

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020 年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳锋, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钲, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	信息(6743, 6846, 6856)

重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析

张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元*

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:以重庆市某在产石化场地土壤为研究对象,采用正定矩阵分解模型等方法对研究区域土壤重金属和挥发性有机污染物进行污染源定量解析.结果表明:①石化场地及周边土壤中金属镉、铜、铅、汞和锰含量的平均值高于重庆地区土壤背景值,6%采样点中钴的含量高于建设用地第一类用地风险筛选值(GB 36600-2018);场地土壤中汞、锰、氯仿、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯的污染程度较场地周边土壤更为严重,场地工业生产活动会对场地土壤造成显著污染.②场地土壤中8种重金属主要归为4类来源:62.50%镉、54.53%镍、54.12%铜、51.26%钴、49.34%铅和31.80%汞来自于工业和农业活动混合源;47.61%锰来自于场地原料生产活动排放和自然源;62.79%汞、21.57%砷、19.43%锰和18.42%镉来自于燃煤工业活动排放源;78.01%砷、46%铅、39.94%铜、38.15%镍、36.49%钴、26.12%锰和14.29%镉来自于成土母质源.③场地土壤中7种挥发性有机污染物主要归为3类来源:86.49%二氯甲烷和90.14%四氯乙烯来自于石化场地人为活动源;98.88%间/对-二甲苯、96.28%邻-二甲苯、84.62%乙苯和76.46%甲苯来自于石化场地污染物泄漏源,80.24%氯仿来自于自然源.

关键词:石化场地;重金属;挥发性有机污染物(VOCs);分布特征;污染状态;源解析

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2023)12-6933-14 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202209052

Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site

ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, CAO Jun, LIU Bin, LIU Yuan-yuan*

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Taking the soil of a petrochemical site in Chongqing as the research object, the pollution sources of heavy metals and volatile organic pollutants in the study area were quantitatively analyzed using principal component analysis and a positive definite matrix decomposition model. The research results showed that: ① the average values of Cd, Cu, Pb, Hg, and Mn in the soil of the petrochemical site and its surrounding areas were higher than the soil background values in Chongqing, and the content of Co in 6% of sampling points was higher than the risk screening value of the first type of land use for construction land (GB 36600-2018). The pollution level of Hg, Mn, chloroform, ethylbenzene, *m/p*-xylene, and *o*-xylene in the soil of the site was more serious than that of the soil around the site. The industrial production activities of the site will cause significant pollution to the soil of the site. ② Eight heavy metals in the soil could be classified into four sources: 62.50% Cd, 54.53% Ni, 54.12% Cu, 51.26% Co, 49.34% Pb, and 31.80% Hg were from the mixed sources of industrial emissions and agricultural activities. A total of 47.61% Mn was from the mixed source of natural and raw material production activities; 62.79% Hg, 21.57% As, 19.43% Mn, and 18.42% Cd were from the emission of coal-fired industrial activities; and 78.01% As, 46% Pb, 39.94% Cu, 38.15% Ni, 36.49% Co, 26.12% Mn, and 14.29% Cd were from the original material soil. ③ Seven volatile organic compounds in the soil of the site were mainly classified into three types of sources: 86.49% dichloromethane and 90.14% tetrachloroethylene were from human activities in petrochemical sites; 98.88% *m/p*-xylene, 96.28% *o*-xylene, 84.62% ethylbenzene, and 76.46% toluene were from petrochemical site pollutant leakage sources; and 80.24% chloroform was from the natural sources.

Key words: petrochemical sites; heavy metals; volatile organic compounds (VOCs); distribution characteristics; pollution status; source analysis

石化行业企业生产工艺流程复杂且管线布设密集,场地中设备故障或老化、污染泄漏(储罐及管线的泄漏、污染物的无组织排放、污水管线的跑冒滴漏)和污水排放不规范等突发事件可能会对大气、土壤和水造成严重污染^[1,2].石化场地通常具有面积大、生产装置多、管线密集、涉及化学品种类多等特点^[1].国内外学者在石化场地及周边区域土壤中检测出多种污染物:石油烃^[3]、苯系物^[4](benzene、toluene、ethylbenzene、xylene,简称BTEX)和卤代烃等挥发性有机物^[5~7](volatile organic compounds, VOCs)、多环芳烃等半挥发性有机物^[8~11]以及酚类化合物等有机污染物^[12].由于石化企业生产过程也会涉及催化剂和添加剂等的使用^[1],所以砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍

(Ni)、锌(Zn)和镉(Cd)等重金属也是需要重点关注的污染物^[13~15].为了准确描述石化场地土壤的污染状况,确定重点管控区域和生产环节,有效地对土壤进行修复和保护,则需要精确识别和定量分析潜在污染源对土壤污染的贡献.

目前,受体模型已被广泛应用于确定各种污染物的主要来源、定量各污染源的贡献值^[16~19].常用的受体模型有主成分分析^[20]、数学受体模型^[21]、化学质量平衡模型法^[22]和正定矩阵分解模型法^[5,23].其中,正定矩阵分解模型法无需源成分的详

收稿日期:2022-09-05;修订日期:2023-02-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1800305)

作者简介:张渝蓉(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染防治,E-mail: zhang-yurong@cqu.edu.cn

* 通信作者,E-mail: liuyuan-yuan@cqu.edu.cn

细信息即可解释结果,但是其源解析结果也伴有较强的主观性和不确定性^[24~27]. Paatero 等^[25]提出了拔靴法(bootstrap, BS)、替换法(displacement, DISP)和拔靴-替换法(bootstrap-displacement, BS-DISP)这3种误差估计方法来验证源解析结果的准确性.

本研究对重庆市某在产石化场地及周边土壤中挥发性有机污染物和重金属进行监测与评价,分析描述了污染物的空间分布特征及相关性,利用正定矩阵分解模型定量解析了各污染源对土壤污染物的贡献,并结合不确定性分析来判断源解析的合理性,以期在在产石化企业用地土壤中污染物的定量贡献分析及污染预测提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

重庆市土壤类型以紫色土和黄壤为主,分别占全市面积的32.0%和28.0%^[28]. 研究区域现场回填层土壤多为紫色土,黏土层为灰褐色或黄褐色. 研究场地位于重庆市中部,地理位置为东经107°17′~107°19′,北纬29°41′~29°43′,场地周边1 km范围内以山林和农田为主. 研究区域属于

亚热带温湿季风气候区,气候特点为夏热冬暖、光热同季、无霜期长、雨量充沛和湿润多阴^[29]. 2020年该区域总降雨量为1 181.4 mm,平均气温为19.2℃,平均相对湿度为75.6%,平均风速为1.3 m·s⁻¹,全年主导风向为东北风. 由于河流切割,地形起伏较大,气候随海拔高度而变化的立体气候规律十分明显^[29].

1.2 土壤样品采集及预处理

1.2.1 土壤采样点位布设

在研究区域中布设34个土壤采样点,点位分布如图1所示. 参考《建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则》(HJ 25.2-2019)^[30],采用分区布点和专业判断布点在场内重点区域非硬化地面布设1A01、1A02、1E01、1E02、1H01和1H02共6个采样点. 参考研究区域地形条件和主导风向,以研究场地为中心,在场内边界布设A1~A11共11个采样点位;在场内西北区布设E1~E3共3个采样点;在场内南区布设F1~F3共3个采样点;在场内西南区下风向1 km内布设B1~B4共4个采样点;在场内西南区下风向3 km内布设C1~C4共4个采样点;在场内东区上风向3 km范围内布设D1~D3共3个采样点.

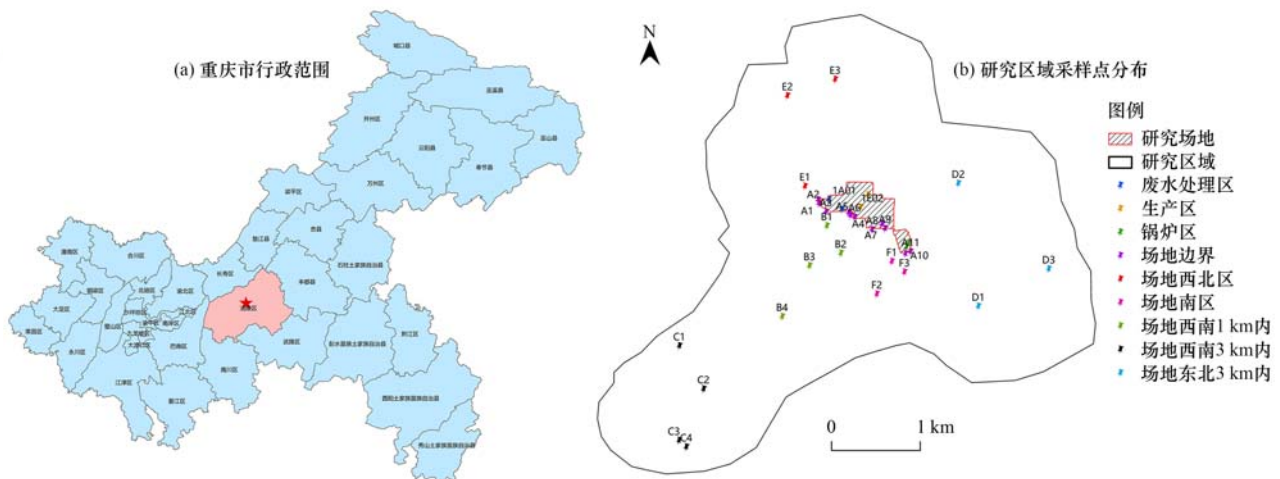


图1 研究区域土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in the study area

1.2.2 土壤中污染物检测分析

石化场地土壤中可能存在的环境污染物包括重金属、挥发性有机物和半挥发性有机物等. 测试分析方法为:金属 As(微波消解-原子荧光法, HJ 680-2013); Cr(VI)(碱溶液提取-火焰原子吸收分光光度法, HJ 1082-2019); 金属 Cd、Cu、Ni、Pb、Co 和 Mn(王水提取-电感耦合等离子体质谱法, HJ 803-2016); 金属 Hg(微波消解-原子荧光法, HJ 680-2013). 溴甲烷(吹扫捕集-气相色谱-质谱法, HJ 605-

2011), 阳离子交换量(三氯化六氨合钴浸提-分光光度法, HJ 889-2017). 半挥发性有机物(硝基苯、苯胺、2-氯苯酚、苯并[a]蒽、苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、苯并[k]荧蒽、蒽、二苯并[a,h]蒽、茚并[1,2,3-cd]芘和萘)采用气相色谱-质谱法(HJ 834-2017). 挥发性有机物(四氯化碳、氯仿、氯甲烷、1,1-二氯乙烷、1,2-二氯乙烷、1,1-二氯乙烯、顺式-1,2-二氯乙烯、反式-1,2-二氯乙烯、二氯甲烷、1,2-二氯丙烷、1,1,1,2-四氯乙烷、1,1,2,2-四氯乙

烷、四氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、三氯乙烯、1,2,3-三氯丙烷、氯乙烯、苯、氯苯、1,2-二氯苯、1,4-二氯苯、乙苯、苯乙烯、甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯)采用吹扫捕集-气相色谱-质谱法(HJ 605-2011)。

1.3 土壤污染状态评价

1.3.1 土壤重金属污染

(1)地累积指数法(index of geo-accumulation, I_{geo})由 Muller^[30]提出,表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 C_i / (K \cdot S_i) \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数值, C_i 为元素 i 的实测值; S_i 为元素 i 在重庆地区土壤背景值; K 为修正系数, 取 1.5^[32]. 污染评价等级^[33,34]为: $I_{geo} \leq 0$ (未受到污染), $0 < I_{geo} \leq 1$ (轻度污染)、 $1 < I_{geo} \leq 2$ (轻中度污染)、 $2 < I_{geo} \leq 3$ (中度污染)、 $3 < I_{geo} \leq 4$ (中强度污

染)、 $4 < I_{geo} \leq 5$ (重度污染) 和 $I_{geo} > 5$ (极度污染)。

(2)潜在生态风险指数(potential ecological risk index, PERI)由 Hakanson^[35]提出,是能够定量衡量污染物生态风险的指标^[36,37]. 计算公式为:

$$CF_i = C_{ni} / C_{bi} \quad (2)$$

$$PERI = \sum ER_i = \sum (T_{ri} \times CF_i) \quad (3)$$

式中, CF_i 为元素 i 的污染系数; C_{ni} 为元素 i 的实测含量; C_{bi} 为元素 i 在重庆地区土壤背景值; T_{ri} 为元素 i 的毒性系数; ER_i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; PERI 为土壤中多种重金属的综合潜在生态风险指数. 各重金属的毒性系数参考 Hakanson^[34] 和徐争启等^[37] 的研究结果, 分别为: $T_{rAs} = 10$, $T_{rCd} = 30$, $T_{rCu} = 5$, $T_{rPb} = 5$, $T_{rHg} = 40$, $T_{rNi} = 5$, $T_{rCo} = 5$ 和 $T_{rMn} = 1$. PERI 的分级标准^[35,39]如表 1 所示.

表 1 潜在生态风险指数分级标准

Table 1 Classification standard of the potential ecological risk index

潜在生态风险系数(ER)	潜在生态风险指数(PERI)	生态风险类别	污染等级
ER < 40	PERI < 150	低风险	I
40 ≤ ER < 80	150 ≤ PERI < 300	中风险	II
80 ≤ ER < 160	300 ≤ PERI < 600	中高风险	III
160 ≤ ER < 320	600 ≤ PERI < 1 200	高风险	IV
ER ≥ 320	PERI ≥ 1 200	非常高风险	V

1.3.2 土壤 VOCs 污染

(1)Nemera 综合污染指数法(P_N)能够量化污染风险并获得潜在污染区域^[40]. 计算公式为^[40,41]:

$$P_N = \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\max}\right]^2 + \left[\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}\right]^2}}{2} \quad (4)$$

式中, P_N 为每个样本对应的内梅罗综合污染指数; C_i 为元素 i 在每个采样点的测量值; S_i 为元素 i 在每个采样点的评价标准; max 为所有 C_i/S_i 的最大值; ave 为所有 C_i/S_i 的平均值. Nemera 评价等级^[41]为: $P_N \leq 0.7$ (未受到污染)、 $0.7 < P_N \leq 1$ (预警戒限)、 $1 < P_N \leq 2$ (轻度污染)、 $2 < P_N \leq 3$ (中度污染) 和 $P_N > 3$ (重度污染)。

(2)环境影响度(ambient severity, AS)可评估有机污染物的环境危害及潜在风险^[42,43]. 计算公式为:

$$AS_i = C_i / C_i^A \quad (5)$$

$$TAS = \sum AS_i \quad (6)$$

式中, AS_i 为元素 i 的环境影响度; C_i 为元素 i 的实测含量; C_i^A 为元素 i 的评价标准; TAS 为总环境影响度. AS 法的评价标准^[44]为: $AS \leq 1.0$ 且 $TAS < 1.0$ (低潜在风险); $AS \leq 1.0$ 且 $TAS > 1.0$ (污染物

为低潜在风险,但污染物所在区域有潜在危害); $AS > 1.0$ 且 $TAS > 1.0$ (污染物及其所在区域均存在潜在危害)。

1.4 PMF 源解析

正定矩阵分解(positive matrix factorization, PMF)模型由 Paatero 等开发^[44]. PMF 模型可以将指定样本数据分解为两个矩阵,即因子贡献(g)和因子分解(f),其质量平衡方程为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (7)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的含量; g_{ik} 为第 k 个源对第 i 个样本的贡献; f_{kj} 为第 k 个源中的第 j 个物种分数; e_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的剩余矩阵信息; p 为独立源总数. 通过 PMF 模型将目标函数 Q 最小化后可得到因子贡献和分解.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right] \quad (8)$$

式中, m 为某一类污染物的数量; n 为土壤样本的数量; u_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的不确定度.

不确定性数据可根据美国环保署 PMF 5.0 用户指南来计算.

$$u_{ij} = \sqrt{(\sigma \times X_{ij})^2 + (0.5 \times MDL)^2} \quad (X_{ij} > MDL) \quad (9)$$

$$u_{ij} = \frac{5}{6} \times MDL \quad (X_{ij} \leq MDL) \quad (10)$$

式中, σ 为测量误差(取 0.1); MDL 为各物质测定方法的检测限. 样品浓度低于方法检测限的数据按照 MDL/2 代替.

PMF 模型使用随机种子和不同的因子总数(重金属:三至六个因子; VOCs:二至五个因子)运行 20 次,比较不同因子总数下 Q 值和 R^2 大小^[45],结合不确定分析,利用区间比值^[24]来表示不确定结果,以确定最佳因子数. 其中,区间比值 = 指定变量的误差区间长度/区间中间点值,指定变量的误差区间长度 = 95 百分位值 - 5 百分位值. 根据 Q_{robust} 和 Q_{true} 运行情况^[46],重金属选择 Run 9 分析,VOCs 选择 Run 20 分析. 重金属 PMF 源解析中,Cd 的信噪比为 1.3,设置为“weak”,其他污染因子的信噪比均大于等于 2,设置为“strong”. VOCs 的源解析中,根据 R^2 大小将苯乙烯设置为“bad”,其他污染因子设置为“strong”,A10 处数据远大于其他点位,所以分析时排除 A10 处数据.

1.5 数据分析

研究区域土壤中污染物含量的统计分析及污染评价使用 IBM SPSS Statistics 25.0、Excel 365 和 Origin 2021 软件. 在 ArcGIS 10.4 中使用普通克里金插值法绘制 8 种重金属和 8 种 VOCs 的空间分布图. 源解析首先采用 IBM SPSS Statistics 25.0 的主成

分分析初步确定特征因子数,再运行 EPA PMF 5.0 软件进行不确定性分析,以得到相对准确的源解析结果. 特别说明,由于研究区域场地周边土壤中 VOCs 检测结果低于检出限,所以在数据分析中未对场地周边土壤中 VOCs 进行分析.

2 结果与讨论

2.1 土壤污染状态

研究区域土壤中污染物评价选择重庆地区土壤背景值^[47,48]、《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)^[49]中的“第一类建设用地”筛选值以及《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[50]中 $6.5 < \text{pH} < 7.5$ 的筛选值作为评价标准.

2.1.1 土壤污染物的含量分析

研究区表层土壤重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Co})$ 和 $\omega(\text{Mn})$ 均值分别为 5.75、0.19、24.71、29.00、0.18、30.09、14.95 和 670.57 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2). 其中,有 21%、12%、65%、85%、100%、18%、21% 和 97% 点位的金属 As、Cd、Cu、Pb、Hg、Ni、Co 和 Mn 含量超出重庆地区土壤背景值^[47,48],6% 采样点中金属 Co 含量超过“第一类建设用地”土壤污染风险筛选值. 土壤中 $\omega(\text{二氯甲烷})$ 、 $\omega(\text{氯仿})$ 、 $\omega(\text{四氯乙烯})$ 、 $\omega(\text{甲苯})$ 、 $\omega(\text{乙苯})$ 、 $\omega(\text{间/对-二甲苯})$ 、

表 2 研究区域土壤重金属及 pH 值分析¹⁾

Table 2 Analysis of heavy metals and pH in soil in the study area

项目	As	Cd	Cu	Pb	Hg	Ni	Co	Mn	pH
最小值	0.76	0.02	13.70	14.00	0.04	15.00	8.45	382.00	4.27
最大值	17.00	3.46	42.90	45.75	1.10	44.00	48.20	1 540.00	8.60
平均值	5.75	0.19	24.71	29.00	0.18	30.09	14.95	670.57	6.79
标准偏差	2.82	0.58	7.07	6.42	0.23	6.72	6.23	200.60	1.46
偏度	2.33	5.76	0.74	0.03	2.57	-0.10	4.84	2.39	-0.59
峰度	7.76	33.40	0.68	1.30	7.49	-0.47	26.29	10.01	-1.17
变异系数	0.49	3.13	0.29	0.22	1.23	0.22	0.42	0.30	0.22
重庆地区土壤背景值	6.76	0.141	21.96	22.2	0.037	35.59	15.25	454.4	— ²⁾
筛选值 1 ³⁾	20	20	2 000	400	8	150	20	—	—
筛选值 2 ⁴⁾	30	0.3	100	120	2.4	100	—	—	—

1) 除 pH 及变异系数以外,其他项目单位均为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2) “—”表示数据缺失; 3) 筛选值 1 表示建设用地第一类用地污染因子的筛选值; 4) 筛选值 2 表示农田土壤中污染因子的筛选值

表 3 研究区域土壤中 VOCs 分析¹⁾

Table 3 Analysis of VOCs in soil in the study area

项目	二氯甲烷	氯仿	四氯乙烯	甲苯	乙苯	间/对-二甲苯	邻-二甲苯	苯乙烯
最小值	0.75	0.55	0.70	0.65	0.60	0.60	0.50	0.55
最大值	2.80	55.00	2.20	46.20	80.80	446.00	321.00	50.00
平均值	1.01	4.29	0.83	1.99	2.96	13.70	10.04	2.00
标准偏差	0.62	10.59	0.34	7.81	13.75	76.39	54.95	8.48
偏度	2.25	3.80	2.90	5.83	5.83	5.83	5.83	5.83
峰度	3.62	16.34	8.67	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00
变异系数	0.62	2.47	0.40	3.93	4.65	5.58	5.48	4.23
筛选值 1 ²⁾	94×10^3	0.3×10^3	11×10^3	$1 200 \times 10^3$	7.2×10^3	163×10^3	222×10^3	$1 290 \times 10^3$

1) 除变异系数外,其他项目单位均为 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2) 筛选值 1 表示建设用地第一类用地污染因子的筛选值

ω (邻-二甲苯)和 ω (苯乙烯)的均值分别为 1.01、4.29、0.83、1.99、2.96、13.70、10.04 和 2.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 3),所有 VOCs 均未超过“第一类建设用地”土壤污染风险筛选值。

变异系数(coefficient of variation, CV)是标准偏差和平均值的比值,其能够反映样本数据的离散程度,如果 $CV < 0.1$,则为弱变异性; CV 在 0.1 ~ 1.0 之间,为中等变异性; $CV > 1.0$,为强变异性^[51]。Cd、Hg、氯仿、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯和苯乙烯属于强变异,As、Cu、Pb、Ni、Co、Mn、二氯甲烷和四氯乙烯属于中等变异。研究区域中 8 种重金属和 8 种 VOCs 在土壤中存在一定空间变异性^[52],可能存在点源污染,石化企业生产活动可能造成了土壤中污染物的累积和污染。其中, A10 采样点处 ω (Cd)为 3.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($\text{pH} = 7.77$),超过了农用地土壤污染风险筛选值(0.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{pH} > 7.5$),结合采样点位置分布特征,推测该点受人为活动的影响较大。

2.1.2 土壤污染物的污染评价

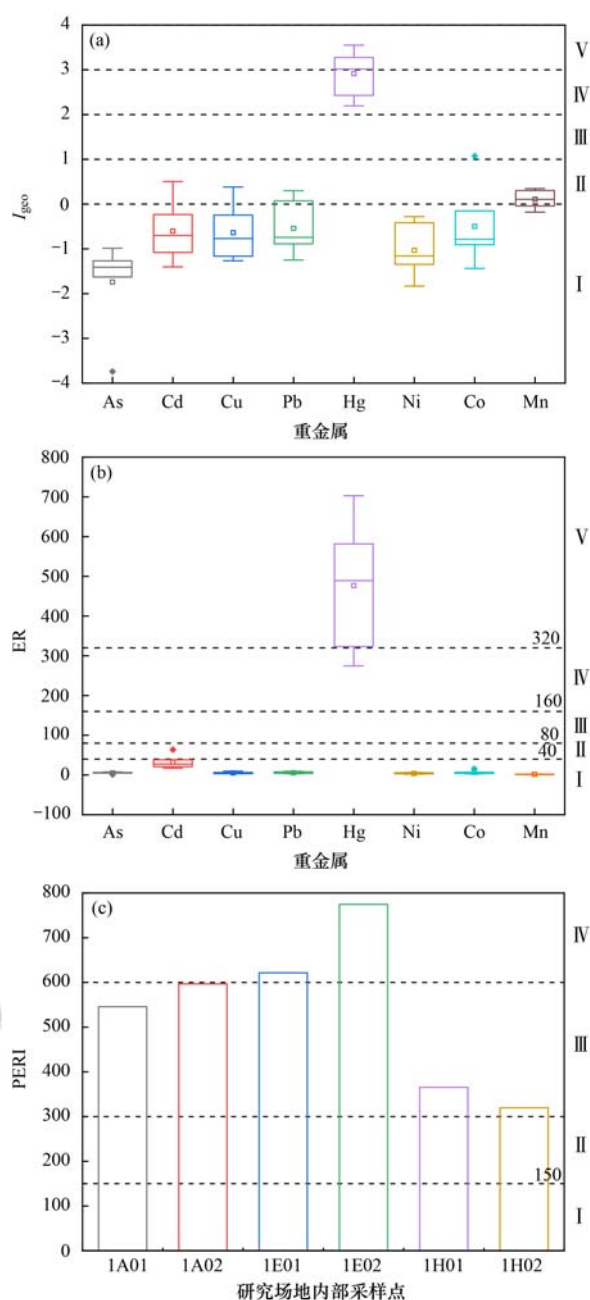
(1)场地土壤重金属 图 2(a)表明所有土壤中 As 和 Ni 均未受到污染;个别点位中的金属 Cd、Cu、Pb 和 Co 属于轻度污染; Mn 属于轻度污染; Hg 属于中度污染,少部分点位受到中强度污染。图 2(b)表明 As、Cd、Cu、Pb、Ni、Co 和 Mn 属于低风险, Hg 属于非常高风险。图 2(c)表明污水处理站(1A01 和 1A02)和供热中心(1H01 和 1H02)属于中高风险区域,生产区(1E01 和 1E02)属于高风险区域。

(2)场地土壤 VOCs 图 3(a)和 3(b)表明:二氯甲烷、氯仿、四氯乙烯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯和苯乙烯的 $P_N < 0.7$ 和 $AS < 1.0$,属于低潜在风险。图 3(c)表明污水处理站(1A01 和 1A02)、生产区(1E01 和 1E02)和供热中心(1H01 和 1H02)的总环境影响度 $TAS < 1.0$,属于低潜在风险区域。

(3)场地周边土壤重金属 图 4(a)表明所有土壤采样点中 As、Cd、Cu、Pb、Ni 和 Co 均未受到污染;金属 Hg 和 Mn 属于轻度污染。图 4(b)表明 As、Cd、Cu、Pb、Ni、Co 和 Mn 属于低风险, Hg 属于中风险。图 4(c)表明 A9、A11、D1、D3、E1、F2 和 F3 属于中风险区域; E3 属于中高风险区域; A10 的 $PERI > 1200$,属于非常高风险区域。

2.2 土壤污染物源识别

研究区域包含研究场地及其周边 3 km 范围,研究场地生产内容从建厂至今保持不变。根据石化企业生产现状,存在潜在污染的重点区域包括:①有组

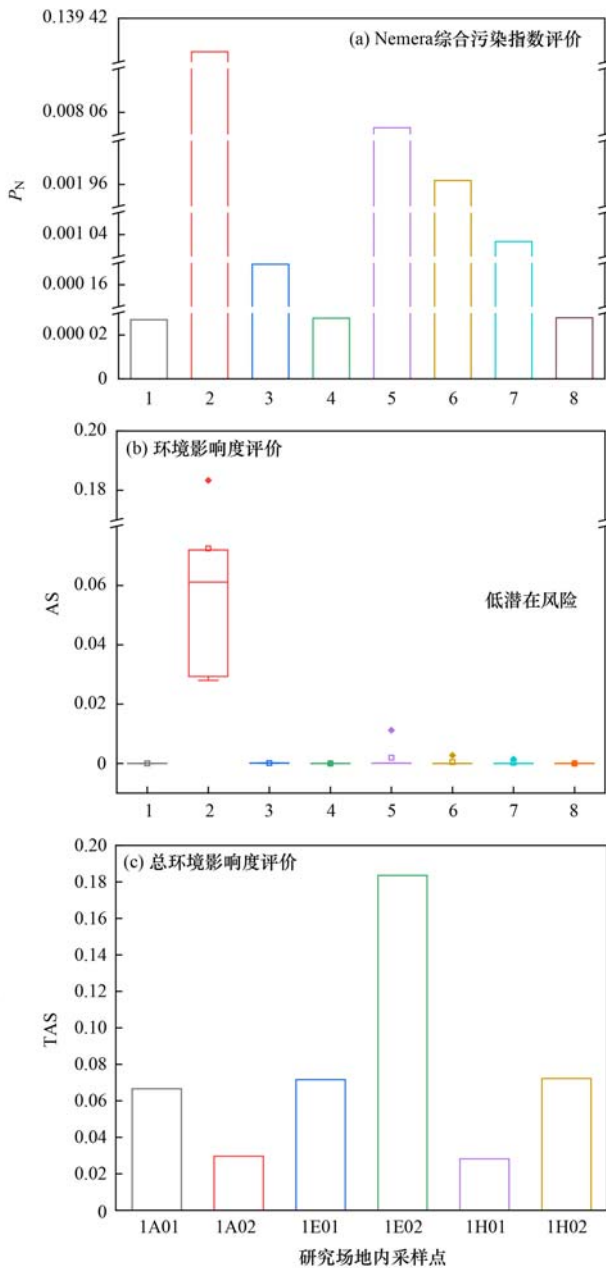


(a) 地累积指数评价: $I_{\text{geo}} = 0$ 为未受到污染边界, $I_{\text{geo}} = 1$ 为轻度污染边界, $I_{\text{geo}} = 2$ 为轻中度污染边界, $I_{\text{geo}} = 3$ 为中度污染边界, $I_{\text{geo}} = 4$ 为中强度污染边界; (b) 金属潜在生态风险系数分布: $ER = 40$ 为低风险边界, $ER = 80$ 为中风险边界, $ER = 160$ 为中高风险边界, $ER = 320$ 为高风险边界; (c) 潜在生态风险指数评价: $PERI = 150$ 为低风险边界, $PERI = 300$ 为中风险边界, $PERI = 600$ 为中高风险边界

图 2 场地土壤重金属污染评价

Fig. 2 Evaluation of heavy metal pollution in soil inside the site

织废气排放的主装置区(生产区); ②废水运输管道和污水处理过程的循环冷却水站、除盐水和污水处理站; ③燃煤锅炉运行及有组织废气排放的供热中心区。采用普通克里金插值法^[53]对研究区域土壤中重金属及 VOCs 污染源的空间分布进行预测。结果表明,土壤中 As、Cu、Pb 和 Ni 的空间分布相似,



1. 二氯甲烷, 2. 氯仿, 3. 四氯乙烯, 4. 甲苯, 5. 乙苯, 6. 间/对-二甲苯, 7. 邻-二甲苯, 8. 苯乙烯

图3 场地土壤中 VOCs 污染评价

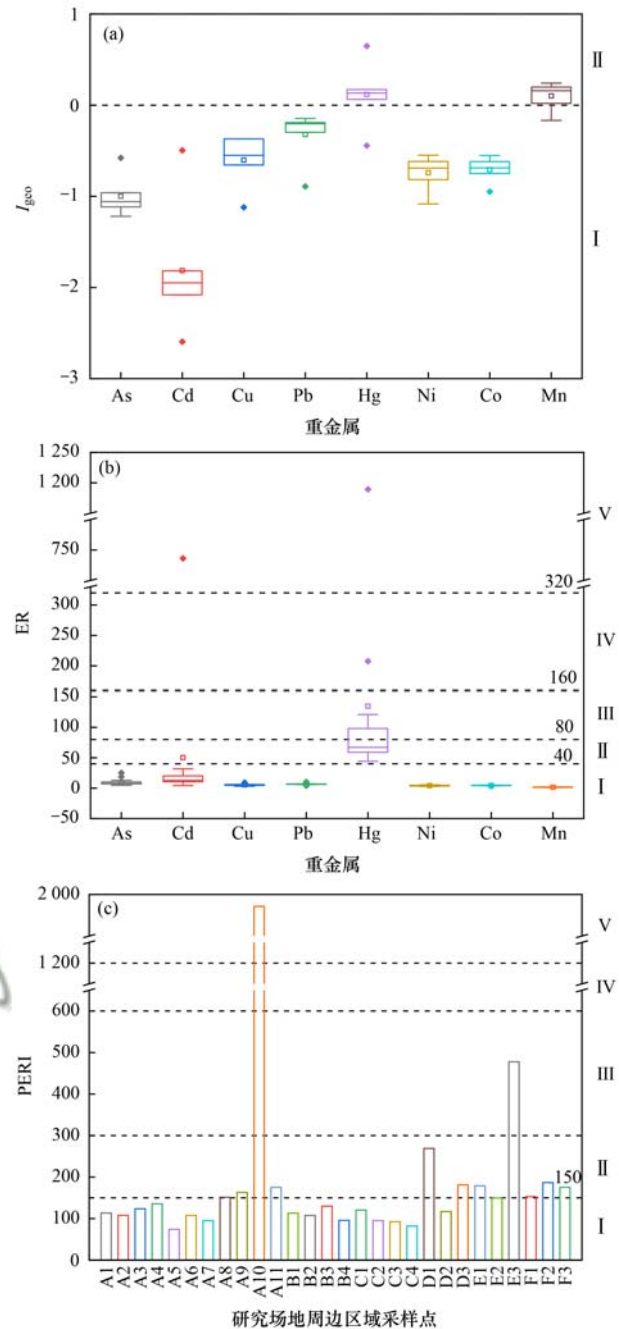
Fig. 3 Evaluation of VOCs pollution in soil inside the site

含量分布为石化场地中心区低, 边缘高; Cd、Co 和 Mn 的空间分布相似, 石化场地处于高值区, 东部区域含量高, 西南区域含量低; 研究区北部金属 Hg 含量高, 西南区含量低, 研究场地位于中等含量区. VOCs 的空间分布类似, 含量从东北区向西南区不断降低, 石化场地位于高值区. 图 5 列举了研究区域污染较严重的 4 种金属及 4 种 VOCs 污染源的分布.

2.3 土壤污染物的来源解析

2.3.1 主成分分析

根据土壤污染物的 KMO-Bartlett 球形检验结



(a) 地累积指数评价: $I_{geo} = 0$ 为未受到污染边界, $I_{geo} = 1$ 为轻度污染边界; (b) 金属潜在生态风险系数分布: $ER = 40$ 为低风险边界, $ER = 80$ 为中风险边界, $ER = 160$ 为中高风险边界, $ER = 320$ 为高风险边界; (c) 潜在生态风险指数评价: $PERI = 150$ 为低风险边界, $PERI = 300$ 为中风险边界, $PERI = 600$ 为中高风险边界, $PERI = 1200$ 为高风险边界

图4 场地周边土壤重金属污染评价

Fig. 4 Evaluation of heavy metal pollution in soil around the site

果: ①重金属 (KMO 为 0.674, $P < 0.001$); ②VOCs (KMO 为 0.647, $P < 0.001$), 可以发现重金属和 VOCs 初始数据之间可能存在统计学上的显著相关性, 适合因子分析, 采用 varimax 旋转法来减少各因子原始变量的重叠. 图 6(a) 是旋转后各指标变量对重金属的载荷, 经主成分分析提取 3 个特征值 > 1

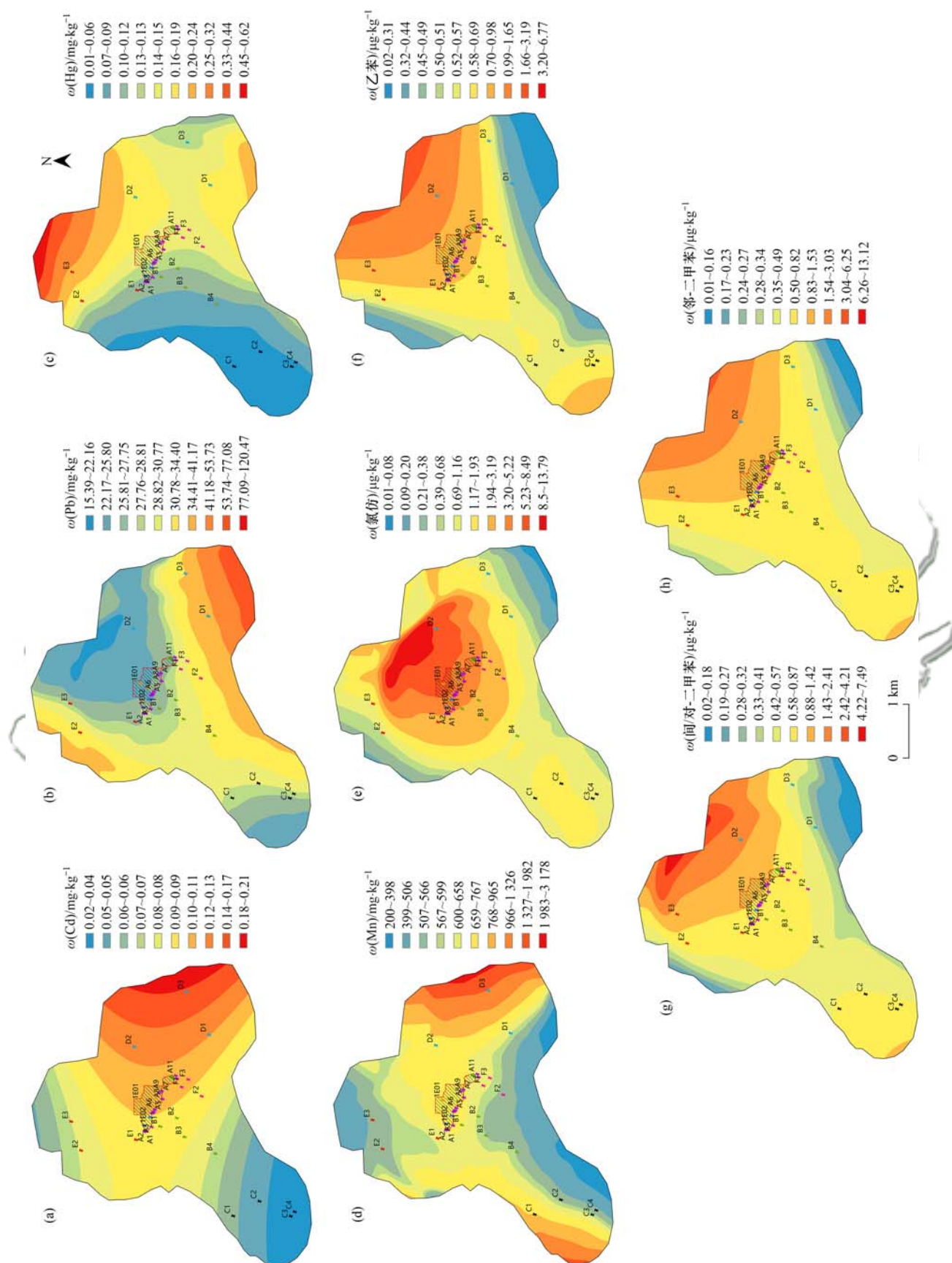


图5 研究区域土壤中污染物的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of pollutants in soil in the study area

的公因子,可解释总方差的 86.268%。图 6(b)是旋转后各指标变量对 VOCs 的载荷,经主成分分析提

取 2 个特征值 > 1 的公因子,可解释总方差的 88.145%。

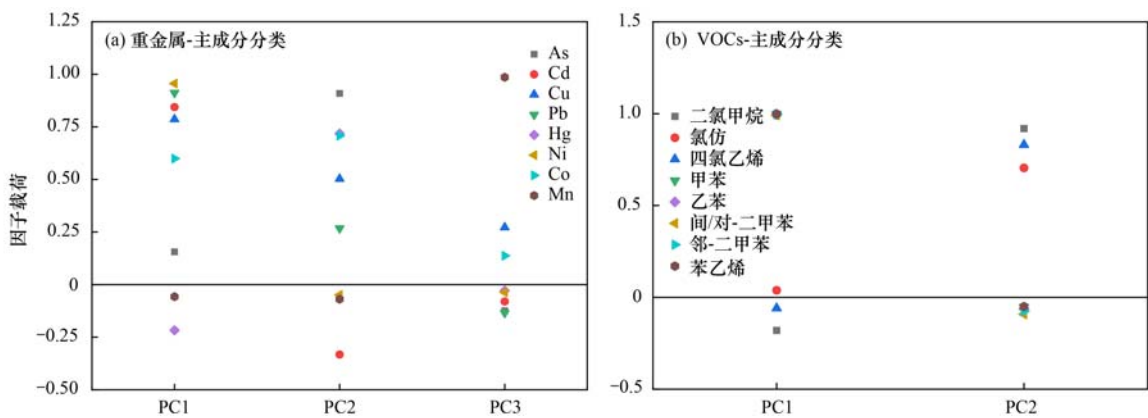


图6 旋转因子载荷矩阵
Fig. 6 Rotation factor loading matrix

2.3.2 PMF 源解析

源解析中,二因子、三因子和四因子等表示源解析得到的因子总数,对应不同源解析情景;因子1、因子2和因子3等描述表示某个源解析情景下第*x*个因子(*x*=1,2,3等),其对应不同源类型.

2.3.2.1 重金属

基于重金属-主成分分析初步确定的特征因子

个数,进行不确定分析.图7中,四因子情景下Cd和Pb的BS区间比值较高,为1.54和1.17,表明此情景下,因子1(Cd、Pb)可能未被充分分解,其可能代表混合源.由表4可知,DISP% d*Q* < 0.1%,DISP误差分析结果能够被认可^[54].从三因子到四因子,*Q*_{robust}/*Q*_{expected}从3.80下降到3.45,降幅最大,因此可认为四因子情景是最佳的重金属PMF源解析方

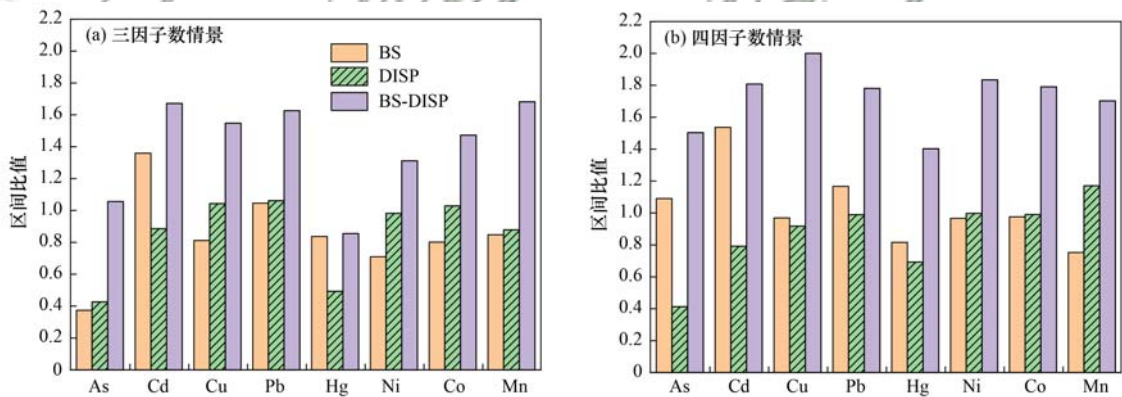


图7 重金属在不同因子数情景下3种误差估计方法的标识性元素区间比值
Fig. 7 Interval ratios of identifying species of three error estimate methods for heavy metals under three to four factors

表4 重金属误差估计诊断总结

Table 4 Summary of heavy metal error estimate diagnostics

诊断	三因子情景	四因子情景	五因子情景	六因子情景
<i>Q</i> _{expected}	140	91	42	-7
<i>Q</i> _{tune}	594.05	323.89	190.61	99.52
<i>Q</i> _{robust}	532.48	313.99	178.94	86.82
<i>Q</i> _{robust} / <i>Q</i> _{expected}	3.80	3.45	4.26	-12.40
DISP% d <i>Q</i> ¹⁾ /%	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
DISP% swaps ²⁾ /%	0	6	54	70
BS 因子匹配率/%	100	100	100	Factor 6:99
BS-DISP% swaps ³⁾ /%	As: 42; Cu: 21; Pb: 22; Hg: 30; Ni: 17; Co: 11; Mn: 15; 总: 50	Cu: 73; Pb: 84; Hg: 89; Ni: 81; Co: 83; Mn: 71	— ⁴⁾	—
各情景下重金属来源	因子1(As); 因子2(Cd; Cu; Pb; Ni; Co; Mn); 因子3(Hg)	因子1(Cd, Cu, Pb, Ni, Co); 因子2(Mn); 因子3(Hg); 因子4(As)	—	—

1) DISP% d*Q* 表示在替换法误差分析中*Q*下降的百分比; 2) DISP% swaps 表示在替换法误差分析中发生因子交换的百分比; 3) BS-DISP% swaps 表示在拔靴-替换法误差分析中发生因子交换的百分比; 4) “—”表示数据缺失,下同

案^[24]. 四因子情景下 BS 因子匹配率为 100%, 6% 的 DISP 运行阶段发生因子交换. 四因子情景下, 各因子对 8 种重金属的贡献率如图 8 所示. 土壤中 8 种重金属的实测值和预测值拟合结果为: $R_{As}^2 = 0.9938$, $R_{Cd}^2 = 0.2754$, $R_{Cu}^2 = 0.8039$, $R_{Pb}^2 = 0.5941$, $R_{Hg}^2 = 0.9953$, $R_{Ni}^2 = 0.7005$, $R_{Co}^2 = 0.6649$ 和 $R_{Mn}^2 = 0.9985$.

因子 1 对 Cd、Ni、Cu、Co、Pb 和 Hg 的贡献率分别为 62.50%、54.53%、54.12%、51.26%、49.34% 和 31.80%. 有 65%、85%、100% 和 97% 点位中的金属 Cu、Pb、Hg 和 Mn 超出重庆地区土壤背景值^[47,48], 表明这 4 种金属受人为活动影响较大. 表 2 中 $CV_{Cd} = 3.13$ 和 $CV_{Hg} = 1.23$, 高变异系数同样反映 Cd 和 Hg 受人类活动的影响较大; 图 5 表明 Cd 在 A10 场地边界农田土壤采样点处含量最高. 由于四水合醋酸钴作为催化剂在石化企业生产过程中大量使用, Co 会随生产废水经管道运输排放处理, 所以推测 Co 可能来源于企业生产废水排放. 有研究发现 Cd 可能来源于农田施肥和工业废水排放, Cu 可能通过施用肥料、农药在农田中积累^[52], Ni 可能来源于工业废水排放^[55]. 因此, 可以认为因子 1 是工业排放源和农业活动源构成的混合源.

因子 2 对 Mn 的贡献率最大, 为 47.61%. 研究区域土壤中金属 Mn 为轻度污染 (图 2 和图 4), 石化场地、边界以及东部区域含量较高 (图 5). 由于四水合醋酸锰作为催化剂在石化企业生产过程中大

量使用, 推测场地 Mn 可能来源于场地生产活动以及废水排放. 而所有采样点处金属 Mn 均超过重庆地区土壤背景值^[47,48], 可以推测该研究区域内表层土壤中 Mn 的本底值较高. 因此, 可以认为因子 2 是场地原料生产活动排放源和自然源构成的混合源.

因子 3 对 Hg 的贡献率最大, 为 62.79%, 其次为 21.57% As、19.43% Mn 和 18.42% Cd. 研究区域中 Hg 属于中度污染, 并且石化场地的供热中心区有燃煤锅炉的运行及煤炭燃烧后烟囱的废气排放过程. 有研究表明 Hg 与煤炭燃烧、废气排放有关^[54,56-58], 同时 As 和 Ni 也被认为是燃料燃烧的示踪剂^[59,60]. 因此, 可以认为因子 3 是燃煤工业活动排放源.

因子 4 对 As、Pb、Cu、Ni、Co、Mn 和 Cd 的贡献率分别为 78.01%、46%、39.94%、38.15%、36.49%、26.12% 和 14.29%. 结合图 5 重金属的空间分布可知, As、Pb、Cu 和 Ni 在场地含量低, 且 As、Ni 和 Co 仅有少部分点位超过重庆地区土壤背景值^[47,48]. 有研究发现土壤母质是 As、Ni 和 Cu 的主要来源^[54,58,61]. 因此, 可以认为因子 4 是成土母质源.

图 8 表明, PMF 源解析将土壤中 8 种重金属主要归为 4 类来源, 分别是工业排放源和农业活动源构成的混合源 (43%)、场地原料生产活动排放源和自然源构成的混合源 (10%)、燃煤工业活动排放源 (19%) 和成土母质源 (28%). 土

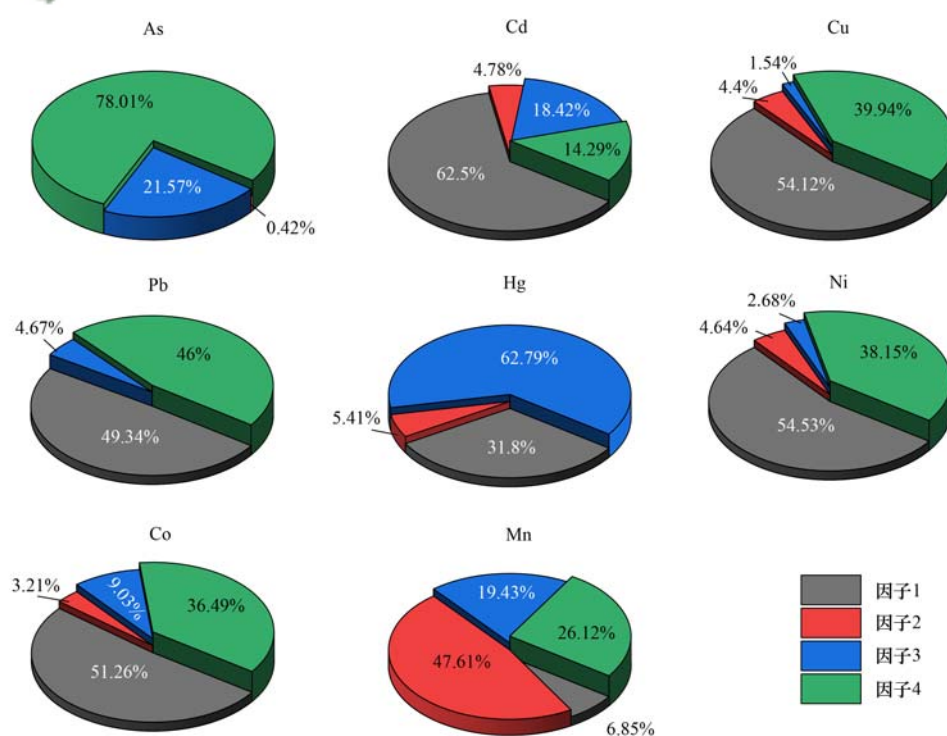


图 8 各因子对重金属浓度的贡献率

Fig. 8 Contribution rate of each factor to heavy metal concentration distribution

壤中重金属的来源组成多样,但是人为活动仍为主要影响因素. 由于重金属的迁移能力较弱、易累积,所以需要场地内可能造成重金属污染的各环节进行严格监管.

2.3.2.2 VOCs

基于 VOCs-主成分分析初步确定的特征因子个数,进行不确定分析及比较. 图 9 中,四因子情景下,间/对-二甲苯和邻-二甲苯的 DISP 区间均超过 2.00,分别达到 2.10 和 2.30,表明此情景下因子分

解产生的不确定性很大,则可以排除四因子结果. 二因子和三因子情景下,甲苯和乙苯的 BS 区间比值非常大,但其 DISP 和 BS-DISP 区间比值又比较低,表明这两个情境下因子 2(甲苯和乙苯)可能未充分分解,因子 2 可能代表混合源. 由表 5 可知,DISP% $dQ < 0.1\%$, DISP 误差分析结果能够被认可^[54]. 从二因子到三因子时, $Q_{\text{robust}}/Q_{\text{expected}}$ 从 0.81 下降到 0.39,降幅最大,因此可认为三因子情景是最佳的 VOCs 源解析方案^[24]. 三因子情景下 BS 因子匹配率为 100%, DISP 运行阶段未发生因子交换. 三因子情景对 8 种 VOCs 的贡献率如图 10 所示. 土壤中 7 种 VOCs 的实测值和预测值拟合结果为: $R^2_{\text{二氯甲烷}} = 0.9835$ 、 $R^2_{\text{氯仿}} = 0.9998$ 、 $R^2_{\text{四氯乙烯}} = 0.8159$ 、 $R^2_{\text{甲苯}} = 0.9914$ 、 $R^2_{\text{乙苯}} = 0.9978$ 、 $R^2_{\text{间/对-二甲苯}} = 0.9960$ 和 $R^2_{\text{邻-二甲苯}} = 0.9999$.

因子 1 对二氯甲烷和四氯乙烯的贡献率最大,分别为 86.49% 和 90.14%. 这两种污染物的含量高值区主要集中在石化场地中,但是二氯甲烷和四氯乙烯并非来源于场地各生产过程,其在土壤中含量仅为筛选值的十万分之一(表 3). 所以推测这两种挥发性有机污染物主要来源于石化场地中其他人为活动.

因子 2 对间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯和甲苯的贡献率最大,分别为 98.88%、96.28%、84.62% 和 76.46%. 研究区域属于低潜在风险区(图 3),并且这 4 种污染物的含量高值区主要集中在石化场地(图 5). 从而认为这 4 种污染物主要来源于石化企业生产过程,特别是原料生产区废气的排放、原料输送管道和储存罐区的跑冒滴漏等过程. 因此,因子 2 可以认为是石化场地污染泄漏源.

因子 3 对氯仿的贡献率最大,为 80.24%. 由于该石化场地生产过程中并未使用氯仿,且氯仿在研究区域中分布比较均匀(图 5). 有研究证明氯仿可通过天然有机物质的氯化作用在土壤和泥炭地等环境中自然形成并长期存在^[62~64]. 因此,可以认为因子 3 是自然源.

图 10 表明,PMF 源解析将土壤中 7 种重金属主要归为 3 类来源,分别是石化场地其他人为活动源(34%)、石化场地污染泄漏源(52%)和自然源(14%). 由于 VOCs 可以通过吸附、挥发、淋溶和降解等过程向土壤各组分转移分配,也可以从土壤向大气和水转移,所以土壤中 VOCs 的含量处于较低水平. 就该石化场地而言,仍需加强对生产区 VOCs 尾气排放的监控以及管道气密性的检修.

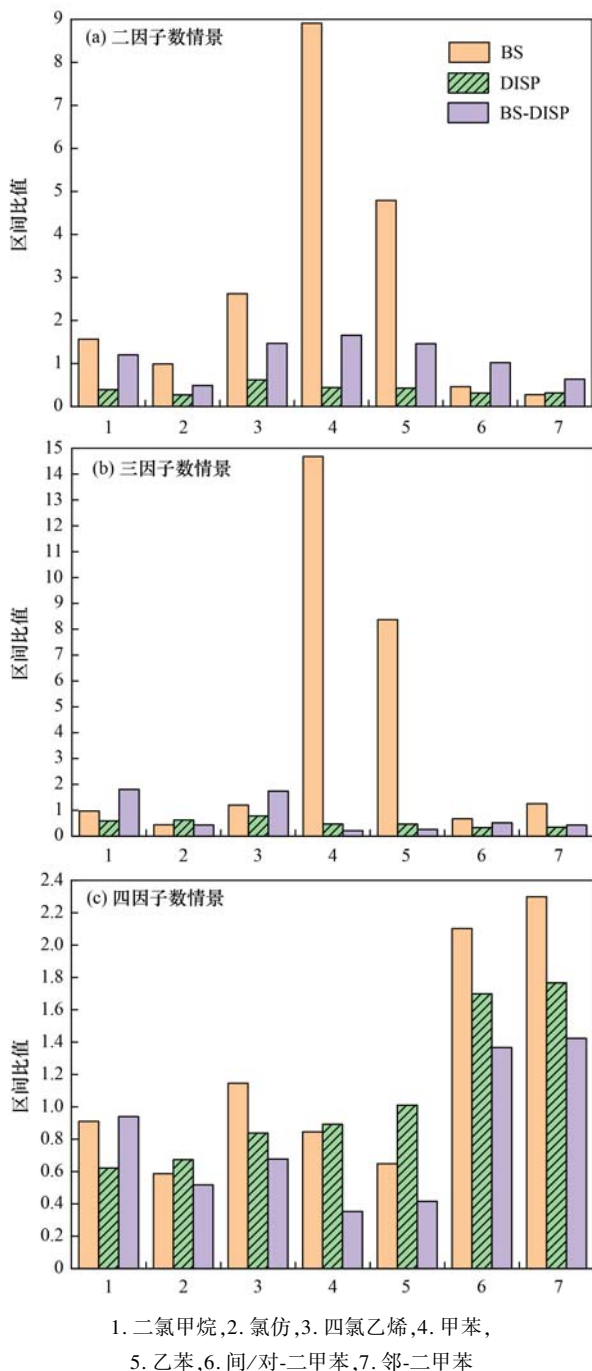


图 9 VOCs 在不同因子数情景下 3 种误差估计方法的
标志性元素区间比值

Fig. 9 Interval ratios of identifying species of three error estimate
methods for VOCs under two to four factors

表 5 VOCs 误差估计诊断总结

Table 5 Summary of VOCs error estimate diagnostics

诊断	二因子情景	三因子情景	四因子情景	五因子情景
Q_{expected}	196	147	98	49
Q_{ture}	170.29	57.00	16.46	1.73
Q_{robust}	157.96	57.00	16.46	1.73
$Q_{\text{robust}}/Q_{\text{expected}}$	0.81	0.39	0.17	0.04
DISP% dQ/%	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
DISP% swaps/%	0	0	0	0
BS 因子匹配率/%	100	100	Factor 4;80	Factor 1;94
BS-DISP% swaps/%	二氯甲烷 19; 氯仿 22; 四氯乙烯 14; 乙苯 30; 总 19	二氯甲烷 46; 氯仿 47; 四氯乙烯 40; 甲苯 21; 乙苯 25; 间/对二甲苯 30; 邻二甲苯 33; 总 50	二氯甲烷 32; 氯仿 34; 四氯乙烯 26; 甲苯 23; 乙苯 26; 间/对二甲苯 29; 邻二甲苯 25; 总 40	—
各情景下 VOCs 来源	因子 1(二氯甲烷、氯仿、四氯乙烯); 因子 2(甲苯、乙苯、间/对二甲苯、邻二甲苯)	因子 1(二氯甲烷、四氯乙烯); 因子 2(甲苯、乙苯、间/对二甲苯、邻二甲苯); 因子 3(氯仿)	因子 1(甲苯、乙苯); 因子 2(氯仿); 因子 3(二氯甲烷、四氯乙烯); 因子 4(间/对二甲苯、邻二甲苯)	—

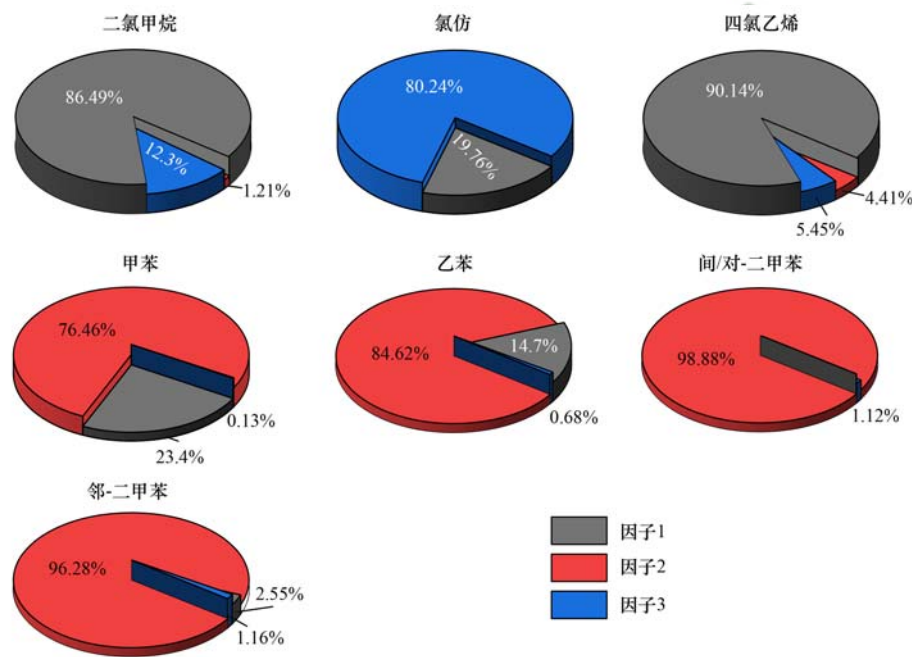


图 10 各因子对不同 VOCs 浓度的贡献率

Fig. 10 Contribution rate of each factor to VOCs concentration distribution

3 结论

(1)石化企业场地及其周边土壤采样点中 Mn 属于轻度污染,Hg 属于中度污染、潜在污染风险非常高,其他采样点中重金属及 8 种 VOCs 均未受到污染,潜在风险低. 研究场地中废水处理站、生产区和供热中心属于中高风险区和高风险区.

(2)石化企业场地土壤中 Hg、Mn、氯仿、乙苯、间/对二甲苯和邻二甲苯等污染物的污染程度较场地周边土壤更为严重,场地生产活动会对场地土壤造成污染.

(3)场地土壤中 8 种重金属主要归为 4 类来

源;62.50% Cd、54.53% Ni、54.12% Cu、51.26% Co、49.34% Pb 和 31.80% Hg 来自于工业和农业活动混合源;47.61% Mn 来自于场地原料生产活动排放和自然源;62.79% Hg、21.57% As、19.43% Mn 和 18.42% Cd 来自于燃煤工业活动排放源;78.01% As、46% Pb、39.94% Cu、38.15% Ni、36.49% Co、26.12% Mn 和 14.29% Cd 来自于成土母质源.

(4)场地土壤中 7 种 VOCs 主要归为 3 类来源:86.49% 二氯甲烷和 90.14% 四氯乙烯来自于石化场地其他人为活动源;98.88% 间/对二甲苯、96.28% 邻二甲苯、84.62% 乙苯和 76.46% 甲苯来自于石化场地污染泄漏源;80.24% 氯仿来自于

自然源。

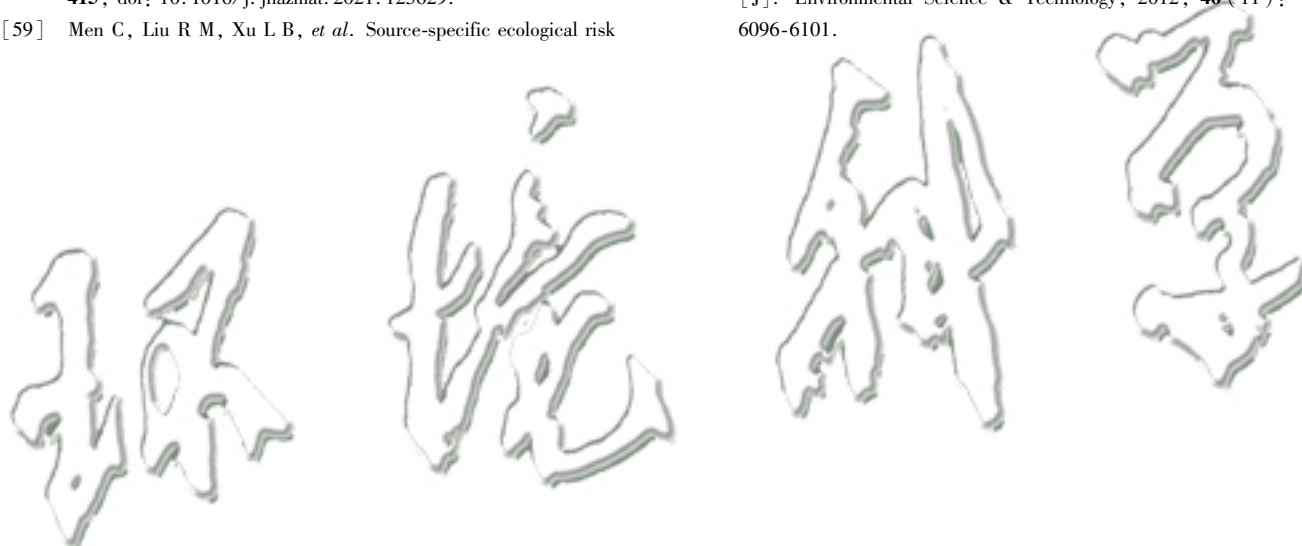
(5)通过源解析,发现场地土壤污染是人为和自然因素的共同作用造成的,包括:石化场地的废水处理过程、原料生产废气排放和燃煤供热以及场地的工业生产和农业活动。

参考文献:

- [1] 谭海涛,刘涛,曹兴涛,等.石化场地土壤与地下水污染防控研究进展[J].应用化工,2020,49(8):2112-2115,2121. Tan H T, Liu T, Cao X T, *et al.* Research progress of soil and groundwater environment conservation for petrochemical site[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(8): 2112-2115, 2121.
- [2] 叶翔宇,陈雪霞,于波,等.长江经济带某石化场地土壤中污染物分布与微生物特征[J].地学前缘,2022,29(3):239-247. Ye X Y, Chen X X, Yu B, *et al.* Pollutant distribution and microbial characteristics at a petrochemical site in the Yangtze River Economic Belt[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(3): 239-247.
- [3] Liu Q L, Xia C Q, Wang L, *et al.* Fingerprint analysis reveals sources of petroleum hydrocarbons in soils of different geographical oilfields of China and its ecological assessment[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1), doi: 10.1038/s41598-022-08906-6.
- [4] Dantas G, Gorne I, Da Silva C M, *et al.* Benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX) concentrations in urban areas impacted by chemical and petrochemical industrial emissions[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2022, 108(2): 204-211.
- [5] Zheng H, Kong S F, Yan Y Y, *et al.* Compositions, sources and health risks of ambient volatile organic compounds (VOCs) at a petrochemical industrial park along the Yangtze River[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135505.
- [6] Jia H H, Gao S, Duan Y S, *et al.* Investigation of health risk assessment and odor pollution of volatile organic compounds from industrial activities in the Yangtze River Delta region, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111474.
- [7] 张雪驰,沙青娥,陆梦华,等.珠三角某石化园区VOCs排放特征及影响评价[J].环境科学,2022,43(4):1766-1776. Zhang X C, Sha Q E, Lu M H, *et al.* Volatile organic compound emission characteristics and influences assessment of a petrochemical industrial park in the Pearl River Delta region[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 1766-1776.
- [8] Benlaribi R, Djebbar S. Concentrations, distributions, sources, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoils around a petrochemical industrial area in Algiers (Algeria)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(23): 29512-29529.
- [9] Premnath N, Mohanrasu K, Guru Raj Rao R, *et al.* A crucial review on polycyclic aromatic hydrocarbons-environmental occurrence and strategies for microbial degradation[J]. Chemosphere, 2021, 280, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130608.
- [10] 葛祥,吴健,高松,等.典型化工集中区环境空气SVOCs污染特征及来源解析[J].环境科学,2021,42(12):5663-5672. Ge X, Wu J, Gao S, *et al.* Characteristics and source apportionment of atmospheric SVOCs around typical chemical industry zones[J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 5663-5672.
- [11] Domínguez-Morueco N, Carvalho M, Sierra J, *et al.* Multi-component determination of atmospheric semi-volatile organic compounds in soils and vegetation from Tarragona County, Catalonia, Spain[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 1138-1152.
- [12] Garcia Rea V S, Egerland Bueno B, Cerqueda-García D, *et al.* Degradation of *p*-cresol, resorcinol, and phenol in anaerobic membrane bioreactors under saline conditions[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 430, doi: 10.1016/j.cej.2021.132672.
- [13] Wang S Y, Kalkhaje Y K, Qin Z R, *et al.* Spatial distribution and assessment of the human health risks of heavy metals in a retired petrochemical industrial area, South China[J]. Environmental Research, 2020, 188, doi: 10.1016/j.envres.2020.109661.
- [14] Cao L N, Lin C L, Gao Y F, *et al.* Health risk assessment of trace elements exposure through the soil-plant (maize)-human contamination pathway near a petrochemical industry complex, Northeast China[J]. Environmental Pollution, 2020, 263, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114414.
- [15] 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.
- [16] Hopke P K, Dai Q L, Li L X, *et al.* Global review of recent source apportionments for airborne particulate matter[J]. Science of the Total Environment, 2020, 740, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140091.
- [17] Hu Y A, He K L, Sun Z H, *et al.* Quantitative source apportionment of heavy metal (loid)s in the agricultural soils of an industrializing region and associated model uncertainty[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 391, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122244.
- [18] Zhang Q F, Meng J, Su G J, *et al.* Source apportionment and risk assessment for polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at a typical coking plant[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 222, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112509.
- [19] 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.
- [20] Jolliffe I T, Cadima J. Principal component analysis: a review and recent developments[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2016, 374(2065), doi: 10.1098/rsta.2015.0202.
- [21] Li Y, Feng X M, Zhou J, *et al.* Occurrence and source apportionment of novel and legacy poly/perfluoroalkyl substances in Hai River basin in China using receptor models and isomeric fingerprints[J]. Water Research, 2020, 168, doi: 10.1016/j.watres.2019.115145.
- [22] Zhang C, Jing D J, Wu C Z, *et al.* Integrating chemical mass balance and the community Multiscale Air Quality models for source identification and apportionment of PM_{2.5}[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 665-675.
- [23] 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.
- [24] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. PMF 模型解析土壤重金属来源的不确定性[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(2): 716-725.
- Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Uncertainty analysis of soil heavy metal source apportionment by PMF model [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(2): 716-725.
- [25] Paatero P, Eberly S, Brown S G, *et al.* Methods for estimating uncertainty in factor analytic solutions [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, **7**(3): 781-797.
- [26] Pinthong N, Thepanondh S, Kondo A. Source identification of VOCs and their environmental health risk in a petrochemical industrial area[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2022, **22**(2), doi: 10.4209/aaqr.210064.
- [27] 李春华, 叶春, 高尚超, 等. 关于在长江经济带布局以水质改善为目标的流域生态缓冲体系的思考[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1206-1213.
- Li C H, Ye C, Gao S C, *et al.* Layout of watershed ecological buffer system aiming at water quality improvement in the Yangtze River Economic Belt[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(5): 1206-1213.
- [28] 重庆市统计局, 国家统计局重庆调查总队. 重庆统计年鉴-2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [29] HJ 25.2-2019, 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则[S].
- [30] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, **2**: 108-118.
- [31] Ren S Y, Song C Q, Ye S J, *et al.* The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: a meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150322.
- [32] Klein O, Zimmermann T, Hildebrandt L, *et al.* Technology-critical elements in Rhine sediments-A case study on occurrence and spatial distribution[J]. Science of the Total Environment, 2022, **852**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158464.
- [33] Zhong X, Chen Z W, Li Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123289.
- [34] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [35] Zhao H D, Wu Y, Lan X P, *et al.* Comprehensive assessment of harmful heavy metals in contaminated soil in order to score pollution level[J]. Scientific Reports, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-07602-9.
- [36] Qiao D H, Wang G S, Li X S, *et al.* Pollution, sources and environmental risk assessment of heavy metals in the surface AMD water, sediments and surface soils around unexploited Rona Cu deposit, Tibet, China[J]. Chemosphere, 2020, **248**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125988.
- [37] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [38] 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.
- [39] Qiao P W, Dong N, Yang S C, *et al.* Quantitative analysis of the main sources of pollutants in the soils around key areas based on the positive matrix factorization method [J]. Environmental Pollution, 2021, **273**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116518.
- [40] Kowalska J B, Mazurek R, Gašiorek M, *et al.* Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination-A review [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2018, **40**(6): 2395-2420.
- [41] Liu F, Liu Y, Jiang D S, *et al.* Health risk assessment of semi-volatile organic pollutants in Lhasa River China [J]. Ecotoxicology, 2014, **23**(4): 567-576.
- [42] Dong W H, Lin X Y, Du S H, *et al.* Risk assessment of organic contamination in shallow groundwater around a leaching landfill site in Kaifeng, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74**(3): 2749-2756.
- [43] Li Y, Yan B. Human health risk assessment and distribution of VOCs in a chemical site, Weinan, China[J]. Open Chemistry, 2022, **20**(1): 192-203.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Hossain Bhuiyan M A, Chandra Karmaker S, Bodrud-Doza M, *et al.* Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods[J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128339.
- [47] 重庆市环境科研监测所, 西南农学院土化系, 西南师范学院环境科研组. 重庆地区土壤中 11 种元素背景值的调查研究 [J]. 重庆环境保护, 1982, (4): 1-8.
- [48] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(4): 848-852.
- Tang J, Zhong Y P, Wang L. Background value of soil heavy metal in the three gorges reservoir district [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, **16**(4): 848-852.
- [49] 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].
- [50] 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].
- [51] 雷志栋, 杨诗秀, 许志荣, 等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, (9): 10-21.
- Lei Z D, Yang S X, Xu Z R, *et al.* Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, (9): 10-21.
- [52] Wu Q M, Hu W Y, Wang H F, *et al.* Spatial distribution, ecological risk and sources of heavy metals in soils from a typical economic development area, southeastern China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **780**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146557.
- [53] 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.
- [54] Wu J, Li J, Teng Y G, *et al.* A partition computing-based positive matrix factorization (PC-PMF) approach for the source

- apportionment of agricultural soil heavy metal contents and associated health risks [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121766.
- [55] Niu Y, Jiang X, Wang K, *et al.* Meta analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134509.
- [56] Altaf A R, Adewuyi Y G, Teng H P, *et al.* Elemental mercury (Hg^0) removal from coal syngas using magnetic tea-biochar: Experimental and theoretical insights [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **122**: 150-161.
- [57] Wan Z X, Duan L Y, Hu X D, *et al.* Removal of mercury from flue gas using coal gasification slag [J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, **231**, doi: 10.1016/j.fuproc.2022.107258.
- [58] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [59] Men C, Liu R M, Xu L B, *et al.* Source-specific ecological risk analysis and critical source identification of heavy metals in road dust in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121763.
- [60] Calvo A I, Alves C, Castro A, *et al.* Research on aerosol sources and chemical composition: past, current and emerging issues [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **120-121**: 1-28.
- [61] Adimalla N. Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(1): 59-75.
- [62] McCulloch A. Chloroform in the environment: occurrence, sources, sinks and effects[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(10): 1291-1308.
- [63] Laturnus F, Haselmann K F, Borch T, *et al.* Terrestrial natural sources of trichloromethane (chloroform, CHCl_3)-An overview [J]. *Biogeochemistry*, 2002, **60**(2): 121-139.
- [64] Hunkeler D, Laier T, Breider F, *et al.* Demonstrating a natural origin of chloroform in groundwater using stable Carbon Isotopes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(11): 6096-6101.



CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)