

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

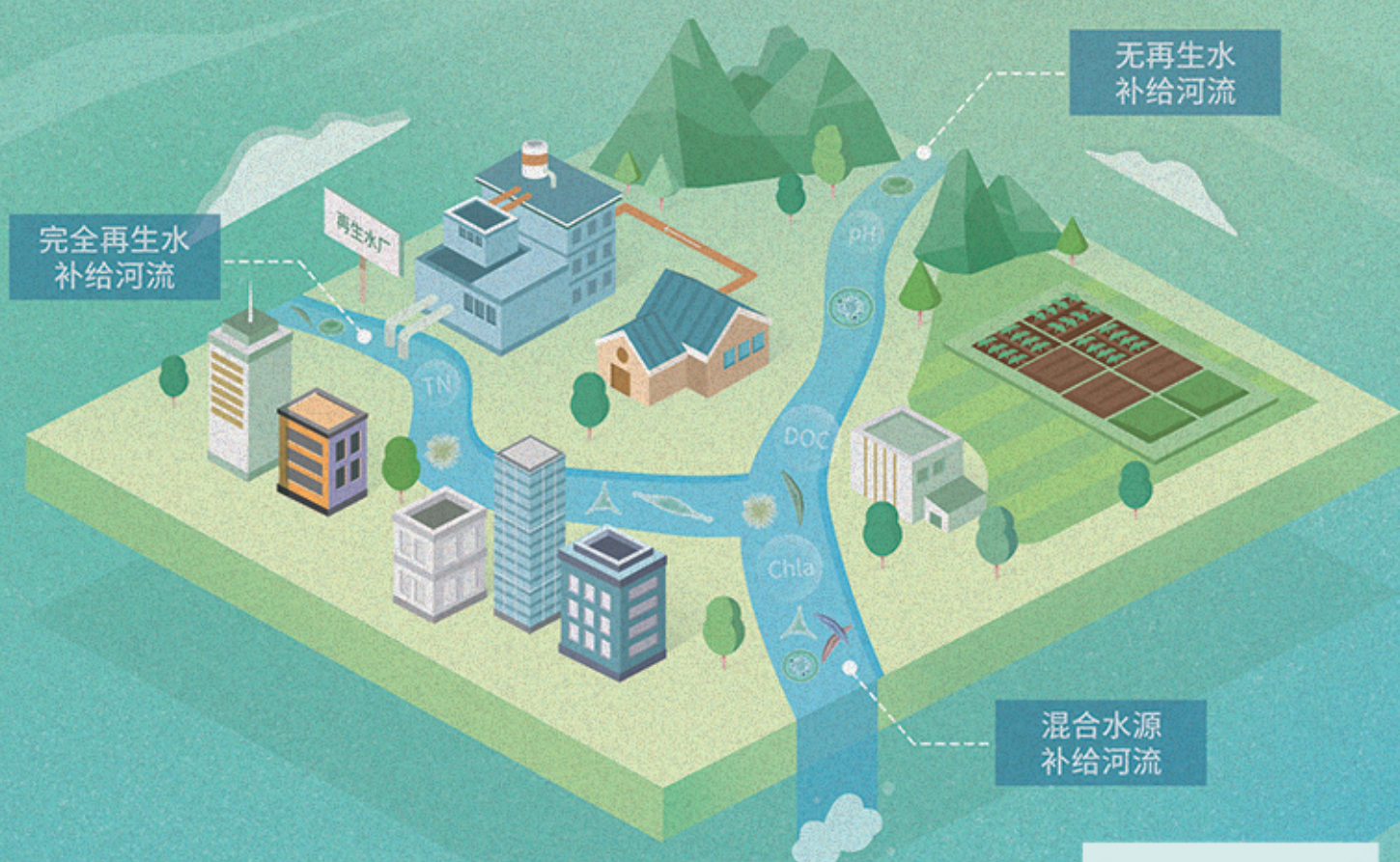
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜璨, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析

张恬雨¹, 胡恭任^{1,2}, 于瑞莲^{1,2*}, 林承奇³, 黄华斌³

(1. 华侨大学化工学院, 厦门 361021; 2. 华侨大学环境生态工程研究所, 厦门 361021; 3. 环境监测福建省高校重点实验室, 厦门 361024)

摘要: 为调查垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属污染特征和来源, 用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 和原子荧光光谱法 (AFS) 分析了厦门市某垃圾焚烧厂周边农田表层土壤 (0~20 cm) 中 V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 的含量, 用 Kriging 插值法分析了上述元素的空间分布特征, 用地累积指数法、内梅罗综合污染指数法、富集因子法和潜在生态风险指数法对重金属污染程度和生态风险进行了评价, 运用聚类分析、主成分分析和 PMF 模型相结合的方法探究了重金属来源。结果表明, Cu、Zn、As、Cd 和 Hg 的含量平均值分别是厦门土壤元素背景值的 1.96、1.52、5.95、3.38 和 3.65 倍。地累积指数结果表明, 研究区以 As 污染为主, Hg 和 Cd 污染次之; 内梅罗综合污染指数结果表明, 研究区重金属的综合污染程度为中度至重度污染; 研究区表层土壤重金属富集程度较高, As、Hg、Cd 和 Cu 有显著富集; 研究区表层土壤重金属潜在生态风险较高, Hg 和 Cd 是主要风险因子, As 次之, 高风险区主要位于研究区南部。研究区表层土壤重金属主要来源为垃圾焚烧、交通源、自然源和农业源的混合源以及燃煤源, 贡献率分别为 28.42%、27.22%、26.29% 和 18.07%。

关键词: 垃圾焚烧厂; 农田土壤; 重金属; 污染源解析; PMF 模型

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5718-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202202116

Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model

ZHANG Tian-yu¹, HU Gong-ren^{1,2}, YU Rui-lian^{1,2*}, LIN Cheng-qi³, HUANG Hua-bin³

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Institute of Environmental and Ecological Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory of Fujian Universities for Environmental Monitoring, Xiamen 361024, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics and sources of heavy metal pollution in farmland soil around a waste incineration plant, the contents of V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, and Hg in the topsoil (0-20 cm) surrounding a waste incineration plant in Xiamen city were analyzed using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and atomic fluorescence spectrometry (AFS). The spatial distribution characteristics of the above elements were analyzed using the Kriging interpolation method. Several assessment methods including, the geo-accumulation index, Nemerow comprehensive pollution index, enrichment factor, and potential ecological risk index, were used to evaluate the pollution degree and ecological risk of heavy metals. Clustering analysis, principal component analysis, and a PMF model were employed to explore the sources of heavy metals. The results showed that the average contents of Cu, Zn, As, Cd, and Hg were 1.96, 1.52, 5.95, 3.38, and 3.65 times the background values of Xiamen soil elements, respectively. The results of the geo-accumulation index indicated that As was the dominant pollution element in the study area, followed by Hg and Cd. The results of the Nemerow comprehensive pollution index suggested that the comprehensive pollution degree of heavy metals in the study area was moderate to heavy pollution. The enrichment degree of heavy metals in the study area was relatively high, with As, Hg, Cd, and Cu showing significant enrichment. The regional potential ecological risk was higher with the main potential ecological risk factors of Hg and Cd, followed by that of As. Additionally, the high-risk area was mainly located in the southern part of the study area. The main sources of heavy metals in the study area were waste incineration, traffic, the mixture of natural and agricultural sources, and coal combustion, with contributing rates of 28.42%, 27.22%, 26.29%, and 18.07%, respectively.

Key words: waste incineration plant; farmland soil; heavy metals; pollution source analysis; PMF model

随着我国城市化进程的加快和人们生活水平的不断提高,城市生活垃圾量剧增。目前城市垃圾的处理方式主要有填埋、焚烧和堆肥等^[1]。与堆肥和填埋相比,焚烧具有减量化、无害化和资源化等优点^[2],近年来逐渐成为垃圾处理的重要方式。虽然垃圾焚烧厂都配有尾气处理系统,但随着尾气经年累月地不断排放,尾气中的污染物如重金属等在大气干湿沉降的作用下不断迁移进入土壤^[3],难免在焚烧厂周围土壤中造成积累^[4]。重金属 (heavy metals, HMs) 具有隐蔽性强、滞留时间长和难降解的特性^[5],其含量对土壤理化性质具有重要影

响^[6]。垃圾焚烧厂周边土壤中重金属含量除可能受垃圾焚烧厂尾气排放的影响外,还可能受到各种人类活动 (农业活动、工业生产和交通运输等) 的影响^[7]。近年来国内外学者对土壤重金属污染进行了包括重金属富集特征^[3]、污染评价^[8,9]、空间分布特征^[10]和健康风险^[11]等方面的研究,但对于垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属污染来源的认识尚不

收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21777049)

作者简介: 张恬雨 (1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属源解析, E-mail: 1264968896@qq.com

* 通信作者, E-mail: rui-lian@hqu.edu.cn

足. 确定周边土壤重金属来源并明确其相对贡献, 对焚烧厂这一特殊场地周边农田重金属污染的风险管控具有重要意义.

重金属源解析模型主要分为两大类: 一是以污染源为研究对象的扩散模型, 其利用扩散方程, 在污染物排放量、排放速率、研究区与排放源距离和气象条件等参数条件下计算源贡献量^[12], 由于环境的多变性, 模型预测结果往往误差较大; 二是以污染区域为研究对象的受体模型, 通过对环境介质污染特征和污染源特征进行分析, 定性识别污染源并定量分析各源的贡献率^[13], 常见方法如富集因子法 (EF)、主成分分析/绝对主成分数 (PCA/APCS)、正定矩阵因子分析法 (PMF) 和同位素比值分析法等^[14,15]. PMF 是一个多元受体模型, 主要利用相关矩阵和协方差矩阵对高维变量进行简化, 从而得到几个综合因子和源贡献, 是美国环保署 (EPA) 推荐的源解析工具^[16]. 本文以厦门市某垃圾焚烧厂周边农田土壤为研究对象, 在分析表层土壤重金属空间

分布和污染特征的基础上利用多元统计分析方法结合 PMF 模型解析重金属来源, 以期为周边农田重金属污染防控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况和土壤样品采集

研究区位于厦门市翔安区, 地貌以山岭、丘陵为主, 土壤类型主要为赤红壤性土, 农作物以葱、茄子和地瓜为主. 研究区属亚热带海洋性气候, 年均气温 20.9℃, 年均降雨量 1 143.5 mm, 年主导风向偏东风 (采样季为夏季, 主导风向东南风), 年均风速 2.5 m·s⁻¹. 垃圾焚烧厂三面 (东、南和北) 环山, 西侧主要为农田, 在垃圾焚烧厂周边 3 km 内采用 500 m × 500 m 网格布点, 仅在农田的网格内进行了采样 (见图 1). 用塑料铲取表土 (0 ~ 20 cm); 每个网格内按梅花布点采集子样, 将采集的混合土样在塑料布上混匀, 去除枯枝落叶、草根、虫壳、石砾等杂质, 按四分法取 1 kg 左右装入干净自封袋中, 密封

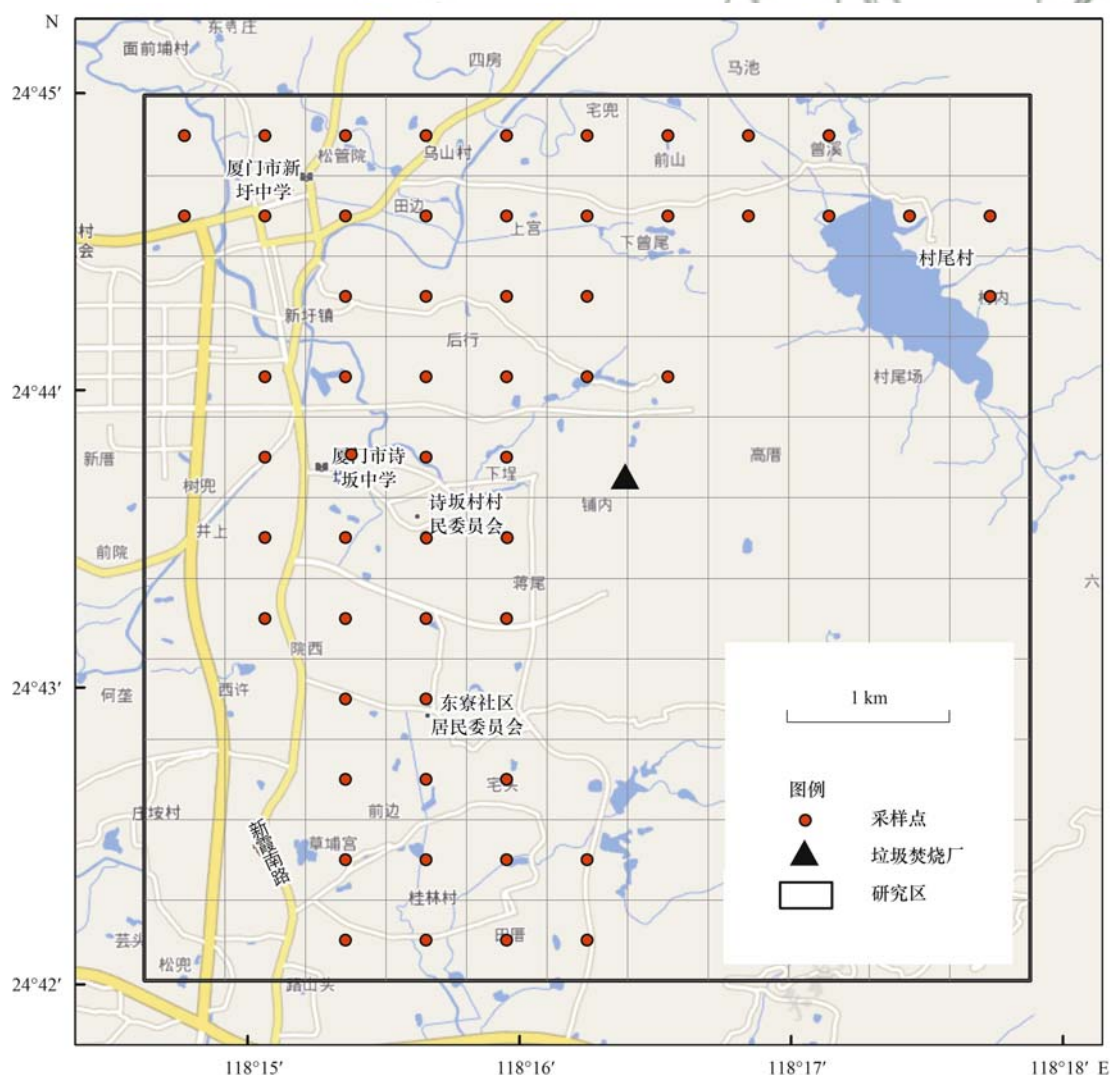


图 1 研究区表层土壤采样点分布

Fig. 1 Sampling sites of topsoil in the study area

贴好标签,并做现场信息记录.共采集土样 57 个.

1.2 土壤样品处理和分析

将土壤样品置于室内干净台面晾干,捣碎并剔除杂物,过 2 mm 尼龙筛,再轻轻研磨后过 0.15 mm 尼龙筛,装入聚乙烯塑料袋中密封保存备用.用 pHHS-29B 酸度计测定土样的 pH 值(液土比为 2.5:1).

称取 0.100 0 g 土壤样品于 15 mL 聚四氟乙烯消解罐中,加入 1 mL 浓硝酸(电子纯)和 2 mL 氢氟酸,置于电热板上 180℃ 加热消解约 24 h.消解完毕后在消解罐中加入 4 mL 3% 的稀硝酸,将电热板温度调至 140℃ 将样品蒸至快干,冷却后加入 1 mL 浓硝酸继续加热,当样品再次蒸至近干时,再加入 1 mL 3% 稀硝酸继续加热使样品重新溶解.样品蒸至快干时,取下冷却,用 3% 稀硝酸洗涤并过滤至 50 mL 容量瓶中定容.在华侨大学分析测试中心用 ICP-MS(Agilent 7800)测定 V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的含量.按《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定》(GB/T 22105.1-2008)中推荐的方法,采用王水消解和 AFS(吉天 8220)测定 Hg 的含量.随机抽取 10% 的样品做平行实验,同时做空白实验.以标准土壤物质 GSS-7 进行质量控制,各重金属元素的回收率在 80%~120% 之间.

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数法

采用 1969 年由德国科学家 Müller^[17] 基于沉积学原理提出的地累积指数法,该法被广泛应用于土壤中重金属的污染程度评价,其计算如式(1):

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C^i / (K \times B^i)] \quad (1)$$

式中, C^i 为元素 i 在土壤中的含量; B^i 为土壤中元素 i 的地球化学背景值,本文采用厦门市土壤元素背景值^[18]. K 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数,取值为 1.5.地累积指数的污染程度分级如下: $I_{\text{geo}} \leq 0$ 无污染, $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ 轻度~中度污染, $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ 中度污染, $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ 中度~重度污染, $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ 重度污染, $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ 重度~严重污染, $I_{\text{geo}} > 5$ 极严重污染.

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法综合考虑所有污染项目,兼顾污染最严重因子,能直观地描述土壤环境质量的总体水平^[19].其计算如式(2)和式(3):

$$P = \sqrt{[(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2]/2} \quad (2)$$

$$P_i = C_i/S_i \quad (3)$$

式中, P 为综合污染指数; P_i 为元素 i 的单因子污染指数; C_i 为元素 i 的实测含量; S_i 为元素 i 的评价标准值,本文采用厦门市土壤元素背景值^[18].内

梅罗综合污染指数的分级标准: $P_{\text{综合}} \leq 0.7$ 清洁, $0.7 < P_{\text{综合}} \leq 1$ 尚清洁, $1 < P_{\text{综合}} \leq 2$ 轻污染, $2 < P_{\text{综合}} \leq 3$ 中度污染, $P_{\text{综合}} > 3$ 重度污染.

1.3.3 富集因子法

富集因子法常用于判断土壤中重金属的富集程度^[20].富集因子的计算需选定参比元素进行标准化处理,一般选取含量稳定且受人为影响较小的元素作为参比元素.以 Fe 为参比元素的计算如式(4):

$$EF = (C_i/C_{\text{Fe}})_{\text{样品}} / (B_i/B_{\text{Fe}})_{\text{背景值}} \quad (4)$$

式中, EF 为富集因子, $(C_i/C_{\text{Fe}})_{\text{样品}}$ 为土壤样品中重金属 i 和参比元素 Fe 含量的比值, $(B_i/B_{\text{Fe}})_{\text{背景值}}$ 为重金属 i 和参比元素 Fe 背景值的比值.根据富集因子,元素富集程度分为: $EF < 1$ 无富集, $1 \leq EF < 2$ 轻度富集, $2 \leq EF < 5$ 中度富集, $5 \leq EF < 20$ 显著富集, $20 \leq EF < 40$ 强烈富集, $EF \geq 40$ 极强富集.

1.3.4 潜在生态风险指数法

采用瑞典科学家 Hakanson^[21] 建立的一套反映特定环境中多元素协同作用和毒性水平的潜在生态风险指数评价方法,评估农田土壤中重金属的生态风险.潜在生态风险指数计算方法如式(5)和式(6):

$$E_i = T_i \times (C_i/B_i) \quad (5)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (6)$$

式中, B_i 和 C_i 分别为元素 i 的背景值和实测值, E_i 和 RI 分别为单个重金属潜在生态风险系数和多种重金属综合潜在生态风险指数, T_i 为毒性系数.本文采用徐争启等^[22] 根据 Hakanson 的计算方法,引用陈静生等^[23] 的计算方法,得到 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 的毒性系数值分别为 2、2、1、5、5、5、1、10、30、5 和 40.潜在生态风险评价指标分级标准如表 1 所示.根据本文所研究的重金属种类和毒性系数,对 RI 判断标准做了相应调整.

表 1 潜在生态风险评价指标和等级划分

Table 1 Evaluation index and classification of potential ecological risk

E_i	单项潜在生态风险程度	RI	潜在生态风险程度
< 40	低	< 120	低
40 ~ 80	中	120 ~ 240	中等
80 ~ 160	较高	240 ~ 480	较高
160 ~ 320	高	> 480	很高
> 320	极高		

1.4 PMF 法

PMF 是一种以受体模型为基础并利用样本组成对污染源进行定量解析的一种数学方法,由 Paatero 等^[24] 首次提出. PMF 源解析基本原理如下:

假设矩阵 X 为测定样品数据,矩阵 X 可以分解为分数矩阵 G 和载荷矩阵 F ,残差矩阵 E 表示矩阵 X_{ij} 和模型矩阵 Y_{ij} 之间的差值.其基本方程如式(7):

$$E_{ij} = X_{ij} - Y_{ij} = X_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj}$$
$$(i = 1, \cdots, n; j = 1, \cdots, m)$$

(7)

式中, E_{ij} 为残差矩阵; G_{ik} 为样品在源中的贡献,即源分数矩阵; F_{kj} 为污染物在源中贡献含量,即源载荷矩阵.

PMF 模型将实验实测数据分为系数的贡献(G)和因子数(F)两个矩阵,利用每个取样点污染物含量和不确定度数据按照加权系数对各个点进行加权,得到最小目标函数 Q ,如式(8):

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[X_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} \right] / u_{ij}$$

(8)

式中, Q 为累积残差; i 为样品数; j 为测定污染物种类; p 为 PMF 模型找到的合适因子数; F 为每个源的成分矩阵; G 为样品中每种污染物的贡献矩阵; u_{ij} 为每个样品/污染物种类的不确定性,计算方法如式(9):

$$u_{ij} = \begin{cases} (5/6) \times L_{MDL} & (X_{ij} \leq L_{MDL}), \\ \sqrt{(RSD \times X_{ij})^2 + (L_{MDL})^2} & (X_{ij} > L_{MDL}). \end{cases}$$

(9)

表2 研究区农田表层土壤重金属含量统计¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Summary of HMs contents in topsoil of farmland in the study area/mg·kg⁻¹

项目	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
最大值	47.38	80.21	326.13	15 128.20	5.23	15.30	47.46	125.47	88.85	0.37	60.02	0.24
最小值	11.74	7.68	125.12	4 172.36	1.88	2.29	7.69	51.73	4.00	0.08	19.89	0.10
平均值	26.68	24.75	220.50	8 696.74	3.30	5.60	19.05	78.45	26.19	0.16	38.27	0.18
标准偏差	7.38	12.52	48.82	2 248.18	0.79	2.45	6.51	16.81	15.08	0.06	9.30	0.03
变异系数	0.28	0.51	0.22	0.26	0.24	0.44	0.34	0.21	0.58	0.35	0.24	0.18
厦门土壤重金属背景值 ^[18]	46.50	24.70	670.00	24 300.00	6.10	9.00	9.70	51.50	4.40	0.05	46.80	0.05
土壤环境质量筛选值 ^[25]	—	150.00	—	—	—	70.00	50.00	200.00	40.00	0.30	90.00	1.80

1) “—”表示无该重金属筛选值

元素受东南风的影响,空间分布呈现相似特征,Co、Cr、Cu、Zn、V、Fe 和 Zn 的含量高值区均出现在研究区西北部或北部. Ni 的含量高值区在研究区中部,可能和区域环状小道的分布及其交通运输活动有关. Pb、Hg 和 As 在研究区南部具有较高含量. 燃煤对 As 的累积影响十分显著^[26]. 结合实地考察,研究区以南存在数个工业园区,分布有五金建材加工生产等工业企业,其间多条乡间小道交错,且邻近 209 省道. 因此,工业活动和交通运输可能是 As 含量在南部较高的原因. Mn 属于在高温焚烧区基本不挥发的 I 类金属,在焚烧过程中形成组分稳定的熔化物,并转化为飞灰和熔渣而被移除^[27],因此, Mn 含量高值区主要呈点状分布. Mn 有部分高含量样点

式中, RSD 为重金属含量的相对标准偏差; L_{MDL} 为方法检出限; X_{ij} 为重金属样品含量.

1.5 数据分析

用 SPSS 22.0 和 Excel 2010 软件进行土壤重金属含量统计分析、污染评价和潜在生态风险评价,采用 ArcGIS 10.3 软件对土壤重金属进行 Kriging 插值得到空间分布,用 EPAPMF 5.0 软件进行 PMF 源解析.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量描述性统计和空间分布特征

研究区农田表层土壤的 pH 值范围为 5.57 ~ 7.58(均值 6.26). 各元素的含量统计结果见表 2. Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 含量均未超过我国土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)中的筛选值,但 As 有 16% 的样品超过筛选值. Cu、Zn、As、Cd 和 Hg 含量平均值分别是厦门土壤元素背景值的 1.96、1.52、5.95、3.38 和 3.65 倍. Cr 和 As 变异系数较高(分别为 0.51 和 0.58),表明该区域表层土壤重金属可能受到一定外源输入的影响.

用 ArcGIS 对研究区表层土壤中的重金属元素含量进行 Kriging 插值,结果见图 2. 从中可知,多个

位于研究区南部,可能与五金加工生产和交通活动有关. Cd 作为在焚烧区易挥发的 II 类金属,随着烟道气变冷而大部分冷凝或被吸附到飞灰表面,并选择性地富集到难以捕捉的细微颗粒上而排放出炉^[28],因此,其含量高值区主要呈块状集中分布在焚烧厂周围.

2.2 土壤重金属污染评价

研究区表层土壤重金属地累积指数(I_{geo})分布箱线图如图 3(a)所示. 各元素地累积指数平均值顺序为: As (1.76) > Hg (1.26) > Cd (1.10) > Cu (0.31) > Zn (-0.01) > Cr (-0.73) > Pb (-0.92) > Ni (-1.38) > V (-1.44) > Co (-1.51) > Fe (-2.11) > Mn (-2.22). As、Hg

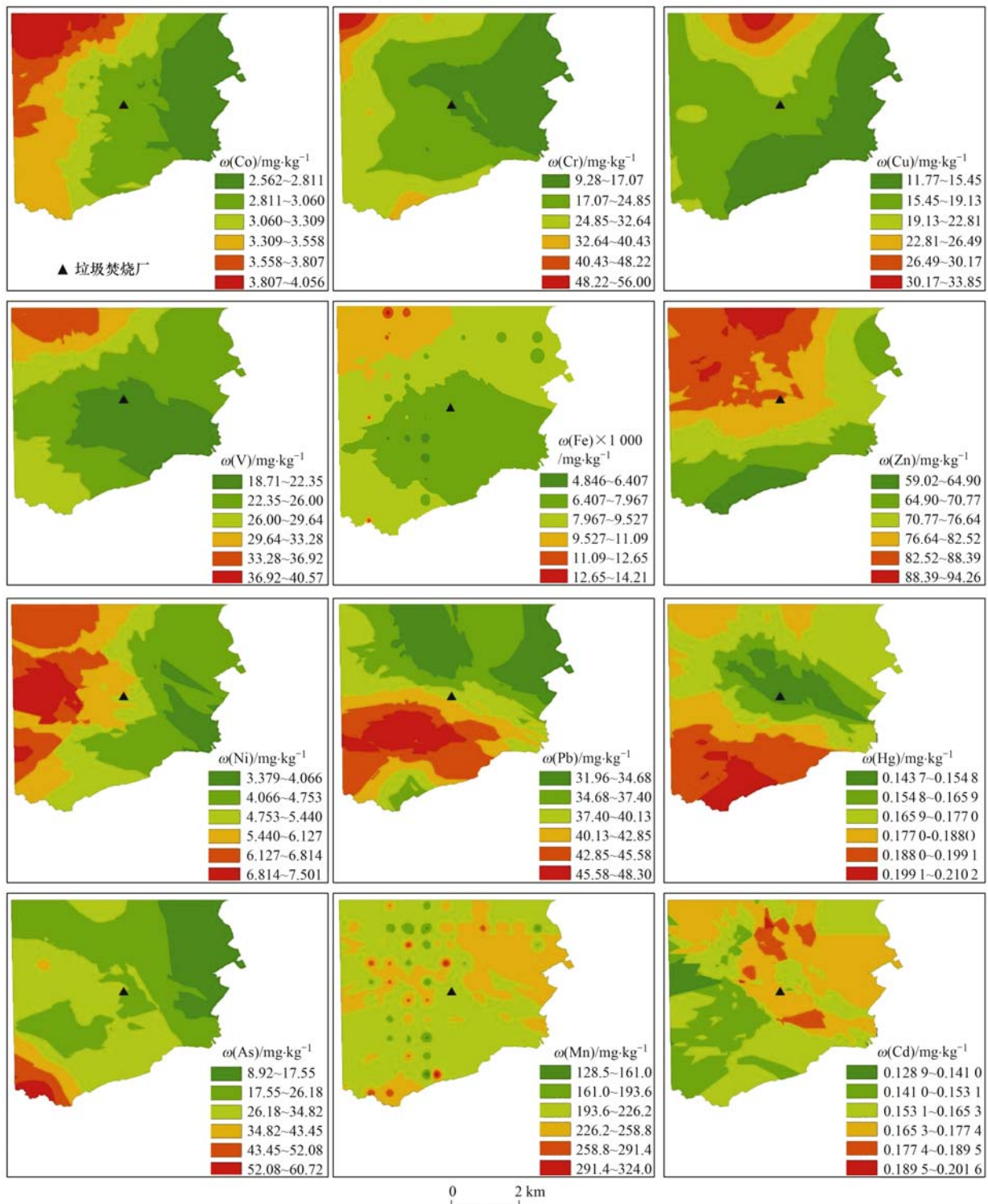


图2 研究区农田表层土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of HMs in the topsoil of farmland in the study area

和 Cd 为中度污染, Cu 为轻污染. 其他元素均为无污染.

各元素内梅罗综合污染指数 ($P_{\text{综}}$) 顺序为: As (14.89) > Cd (6.00) > Hg (4.27) > Cu (3.73) > Cr (2.40) > Zn (2.03) > Ni (1.28) > Pb (1.08) > V (0.83) > Co (0.72) > Fe (0.51) > Mn (0.42) [见图 3(b)]. Cu、As、Cd 和 Hg 为重度污染, Cr、Ni、Zn 和 Pb 为轻度~中度污染, 其余重金属无污染. 研

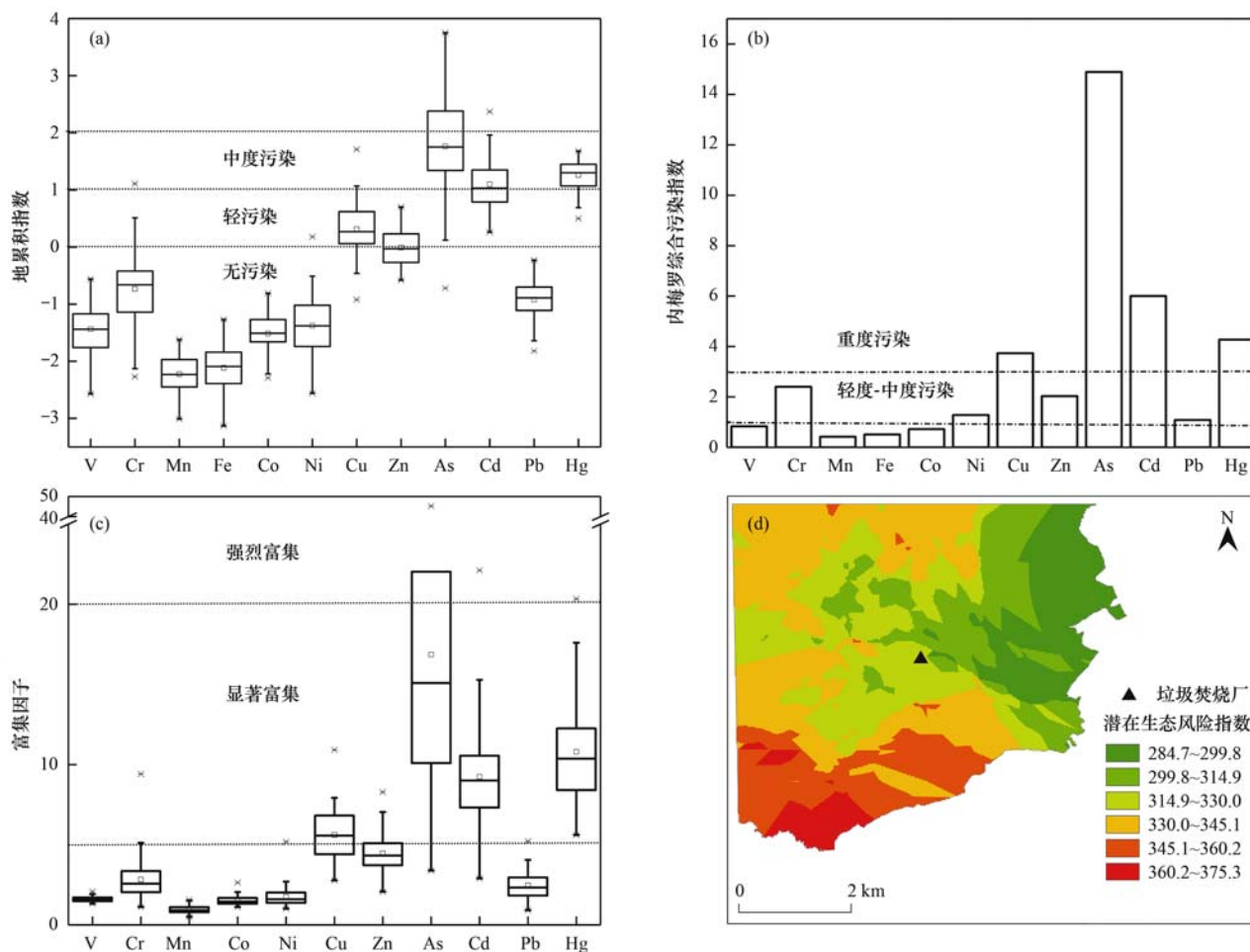
究区重金属的综合污染程度为中度~重度污染.

各元素富集因子平均值顺序为: As (16.86) > Hg (10.80) > Cd (9.24) > Cu (5.61) > Zn (4.46) > Cr (2.84) > Pb (2.46) > Ni (1.76) > V (1.60) > Co (1.55) > Mn (0.96) [见图 3(c)], 除 Mn 外, 各元素存在不同程度的富集, 其中 As、Hg、Cd 和 Cu 分别有 70.18%、98.25%、91.23% 和 59.65% 样点存在显著富集, Zn、Cr 和 Pb 分别有 57.89%、

70.18% 和 64.91% 的样点存在中度富集, Ni、V 和 Co 为轻度富集. 研究区表层土壤重金属富集程度较高, 尤其是 As、Hg 和 Cd 的累积需引起重视.

重金属潜在生态风险指数(RI)空间分布见图 3(d), 高风险区主要位于研究区南部, RI 值自西南向东北递减. 根据单元素的平均潜在生态风险系数(E_i), Hg 和 Cd 具有较高潜在生态风险, As 为中等潜在生态风险, 其余元素均为低生态风险; 各元素

对生态风险指数(RI)的贡献率大小为: Hg(43.99%) > Cd(30.60%) > As(17.95%) > Cu(2.96%) > Pb(1.23%) > Ni(0.94%) > Co(0.82%) > Cr(0.60%) > Zn(0.46%) > V(0.35%) > Mn(0.10%). 可见, 研究区主要潜在生态风险元素是 Hg 和 Cd, As 次之, 其它元素的贡献相对较小. 其原因一方面是 Hg、Cd 和 As 的毒性系数较高, 另一方面可能是当地人类活动的影响.



(a) 地累积指数, (b) 内梅罗综合污染指数, (c) 富集因子, (d) 潜在生态风险指数空间分布

图3 研究区农田表层土壤重金属污染特征

Fig. 3 Pollution characteristics of HMs in the topsoil of farmland in the study area

2.3 土壤重金属来源分析

2.3.1 多元统计分析结果

利用 SPSS 软件对研究区农田表层土壤中各元素间的相关性进行分析(表 3), 并判别重金属元素的来源. V、Co、Ni 和 Fe 相互间呈极显著正相关, 说明可能具有同源性, V 和 Ni 均为成岩元素, 推测这些元素和成土母质有关^[29]; Cu 和 Zn 相互具有相关性, 说明可能来自共同源; Cr 和 Hg 具有显著相关性, 说明来源类似; Mn 和 Cd、As 之间呈极显著正相关, 推断这些元素具有同源性.

对各重金属元素进行变量聚类(R 型)分析, 结果如图 4 所示. 垃圾焚烧厂周边重金属可以分

为四类, 第一类为 V、Fe、Co、Ni、Cu 和 Zn, 推测与母质层和交通排放有关; 第二类为 Mn、As 和 Cd, 可能和垃圾焚烧有关; 第三类为 Cr 和 Hg, 可能和农药化肥施用有关; 第四类为 Pb, 可能指示交通源.

为进一步确定重金属的来源, 通过主成分分析进行来源解析, 结果见表 4. 采用 SPSS 22.0 统计软件进行分析, KMO 和 Bartlett 球形度检验值分别为 0.638 和 $P < 0.001$, 标准化后的数据适宜进行主成分分析. 根据特征向量选取准则(特征值大于 1.0)提取 4 个初始因子, 数据经最大方差旋转后, 共提取了 4 个主成分, 解释了 12 种重金属含量总方差的

69.04%. PC1 的方差贡献率为 34.25%, 在 V、Fe、Co、Ni、Cu 和 Zn 上有较大载荷, V、Fe、Co 和 Ni 变异系数分别是 0.28、0.26、0.24 和 0.44, 受人类活动干扰较小, 推断其主要来自土壤母质层; Cu 和 Zn 的累积与交通运输有关, 汽车轮胎磨损和润滑油泄漏等交通活动会产生含 Cu 和 Zn 的粉尘并在大气干湿沉降作用下在土壤中富集^[30], 因此, PC1 可能为自然源和交通源的混合源. PC2 解释了总方差的 13.82%, 与 Mn、As 和 Cd 高度正相关. 城市生活垃圾(如电池、塑料、废轮胎和有色玻璃等)含有大量的 Mn、As 和 Cd 等元素^[31], As 和 Cd 不但挥发性

强, 也是焚烧尾气排放的重要标志性污染物^[27]; 结合重金属空间分布特征, Mn 含量高值区位于焚烧厂周边, 而 As 含量高值区则位于研究区南部, 靠近工业园区, 与工业生产和燃煤排放有关^[32], 因此, PC2 被认为是垃圾焚烧和燃煤混合源. PC3 的方差贡献率为 11.62%, Cr 和 Hg 的载荷较大. 根据富集因子结果, Cr 和 Hg 在土壤中分别存在中度富集和显著富集, 可能和当地广泛使用地膜、化肥有关^[33], 因此, PC3 来源于农业源. PC4 占总方差贡献率的 9.35%, Pb 有较大载荷, 结合其空间分布特征, 推断 PC4 属于交通源.

表 3 研究区农田表层土壤各重金属相关性¹⁾

Table 3 Correlation of HMs in the topsoil of farmland in the study area

	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
V	1	0.336 *	0.104	0.925 **	0.685 **	0.501 **	0.531 **	0.329 *	0.230	0.147	-0.058	0.247
Cr		1	-0.003	0.352 **	0.203	0.230	0.290 *	0.097	0.263 *	0.070	-0.024	0.302 *
Mn			1	0.336 *	0.354 **	-0.015	-0.069	0.188	0.463 **	0.491 **	0.086	0.094
Fe				1	0.697 **	0.485 **	0.492 **	0.334 *	0.396 **	0.205	-0.108	0.157
Co					1	0.391 **	0.359 **	0.382 **	0.159	0.286 *	0.153	0.076
Ni						1	0.356 **	0.290 *	0.307 *	0.038	0.112	0.078
Cu							1	0.676 **	0.215	0.254	-0.028	-0.049
Zn								1	0.265 *	0.420 **	0.219	-0.099
As									1	0.207	0.203	0.138
Cd										1	0.148	0.173
Pb											1	0.100
Hg												1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

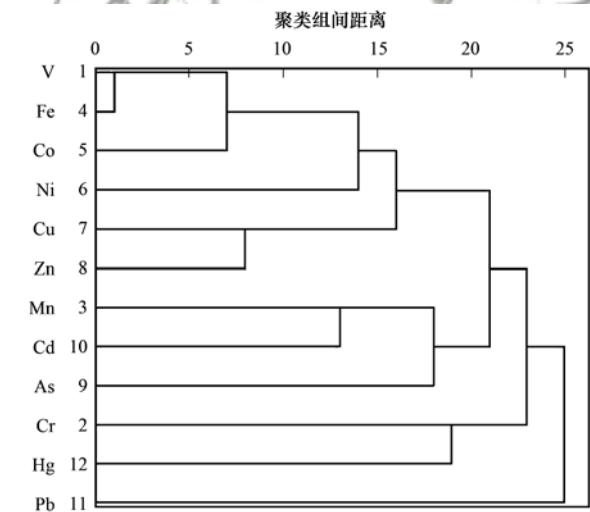


图 4 研究区农田表层土壤重金属 R 型聚类分析结果

Fig. 4 Hierarchical cluster analysis results (R) of HMs in the topsoil of farmland in the study area

2.3.2 PMF 分析

在聚类分析和主成分分析的基础上,为得到各元素源成分谱贡献率,使用 PMF 模型分别设置 4~5 个因子数,根据 S/N 值调整不确定性进行多次运算后,确定了因子数为 4 时 Q_{Robust} 和 Q_{True} 相接近,含量

表 4 研究区农田表层土壤重金属主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results of HMs in the topsoil of farmland in the study area

元素	PC1	PC2	PC3	PC4
V	0.859	0.133	0.275	-0.213
Cr	0.373	-0.103	0.609	0.080
Mn	-0.001	0.929	0.076	-0.047
Fe	0.825	0.330	0.254	-0.253
Co	0.679	0.405	0.070	-0.083
Ni	0.637	-0.101	0.242	0.193
Cu	0.800	-0.052	-0.183	0.272
Zn	0.602	0.247	-0.330	0.525
As	0.231	0.444	0.366	0.327
Cd	0.154	0.699	-0.072	0.272
Pb	-0.087	0.122	0.159	0.786
Hg	-0.024	0.123	0.786	0.038

值和模型预测值之间达到最佳拟合效果,且大部分残差处于 -3~3 之间,除 Cr、Ni、Cd 和 Hg 的拟合曲线 r^2 小于 0.5(可能和这些元素来源更为复杂有关)之外,其余元素拟合曲线 r^2 均大于 0.9.

如图 5 所示,PC1 的主要载荷元素为 Mn、Cd、Pb 和 Hg,贡献率分别为 53.89%、42.12%、47.23% 和 40.92%. 这些元素均在城市生活垃圾中大量存

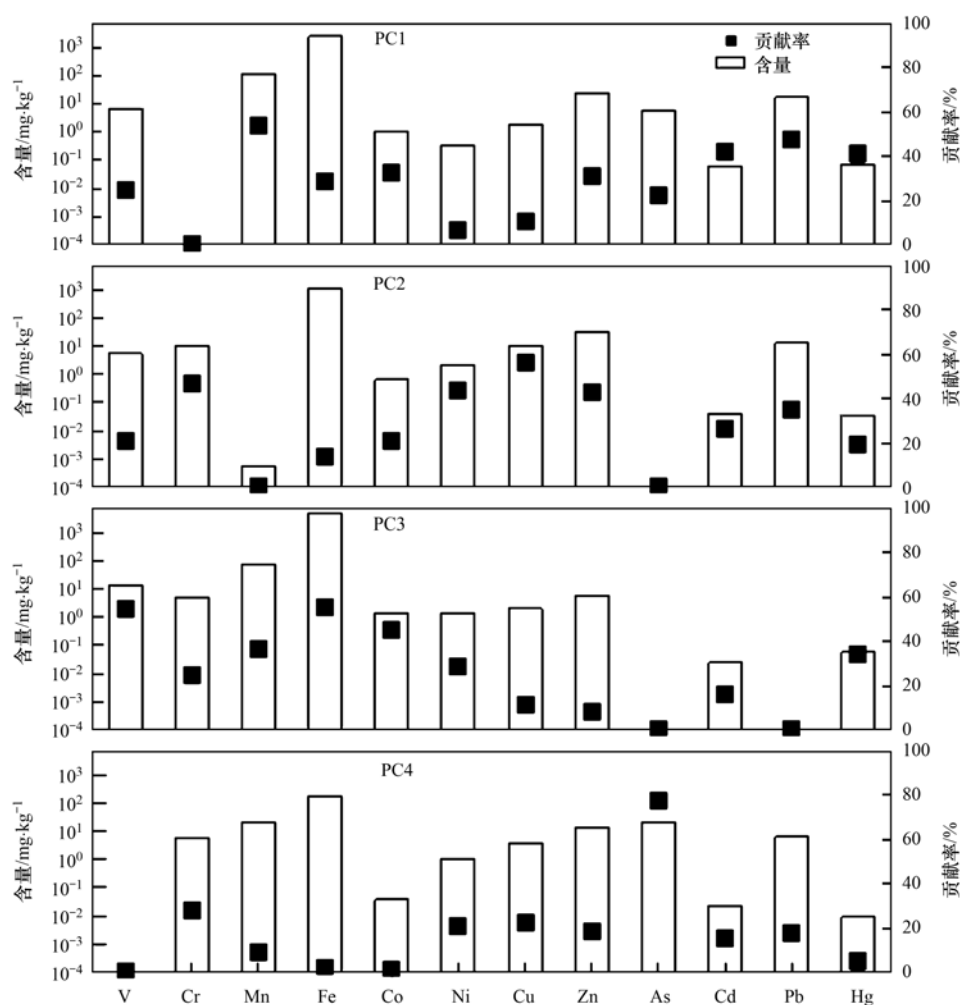


图5 研究区农田表层土壤重金属含量分布的贡献率

Fig. 5 Contribution rate of HMs content distribution in the topsoil of farmland in the study area

在,且 Hg 在垃圾焚烧厂排放中备受关注,除此之外,Cd 和 Pb 均作为焚烧尾气排放的重要标志性污染物^[32],易随焚烧烟气沉降在土壤中富集.因此,PC1 主要源于垃圾焚烧. PC2 中 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 有较大载荷,其贡献率分别为 47.06%、44.03%、56.23%、42.60% 和 35.13%. 机动车尾气排放、轮胎磨损、燃油和润滑油泄漏等均可导致 Cu、Zn 和 Pb 等元素在土壤中积累^[12]. 由此推测 PC2 受到交通排放的影响. PC3 主要贡献元素为 V、Fe、Co、Cr、Ni 和 Hg,贡献率分别为 54.42%、55.46%、45.27%、24.92%、28.55% 和 34.34%,其中,V、Fe、Co 和 Ni 含量均小于背景值且变异系数小于 0.5,结合前文评价结果,其主要来源于土壤母质. 对于农田土壤,由于各种生产活动而易受到人类活动影响,过量施加化肥和农药可能导致 Cr 和 Hg 在土壤中积累^[11],因此推断 PC3 为自然源和农业源的混合. PC4 主要贡献元素为 As,贡献率为 77.33%. 结合前文富集因子结果和空间分布特征,超半数土壤样点中存在 As 富集,且其含量高值区位于研究区南

部. 根据实际调研,大量消耗的燃煤导致 As 在研究区南部土壤中富集,因此,PC4 可能为燃煤源.

综上所述,厦门市某垃圾焚烧厂周边农田表层土壤重金属主要来源为垃圾焚烧、交通源、自然源和农业源的混合源以及燃煤源,贡献率分别为 28.42%、27.22%、26.29% 和 18.07%.

3 讨论

本研究结果显示:垃圾焚烧厂周边农田表层土壤重金属主要受到交通、燃煤、垃圾焚烧和农业活动的影响,与地形地貌、气候气象和人类活动联系紧密. 该结论和国内外同类研究的结果相似^[1,2,9,10]. 对于土壤重金属来源解析,目前来说多元统计方法最为常见. 如聚类分析(CA)和主成分分析(PCA)等仅通过相关性将类似来源元素进行粗略分类,而 PCA 在将原始数据降维转化为直观信息的过程中,来源结果更是难免存在一定误差. 因此,为了补充对重金属的定量分析,近年来,主成分分析/绝对主成分数(PCA/APCS)和正定矩阵因子分析法

(PMF)等改进统计学方法逐渐开始应用于土壤领域,并取得了一定成果^[14,15]。本文结合了 PMF 受体模型互相佐证污染溯源结果,从而更好地确定污染来源并量化其贡献率。主成分分析和 PMF 模型分别对当地 Pb 污染进行分析,结合贡献率得出 Pb 主要受到垃圾焚烧和交通排放的混合影响。

4 结论

(1)研究区 Cu、Zn、As、Cd 和 Hg 含量平均值分别是当地土壤背景值的 1.96、1.52、5.95、3.38 和 3.65 倍。Co、Cr、Cu、Zn、V 和 Fe 含量高值区均出现在研究区西北部或北部,Pb、Hg 和 As 高值区主要在研究区南部,Mn 和 Cd 高值区主要集中在焚烧厂附近。

(2)地累积指数结果表明,研究区以 As 污染为主,Hg 污染次之;内梅罗综合污染指数表明,研究区重金属为中度至重度污染;富集因子结果表明,研究区表层土壤重金属富集程度较高,As、Hg、Cd 和 Cu 存在显著富集;潜在生态风险指数表明,该区潜在生态风险较高,主要生态风险因子是 Hg 和 Cd,As 次之,高风险区主要位于研究区南部。

(3)根据主成分分析结果,垃圾焚烧厂周边农田表层土壤中重金属分为 4 个主成分,V、Fe、Co、Ni、Cu 和 Zn 主要为自然源和交通源混合源,Mn、As 和 Cd 主要为垃圾焚烧和工业燃煤混合源,Cr 和 Hg 主要来源于农业源,Pb 主要为交通源和垃圾焚烧混合源。

(4)PMF 分析结果表明,研究区表层土壤中重金属主要来源为垃圾焚烧、交通源、自然源和农业源的混合源以及工业燃煤源,所占比例分别为 28.42%、27.22%、26.29% 和 18.07%。

参考文献:

- [1] Mohamad N, Abustan I, Mohamad M, *et al.* Metal removal from municipal landfill leachate using mixture of laterite soil, peat soil and rice husk [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, **5** (10): 21832-21840.
- [2] Wang C, Shao N N, Xu J Y, *et al.* Pollution emission characteristics, distribution of heavy metals, and particle morphologies in a hazardous waste incinerator processing phenolic waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121751.
- [3] Ohanu C M G, Ekeh F N, Ohanu I B, *et al.* Evaluation of some heavy metals and physicochemical properties of public refuse dumpsites in Nsukka metropolis, Nigeria [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(7): 477.
- [4] Li Q H, Li C F, Wang H, *et al.* Geochemical characteristics of heavy metals in soil and blueberries of the core Majiang blueberry production area[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, **106**(1): 57-64.
- [5] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [6] Mouhoun-Chouaki S, Derridj A, Tazdaït D, *et al.* A study of the impact of municipal solid waste on some soil physicochemical properties; the case of the landfill of Ain-El-Hammam municipality, Algeria [J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, **5**: 1-8.
- [7] Ma J, Chen Y L, Weng L P, *et al.* Source identification of heavy metals in surface paddy soils using accumulated elemental ratios coupled with MLR[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(5), doi: 10.3390/ijerph18052295.
- [8] Zhao L S, Yan Y, Yu R L, *et al.* Source apportionment and health risks of the bioavailable and residual fractions of heavy metals in the park soils in a coastal city of China using a receptor model combined with Pb isotopes[J]. *Catena*, 2020, **194**, doi: 10.1016/j.catena.2020.104736.
- [9] 钟山, 高慧, 张漓衫, 等. 平原典型垃圾焚烧厂周边土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *生态环境学报*, 2014, **23** (1): 164-169.
Zhong S, Gao H, Zhang L S, *et al.* Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metal in soils surrounding a typical municipal solid waste incineration plant [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 164-169.
- [10] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
Guo Y H, Sun X C, Zhang S B, *et al.* Pollution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
- [11] Ghasemidehkordi B, Malekiran A A, Nazem H, *et al.* Concentration of lead and mercury in collected vegetables and herbs from Markazi province, Iran; a non-carcinogenic risk assessment[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, **113**: 204-210.
- [12] 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.
- [13] Wang Y T, Guo G H, Zhang D G, *et al.* An integrated method for source apportionment of heavy metal (loid)s in agricultural soils and model uncertainty analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **276**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116666.
- [14] 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.
- [15] Huang Y, Deng M H, Wu S F, *et al.* A modified receptor model for source apportionment of heavy metal pollution in soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **354**: 161-169.
- [16] Wang S, Cai L M, Wen H H, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 92-101.
- [17] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine

- River[J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [18] 国家环境保护局, 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.
- [19] 张国云, 杨俊华, 郭晋, 等. 德宏州耕作土壤表层重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(4): 21-26.
- Zhang G Y, Yang J H, Guo J, *et al.* Tillage soil surface heavy metal content characteristic and the potential ecological risk assessment in Dehong prefecture[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(4): 21-26.
- [20] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. *Science*, 1974, **183**(4121): 198-200.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [22] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [23] 陈静生, 王忠, 刘玉机. 水体金属污染潜在危害: 应用沉积学方法评价[J]. *环境科技*, 1989, **9**(1): 16-25.
- Chen J S, Wang Z, Liu Y J. Potential risk of heavy metal pollution in water: assessment by sedimentology measure[J]. *Environment Technology*, 1989, **9**(1): 16-25.
- [24] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [25] GB15618-2018. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [26] Islam M S, Chen Y L, Weng L P, *et al.* Watering techniques and zero-valent iron biochar pH effects on As and Cd concentrations in rice rhizosphere soils, tissues and yield[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **100**: 144-157.
- [27] 王俊坚, 赵宏伟, 钟秀萍, 等. 垃圾焚烧厂周边土壤重金属浓度水平及空间分布[J]. *环境科学*, 2001, **32**(1): 298-304.
- Wang J J, Zhao H W, Zhong X P, *et al.* Concentration levels and spatial distribution of heavy metals in soil surrounding a municipal solid waste incineration plant (Shenzhen) [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(1): 298-304.
- [28] 董骅睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [29] Wang P C, Li Z G, Liu J L, *et al.* Apportionment of sources of heavy metals to agricultural soils using isotope fingerprints and multivariate statistical analyses [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 208-216.
- [30] Zhang Z X, Zhang N, Li H P, *et al.* Risk assessment, spatial distribution, and source identification of heavy metal(loid)s in paddy soils along the Zijiang River basin, in Hunan Province, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(12): 4042-4051.
- [31] Jiang H H, Cai L M, Hu G C, *et al.* An integrated exploration on health risk assessment quantification of potentially hazardous elements in soils from the perspective of sources [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111489.
- [32] 曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 等. 贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(1): 102-113.
- Zeng Q Q, Fu T L, Zou H Q, *et al.* Spatial distribution characteristics and sources of heavy metals in soil in a pepper growing area of county in Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(1): 102-113.
- [33] Cai L M, Wang Q S, Wen H H, *et al.* Heavy metals in agricultural soils from a typical township in Guangdong Province, China: occurrences and spatial distribution [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **168**: 184-191.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)