cr 和 As 的 CR 是最高的. 自“十三五”计划以来, 研究区的化肥和农药投入量已有所减少^[11], 从风险评价结果分析, 农业投入对人体健康风险起着重要的贡献作用, 为了当地居民的身心健康, 农药和化肥的减量使用和严格监管迫在眉睫.

4 种因子对 3 类人群的 HI 源贡献降序为: 因子 3、因子 2、因子 1 和因子 4 (图 5). 据前人研究, 自然源通常是对人体健康风险影响最大的因子^[11]. 4 种因子对 3 类人群的 CR 源贡献降序为: 因子 3、因子 2、因子 4 和因子 1. 排序改变的原因可能是因子 4 的主要载荷元素为 Cd, 电子垃圾酸洗废水和固废

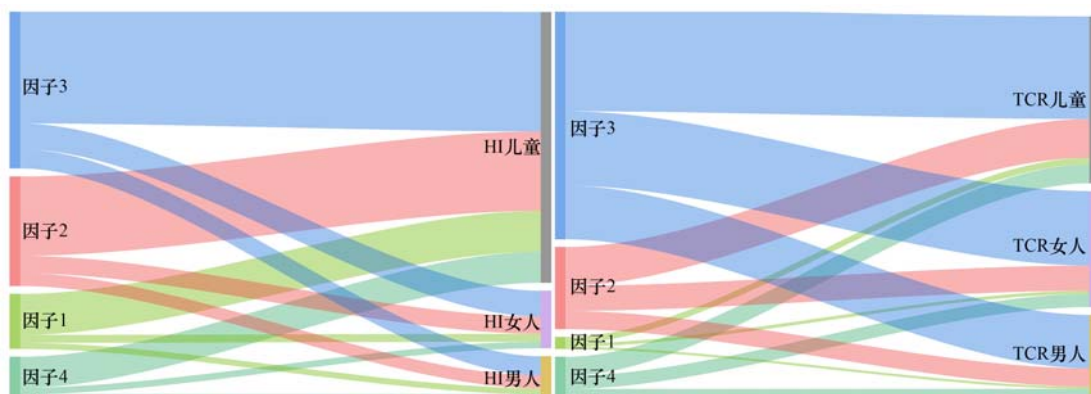


图 5 重金属健康风险与污染源关系

Fig. 5 Relationship between health risks caused by heavy metals and pollution sources

堆放淋溶是农田 Cd 污染的主要来源^[41], Cd 有最大的致癌斜率因子, Cd 的致癌效应较于 Cu 和 Zn 更强^[11]. Liu 等^[33] 和刘海等^[51] 的研究表明工业活动带来的 Cd 是人体致癌效应的一个重要因素. 因子 1 对致癌效应贡献度最小, 因子 1 的主要载荷因子为 Cu 和 Zn, 现有研究中缺乏这两者的致癌斜率因子, 未计算在致癌风险中. 总之, 工业和农业等人类活动排放的重金属对人体存在健康风险, 未来可通过工业废物排放标准提升以及设备工艺升级换代减少污染物进入环境的量, 从而减少重金属对人体的危害.

3 结论

(1) 研究区土壤 Hg、As、Pb、Ni、Zn 和 Cr 含量平均值低于筛选值, Cr、Pb、As、Ni 和 Zn 为轻微风险, 有 24.81% 的土壤样点 Hg 生态风险为中度以上; Cd 和 Cu 含量平均值大于筛选值, 土壤 Cd 生态风险较高, 而 Cu 生态风险较低. 部分区域污染程度较重, 生态风险较高. 除 Pb 在交通干道周边含量较高外, 其余重金属高值都位于东南部和中部.

(2) 研究区重金属来源有: 电子垃圾拆解工序、燃煤及交通排放、自然母质及农业投入以及电子垃圾酸洗径流及固废淋溶, 其贡献率分别为 26.82%、34.50%、25.59% 和 13.09%.

(3) 重金属对儿童的非致癌风险最大, Cr 的健康风险最大, 自然源和农业投入混合源是对健康风险影响最大的因素.

参考文献:

- [1] Geng N, Wu Y C, Zhang M, *et al.* Bioaccumulation of potentially toxic elements by submerged plants and biofilms: a critical review[J]. *Environment International*, 2019, **131**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105015.
- [2] Hu B F, Shao S, Fu Z Y, *et al.* Identifying heavy metal pollution hot spots in soil-rice systems: a case study in south of Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 614-625.
- [3] Wang Z, Bai L L, Zhang Y, *et al.* Spatial variation, sources identification and risk assessment of soil heavy metals in a typical *Torreya grandis* cv. Merrillii plantation region of Southeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **849**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157832.
- [4] Wang H X, Li X M, Chen Y, *et al.* Geochemical behavior and potential health risk of heavy metals in basalt-derived agricultural soil and crops: a case study from Xuyi County, Eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139058.
- [5] Yang J Z, Sun Y L, Wang Z L, *et al.* Heavy metal pollution in agricultural soils of a typical volcanic area: risk assessment and source appointment[J]. *Chemosphere*, 2022, **304**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135340.
- [6] 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 等. 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- [7] Hu J, Zhao X Y, Wang T T, *et al.* Distribution characteristics, evaluation, and source analysis of heavy metals in soils of Fenhe riparian zone in Taiyuan City[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2500-2509.
- [8] 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.
- [9] Sun J X, Zhao M L, Huang J L, *et al.* Determination of priority control factors for the management of soil trace metal (loid) s based on source-oriented health risk assessment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127116.
- [10] Zeng J Q, Li C X, Wang J T, *et al.* Pollution simulation and remediation strategy of a zinc smelting site based on multi-source information[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **433**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128774.
- [11] 张璐瑶, 赵科理, 傅伟军. 电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4432-4440.
- [12] Zhang L Y, Zhao K L, Fu W J. Spatial distribution characteristics and risk assessment of cadmium pollution in soil-crops system of an E-waste dismantling area[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4432-4440.
- [13] Yang S Y, He M J, Zhi Y Y, *et al.* An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities[J]. *Environment International*, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105239.
- [14] Liu X M, Gu S B, Yang S Y, *et al.* Heavy metals in soil-vegetable system around E-waste site and the health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **779**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146438.
- [15] Fang J, Zhang L Y, Rao S T, *et al.* Spatial variation of heavy metals and their ecological risk and health risks to local residents in a typical E-waste dismantling area of Southeastern China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, **194**(9), doi: 10.1007/s10661-022-10296-1.
- [16] Zhao K L, Fu W J, Qiu Q Z, *et al.* Spatial patterns of potentially hazardous metals in paddy soils in a typical electrical waste dismantling area and their pollution characteristics [J]. *Geoderma*, 2019, **337**: 453-462.
- [17] Liang Q, Tian K, Li L, *et al.* Ecological and human health risk assessment of heavy metals based on their source apportionment in cropland soils around an E-waste dismantling site, Southeast China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **242**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113929.
- [18] Yousaf B, Liu G J, Abbas Q, *et al.* Investigating the uptake and acquisition of potentially toxic elements in plants and health risks associated with the addition of fresh biowaste amendments to industrially contaminated soil [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, **28**(8): 2596-2607.
- [19] Zeeshan M, Ahmad W, Hussain F, *et al.* Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120318.
- [20] Liu X M, Song Q J, Tang Y, *et al.* Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **463-464**: 530-540.
- [21] Xia F, Qu L Y, Wang T, *et al.* Distribution and source analysis

- of heavy metal pollutants in sediments of a rapid developing urban river system[J]. *Chemosphere*, 2018, **207**: 218-228.
- [20] Duan Y X, Zhang Y M, Li S, *et al.* An integrated method of health risk assessment based on spatial interpolation and source apportionment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **276**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123218.
- [21] Shi A, Shao Y F, Zhao K L, *et al.* Long-term effect of E-waste dismantling activities on the heavy metals pollution in paddy soils of Southeastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135971.
- [22] Zhao K L, Zhang L Y, Dong J Q, *et al.* Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of Southeastern China [J]. *Geoderma*, 2020, **360**, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114011.
- [23] Zhao K L, Fu W J, Liu X M, *et al.* Spatial variations of concentrations of copper and its speciation in the soil-rice system in Wenling of Southeastern China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(11): 7165-7176.
- [24] 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 等. 南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1602-1610.
Yang Y, Guo T T, Liu X L, *et al.* Spatial distribution characteristics and assessment of heavy metal pollution in cultivated soil of agricultural small watershed in typical mining area in South China[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1602-1610.
- [25] 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 等. 郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5429-5441.
Qi Y J, Wang L L, Ni J W, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient summer volatile organic compounds in Zhengzhou, China[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5429-5441.
- [26] Dong B, Zhang R Z, Gan Y D, *et al.* Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 3127-3138.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 于林松, 万方, 范海印, 等. 姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4199-4211.
Yu L S, Wan F, Fan H Y, *et al.* Spatial distribution, source apportionment, and ecological risk assessment of soil heavy metals in Jianghugongmi producing area, Shandong Province[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4199-4211.
- [30] 陈林, 马琨, 马建军, 等. 宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 356-366.
Chen L, Ma K, Ma J J, *et al.* Risk assessment and sources of heavy metals in farmland soils of Yellow River irrigation area of Ningxia[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 356-366.
- [31] 范允慧, 王艳青. 浙江省四大平原区土壤元素背景值特征[J]. *物探与化探*, 2009, **33**(2): 132-134.
Fan Y H, Wang Y Q. Background characteristics of soil elements in four plains of Zhejiang Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, **33**(2): 132-134.
- [32] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [33] Liu J, Liu Y J, Liu Y, *et al.* Quantitative contributions of the major sources of heavy metals in soils to ecosystem and human health risks: a case study of Yulin, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **164**: 261-269.
- [34] 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.
- [35] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [36] He K L, Sun Z H, Hu Y A, *et al.* Comparison of soil heavy metal pollution caused by E-waste recycling activities and traditional industrial operations[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(10): 9387-9398.
- [37] Wang F F, Guan Q Y, Tian J, *et al.* Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor[J]. *CATENA*, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104573.
- [38] 傅建捷, 王亚群, 周麟佳, 等. 我国典型电子垃圾拆解地持久性有毒化学污染物污染现状[J]. *化学进展*, 2011, **23**(8): 1755-1768.
Fu J J, Wang Y W, Zhou L J, *et al.* Pollution status and perspectives of persistent toxic substances in E-waste dismantling area in China[J]. *Progress in Chemistry*, 2011, **23**(8): 1755-1768.
- [39] Fang W X, Yang Y C, Xu Z M. PM₁₀ and PM_{2.5} and health risk assessment for heavy metals in a typical factory for cathode ray tube television recycling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(21): 12469-12476.
- [40] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 934-944.
Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 934-944.
- [41] 陈海棠, 周丹丹, 薛南冬, 等. 电子固体废弃物拆解作坊附近土壤重金属污染特征及风险[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 956-964.
Chen H T, Zhou D D, Xue N D, *et al.* Contamination and health risk of heavy metals in soils near E-waste recycling workshops[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 956-964.
- [42] 罗勇, 罗孝俊, 杨中艺, 等. 电子废物不当处置的重金属污染及其环境风险评价 II. 分布于人居环境(村镇)内的电子废物拆解作坊及其附近农田的土壤重金属污染[J]. *生态毒理学报*, 2008, **3**(2): 123-129.
Luo Y, Luo X J, Yang Z Y, *et al.* Studies on heavy metal contamination by improper handling of E-waste and its environmental risk evaluation II. Heavy metal contamination in surface soils on E-waste disassembling workshops within villages and the adjacent agricultural soils [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, **3**(2): 123-129.
- [43] Zhou L F, Zhao X L, Meng Y B, *et al.* Identification priority source of soil heavy metals pollution based on source-specific

- ecological and human health risk analysis in a typical smelting and mining region of South China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **242**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113864.
- [44] Zhao R, Guan Q Y, Luo H P, *et al.* Fuzzy synthetic evaluation and health risk assessment quantification of heavy metals in Zhangye agricultural soil from the perspective of sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134126.
- [45] 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.
- [46] 杨子鹏, 肖荣波, 陈玉萍, 等. 华南地区典型燃煤电厂周边土壤重金属分布、风险评估及来源分析[J]. *生态学报*, 2020, **40**(14): 4823-4835.
Yang Z P, Xiao R B, Chen Y P, *et al.* Heavy metal distribution, risk assessment and source analysis of soil around a typical coal-fired power plant in South China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(14): 4823-4835.
- [47] Fei X F, Lou Z H, Xiao R, *et al.* Contamination assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soil through the synthesis of PMF and GeogDetector models [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **747**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141293.
- [48] Liu H W, Zhang Y, Yang J S, *et al.* Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **767**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144879.
- [49] 艾建超, 王宁, 杨净. 基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
Ai J C, Wang N, Yang J. Source apportionment of soil heavy metals in Jiapigou goldmine based on the UNMIX model [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3530-3536.
- [50] 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 等. 海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4590-4600.
Yang J Z, Gong J J, Wang Z L, *et al.* Enrichment factors, health risk, and source identification of heavy metals in agricultural soils in semi-arid region of Hainan Island [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4590-4600.
- [51] 刘海, 魏伟, 黄健敏, 等. 长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1686-1697.
Liu H, Wei W, Huang J M, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of soil-crops system in Anhui section of the Yangtze River Basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1686-1697.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhui River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)