

目次

2013~2020年天津市PM_{2.5}-O₃污染变化趋势和影响因素分析 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)

2015~2020年济南市O₃污染趋势及敏感性变化分析 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)

南京市南部地区O₃污染特征、生成敏感性及传输影响分析 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)

天津市“十三五”期间O₃污染特征和驱动因子 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)

基于随机森林的南京市PM_{2.5}和O₃对减排的响应 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)

基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓桐, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)

污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)

2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)

滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)

重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)

衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 白凡, 周金龙, 周殿竹, 韩双宝, 孙英 (4325)

金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇斌, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)

基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)

太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)

雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)

基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)

锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)

老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)

畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)

地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)

微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)

施加Fe₃O₄/桑秸秆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)

生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制 张丽, 李如霞, 何玉玺, 姚彦坡, 林大松 (4479)

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)

椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)

改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)

改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)

污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)

化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明 (4565)

黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)

微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (4585)

高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)

土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)

中国省域碳达峰路径与政策 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 郭娜, 封强, 傅泽强 (4637)

不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)

陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 古圳威, 刘京, 陈怡, 户新冉, 王思轶 (4666)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 秦纪法, 张佳彭, 桑奕, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)

生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)

铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)

畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)

《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

基于 APCS-MLR 和 PMF 模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析

段海静^{1,2,3}, 马嘉玉¹, 彭超月¹, 刘德新^{1,2,3*}, 王玉龙^{1,2,3}, 李旭辉^{1,2,3}, 马建华^{1,2,3}

(1. 河南大学地理与环境学院, 开封 475004; 2. 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004; 3. 河南大学土壤重金属污染控制与修复工程研究中心, 开封 475004)

摘要: 选取黄河下游典型人类扰动区——黄河文化公园为研究区域, 系统采集表层土壤样品, 测定土壤中 7 种 (Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 As) 重金属含量, 利用地累积指数研究公园土壤重金属污染特征, 应用克里格空间插值法、绝对因子分析-多元线性回归模型 (APCS-MLR) 和正定矩阵因子分解 (PMF) 模型解析黄河文化公园土壤重金属的来源。结果表明, 研究区表层土壤重金属 (Cd、Zn、Cu、Pb 和 As) 含量平均值高于黄河下游潮土区土壤元素背景值, 分别是背景值的 4.62、1.78、1.41、1.08 和 1.03 倍。除 Zn 外, 其他元素含量均低于黄河流域沿线不同区域土壤相应元素值。7 种元素地累积指数递减趋势为: Cd > Zn > Cu > Ni > Pb > As = Cr, 元素 Cd 属于偏中污染, 在表层土壤中积累明显。空间分布特征及源解析结果显示, Cr、Ni 和 Cu 为自然源因子, 主要受成土母质影响; Cd 和 Pb 为交通源, Zn 和 As 属于受少量人类活动和自然叠加影响的混合源。APCS-MLR 的分析结果显示: 自然源贡献率为 46.67%, 交通源贡献率为 24.11%, 混合源贡献率为 16.12%, 其他源贡献率为 13.10%; PMF 模型解析结果表明: 自然源贡献率为 35.50%, 交通源贡献率为 35.48%, 混合源贡献率为 29.02%。该研究对黄河沿线生态旅游开发及环境风险管控提供支撑。

关键词: 土壤重金属; 绝对因子得分-多元线性回归分析 (APCS-MLR); 正定矩阵因子分解 (PMF); 文化公园; 地累积指数

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4406-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202208173

Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model

DUAN Hai-jing^{1,2,3}, MA Jia-yu¹, PENG Chao-yue¹, LIU De-xin^{1,2,3*}, WANG Yu-long^{1,2,3}, LI Xu-hui^{1,2,3}, MA Jian-hua^{1,2,3}

(1. College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China; 3. Engineering Research Center for Control & Remediation of Soil Heavy Metal Pollution, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: With open spaces and good ecological environments, urban parks have become the first choice for the leisure and entertainment of many people. Therefore, the quality of park soil environments has gradually attracted the extensive attention of scholars. In this study, we take the Yellow River Cultural Park, a typical human disturbance area in the lower reaches of the Yellow River, as the research area to discuss the characteristics and sources of heavy metal pollution in the soil. Thirty-three soil surface samples were collected from the Yellow River Cultural Park, and the contents of seven heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, and As) were determined using an inductively coupled plasma emission spectrometer (ICP-AES) and an inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS). The geo-accumulation index and geo-statistics method were used. Meanwhile, the absolute factor analysis-multiple linear regression (APCS-MLR) receptor model and positive matrix factorization (PMF) analysis model were employed to reveal the sources of soil heavy metals. The results showed that the average contents of heavy metals (Cd, Zn, Cu, Pb, and As) in the surface soil of the study area were 4.62, 1.78, 1.41, 1.08, and 1.03 times higher than the background values of soil elements in the tidal soil area of the lower reaches of the Yellow River, respectively. Except for Zn, the contents of other elements were lower than the corresponding values of soil elements in different regions along the Yellow River Basin. Among the seven heavy metal elements, the coefficients of variation of Cd and As were greater than 50%, showing obvious spatial variability. The decreasing trend of the accumulation index of the seven elements was Cd > Zn > Cu > Ni > Pb > As = Cr, and the element Cd belonged to the middle pollution category, which was obviously accumulated in the surface soil. The spatial distribution of heavy metals in the soil differed: the high contents of Cr, Cu, and Ni were distributed in the southwest and northeast, and the high-value areas of Cd and Pb were consistent with the areas of human activity intensity. The high-value areas of Zn and As were located in the center of lacustrine sediments. The combined results of the APCS-MLR and PMF models suggested that the first pollution source of soil heavy metal elements in the Yellow River Cultural Park could have been a natural source, the second pollution source may have been a transportation source, and the third source of pollution was judged as a mixed source. Human activities such as transportation sources and mixed sources were the main sources of heavy metal soil pollution, and Cr, Cu, and Ni were affected by natural factors. The contribution rates of APCS-MLR were 46.67%, 24.11%, 16.12%, and 13.10%, respectively, and the contribution rates of PMF were 35.50%, 35.48%, and 29.02%, respectively. This research can provide a basis for improving the ecological environment quality of the park and improving the health level of the population and can also provide support for the ecological environment risk management and comprehensive management along the Yellow River.

Key words: soil heavy metals; absolute factor analysis-multiple linear regression (APCS-MLR); positive matrix factorization (PMF); cultural park; index of geoaccumulation

收稿日期: 2022-08-18; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2019M652520); 河南省科技攻关项目 (222102110359, 232102320107, 222102110145)

作者简介: 段海静 (1983 ~), 女, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为土壤环境污染与防治, E-mail: jingjingdl1983@126.com

* 通信作者, E-mail: dxliu@vip.henu.edu.cn

城市化进程的加快和城市人口的日益增加造成城市生态环境承载力与人类健康需求之间的矛盾越发突出^[1,2]。受到居住空间的限制,中国城市人口多居住于典型的中式高层建筑,居住单元内单位绿地面积人口激增^[3],休闲活动空间减少,导致人们更倾向于选择游乐设施完善、绿地面积广阔的城市公园作为假日休闲去处。尤其是新冠疫情以来,跨国及跨省、市人口流动大幅减少,而城市公园因其空间开阔,生态环境良好成为人们休闲娱乐的首选场所^[4]。因此,公园土壤环境质量也逐渐引起了学者们的广泛关注^[1,2,5~7]。城市化和工业化过程中所产生的含有重金属的污染物进入土壤造成了土壤重金属累积^[8~11]。土壤重金属含量升高不仅可以直接改变土壤的理化性质,而且可以通过大气、水体和生物等传播途径,甚至通过水源供给、食物摄入和皮肤接触等途径进入食物链,危害人类健康^[6,8,12~14]。因此,开展公园土壤重金属污染及来源研究,对改善公园生态环境质量,提高人群健康水平,具有十分重要的意义。

源解析可以识别污染物来源,源成分谱和时空分布状况是科学有效控制环境污染的基础。以往的定性解析(主成分分析及因子分析)方法只能对污染源进行分类,无法给出完整的源贡献率。而定量方法:绝对因子分析-多元线性回归分析(absolute factor analysis-multiple linear regression, APCS-MLR)模型和正定矩阵因子分解模型(positive matrix factorization, PMF)不仅可以给出污染源个数、每个污染源贡献的元素,还可以给出各污染源对某种元素的贡献率。APCS-MLR 模型以主成分为基础,通过重金属含量与 APCS 间的回归分析获得源贡献率^[15,16]。PMF 模型以因子分析法为基础,在求解时

对因子载荷和因子得分做非负约束赋予每组数据一定的不确定性估计,从而避免了因子载荷出现负值的情况^[17~19]。有学者将 APCS-MLR 和 PMF 模型结合可更为准确地确定污染物的来源及其贡献率^[20,21]。

近年来,随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为国家战略,黄河流域的环境问题引起了学界的广泛关注。众多学者对黄河流域沉积物^[22,23]、底泥^[24]、泥沙^[25,26]、水体^[27]、湿地^[28,29]、滩区^[30]和引黄灌区农田^[31~33]等不同环境介质中重金属开展了大量研究,但对于受到引黄灌溉与人类活动扰动双重叠加影响下公园的土壤重金属污染来源研究却相对较少。鉴于此,本文以黄河下游郑州段黄河文化公园为研究对象,获得土壤样品 33 个,利用地累积指数明晰重金属的污染特征,应用克里格空间插值法及定量源解析模型(APCS-MLR 和 PMF)等方法综合识别公园土壤重金属污染来源,以为黄河沿线生态环境风险管控及综合治理提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河文化公园始建于 1970 年,坐落于河南省郑州市西北 20 km 处的黄河之滨,地处中华民族发源地的核心部位,此处既是黄河中下游的分界线,又是黄河“地上悬河”的起点,其经纬度分别为 34°56′50.17″N ~ 34°57′38.33″N, 113°29′51.35″E ~ 113°30′47.04″E (图 1)。公园对外开放面积 20 多 km²,作为国家 4A 级旅游景区,其丰富的历史文化和独特的地理优势,吸引了大量的游客,仅 2021 年(疫情管控期间),接待游客量高达 2.73 × 10⁵ 人次。公园周边景点较多,有黄河中下游分界

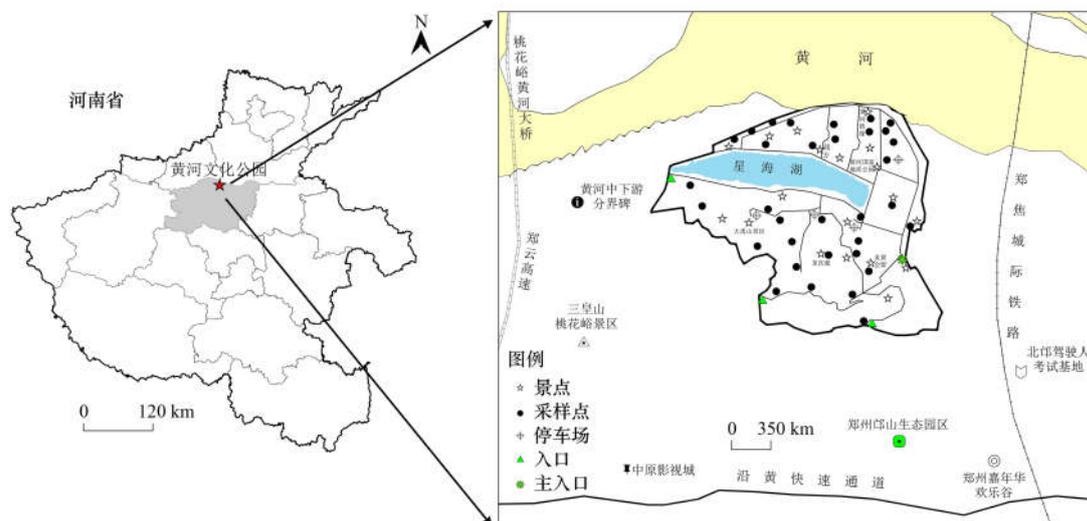


图 1 研究区及采样点分布示意

Fig. 1 Schematic of the study area and the distribution of sampling sites

碑、三皇山桃花峪景区、桃花峪森林公园、郑州邙山生态园区以及郑州嘉年华欢乐谷和中原影视城等,这些区域人类活动相对集中.公园西侧紧邻桃花峪黄河大桥(S87),东侧紧挨郑焦城际铁路,南侧为沿黄快速通道(S312).研究区因受黄河泛滥冲积影响,成土母质为黄河冲积物,土壤类型以潮土为主,质地偏砂,多为砂土和壤质沙土^[34].研究区公园土壤pH值变化范围为7.93~8.37,平均值为8.23,为偏碱性土壤.

1.2 样品采集与测试

按照景点分布特征,分别在星海湖、国家地质公园主题碑、五龙峰、大禹山和黄河情缘等位置附近采集土壤样品(图1).按照梅花布点法采集表层土壤样品(0~20 cm),共获得33个有效土壤样品,同时GPS进行样点定位,记录采样点地理位置、海拔高度等环境信息.采集的土壤样品室内常温风干,去除动植物残体、石块等杂物,玛瑙研钵粉碎后过100目尼龙筛,充分混匀,备用.土壤pH值按照土壤pH测定标准(NY/T1377-2007)进行.土壤样品采用HNO₃-HF-HClO₄消解体系,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, X series2)和电感耦合等离子体-原子发射光谱(ICP-AES, ICAP-6000)测定重金属Cr、Ni、Cd、Cu、Pb、Zn和As的含量,在样品测试过程中,加入平行样,空白样品及标准样品(GSS-8标准土壤样品)进行质量控制,重金属回收率符合质控要求.

1.3 地累积指数

地累积指数法作为研究沉积物中重金属累积程度的定量指标,该方法可以反映单一元素的污染水平.其计算公式^[35]为:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, C_n 为土壤重金属的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B_n 为土壤的地球化学背景值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 背景参比值选择黄河下游潮土区土壤元素背景值. I_{geo} 的污染等级为7个^[35]: $I_{geo} \leq 0$ 为无污染, $0 < I_{geo} \leq 1$ 为轻污染, $1 < I_{geo} \leq 2$ 为偏中污染, $2 < I_{geo} \leq 3$ 为中污染, $3 < I_{geo} \leq 4$ 为偏重污染, $4 < I_{geo} \leq 5$ 为重污染, $I_{geo} > 5$ 为极重污染.

1.4 绝对因子分析-多元线性回归受体模型 (APCS-MLR)

APCS-MLR模型是利用主成分分析(PCA)获取绝对主成分因子得分(APCS),再将APCS作为自变量,重金属元素含量为因变量进行多元线性回归分析,得出不同污染源贡献率,其计算流程如下^[15-17].

第一步,对各重金属含量数据标准化,提取的主成分得分计算公式为:

$$z_k = (c_k - \bar{c})/\delta$$

$$A_{z_k} = \sum_{j=1}^p (w_j \times z_k)$$

第二步,引入浓度为0的人为样本,各重金属浓度为0的因子分数,公式如下:

$$z_{0i} = (0 - \bar{c}_i)/\delta_i$$

$$A_{0j} = \sum_{i=1}^q (S_{ij} \times z_{0i})$$

式中, z_k 为第 i 种重金属 k 样点的重金属含量标准化值; c_k 为第 i 种重金属 k 样点的重金属含量; δ 为 i 种重金属标准偏差; \bar{c} 为 i 种重金属算术平均值; w_j 为第 j 主成分的因子系数; A_{z_k} 为主成分的得分值; z_{0i} 为第 i 种重金属元素浓度为0时标准化后的值; S_{ij} 为 i 种重金属 j 主成分的因子得分系数,其中 i 为重金属序号; A_{0j} 为0浓度时的 j 主因子得分值.

第三步,由主因子得分减去浓度为0的样本因子得分得到每个样本的APCS,将APCS作为自变量,各重金属含量为因变量进行多元线性回归分析.依据回归系数计算各污染源的贡献率,公式如下:

$$\text{APCS}_{jk} = A_{z_{jk}} - A_{0j}$$

$$C_i = \sum_{m=1}^n (a_{im} \times \text{APCS}_{im}) + b_i$$

式中, APCS_{jk} 为 k 样点 j 主成分的绝对主成分得分值; $A_{z_{jk}}$ 为 k 样点第 j 主成分的得分值; C_i 为 i 种重金属的实测浓度; b_i 为多元回归的常数项, a_{im} 为污染源 m 对 i 种重金属的回归系数; APCS_{im} 为绝对主因子得分, n 为因子个数, $a_{im} \times \text{APCS}_{im}$ 为污染源 m 对 c_k 的贡献率.

第四步,用 $a_{im} \times \overline{\text{APCS}_{im}}$ 的乘积表示污染源对重金属元素因子的贡献.污染源 m 对重金属元素 i 的贡献率,公式如下^[15-17]:

$$\text{PC}_{im} = \frac{|a_{im} \times \overline{\text{APCS}_{im}}|}{|b_i| + \sum_{m=1}^n |a_{im} \times \overline{\text{APCS}_{im}}|}$$

式中, b_i 为未被识别的来源贡献(未知源).

未被识别的来源(未知源)的贡献率公式如下:

$$\text{PC}_{im} = \frac{|b_i|}{|b_i| + \sum_{m=1}^n |a_{im} \times \overline{\text{APCS}_{im}}|}$$

式中, PC_{im} 为重金属元素 i 和污染源 m 的贡献率, $\overline{\text{APCS}_{im}}$ 为重金属 i 的全部样本绝对主成分因子得分的平均值.

1.5 正定矩阵因子分解(PMF)模型

PMF模型是通过使用相关和协方差矩阵简化高维变量来确保非负源贡献值和因子分布的理想方

法,用于识别和量化土壤中重金属的来源^[19~21]. 该模型将原始数据集 X_{ij} 的矩阵分解为两个因子矩阵(源贡献矩阵 g_{ik} 和源成分谱矩阵 f_{kj}) 和残差矩阵 e_{ij} , 公式如下^[19~21]:

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

式中, X_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个重金属的浓度, g_{ik} 为第 k 个源对第 i 个样品的贡献, f_{kj} 为第 k 个源中元素 j 的浓度, e_{ij} 为残留误差矩阵, 可以通过目标函数 Q 的最小值来计算^[21]. Q 值计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2$$

式中, u_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种重金属的不确定度, 该不确定度是根据特定物种的方法检测限(MDL)、浓度和提供的误差率计算得出的.

如果金属浓度大于 MDL, u_{ij} 的计算公式如下:

$$u_{ij} = \sqrt{(RSD \times X_{ij})^2 + MDL^2}$$

如果金属浓度低于或等于 MDL, u_{ij} 的计算公式如下:

$$u_{ij} = (5/6) \times MDL$$

式中, RSD 为重金属含量的相对标准偏差, MDL 为方法检出限.

1.6 数据处理

数据处理与分析由 Excel 2019 完成, APCS-MLR

受体模型由 SPSS 25.0 完成, 地统计分析由 ArcGIS 10.6 完成, PMF 模型由 EPA PMF 5.0 完成, 其他图形绘制由 Origin 2021 完成.

2 结果与讨论

2.1 重金属含量特征

从公园土壤重金属含量特征可知(表 1), $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{As})$ 平均值分别为 49.06、28.31、30.11、115.58、0.42、22.07 和 12.82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中土壤中 Cd、Zn、Cu、Pb 和 As 含量平均值均高于黄河下游潮土区土壤元素背景值^[36], 分别为背景值的 4.62、1.78、1.41、1.08 和 1.03 倍, 表明公园土壤大多数重金属已出现富集现象. 变异系数可反映土壤重金属元素的区域差异性^[37], 本研究中, 各重金属变异系数范围为 19.54%~59.16%, 均为中等变异^[38], 其中元素 Cd 和 As 的变异系数较大, 分别为 59.16% 和 51.38%, 表明 Cd 和 As 数据离散程度较高, 来源可能受外界干扰明显. 将研究区域土壤重金属含量与农用地土壤污染风险管控标准(GB 36600-2018)相比(表 1), 发现元素含量均低于风险筛选值, 说明公园土壤环境质量整体较好, 与背景值相比, 5 种重金属富集明显, 可能存在污染风险, 需进一步开展来源解析.

表 1 黄河文化公园土壤重金属统计特征

Table 1 Contents of heavy metals in soils from Yellow River Cultural Park

统计项	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As
最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	20.74	7.47	9.75	19.80	0.13	15.10	29.35
最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	74.56	42.01	42.61	210.33	1.33	37.90	1.95
平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	49.06	28.31	30.11	115.58	0.42	22.07	12.82
标准偏差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	12.14	6.12	5.88	35.64	0.25	5.51	6.59
变异系数/%	24.74	21.63	19.54	30.83	59.16	24.96	51.38
偏度	-0.021	-0.623	-0.960	-0.286	2.227	1.452	0.828
峰度	0.180	3.626	3.322	1.938	5.338	1.957	0.681
黄河下游潮土区土壤元素背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	53.60	24.90	21.40	65.10	0.091	20.39	12.49
GB 36600-2018 筛选值($\text{pH} > 7.5$)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	250	190	100	300	0.60	170	25

综合黄河流域沿线不同区域土壤重金属含量特征^[30,32,38,39], 绘制黄河沿线土壤重金属含量对比. 由图 2 可知, 黄河文化公园土壤中 Cr 和 Ni 含量低于其他区域, 元素 Cu 和 Zn 含量高于其他地区. Cd 含量分布有从上游至下游递减的趋势, 含量相差很大, 含量最高约为研究区的 5 倍; Pb 含量低于下游(开封段、东营段)地区, 高于上游(兰州段、西宁段、银川段和包头段)地区; As 含量则并无明显差距. 总体而言, 研究区土壤重金属除 Zn 外, 其他大部分元素含量相对较低.

2.2 重金属污染特征

以黄河下游潮土区土壤元素背景值为标准, 利用地累积指数模型计算黄河文化公园土壤重金属地累积指数(图 3), 研究区土壤 7 种重金属元素的平均 I_{geo} 的变化顺序为: $\text{Cd}(1.43) > \text{Zn}(0.14) > \text{Cu}(-0.13) > \text{Ni}(-0.45) > \text{Pb}(-0.51) > \text{As}(-0.76) = \text{Cr}(-0.76)$. 从图 4 可以看出, 除元素 Cd 属于偏中污染, Zn 属于轻污染之外, 其余 5 种重金属元素的 I_{geo} 平均值均小于 0, 总体上不存在污染现象. 这表明黄河文化公园土壤重金属 Cd

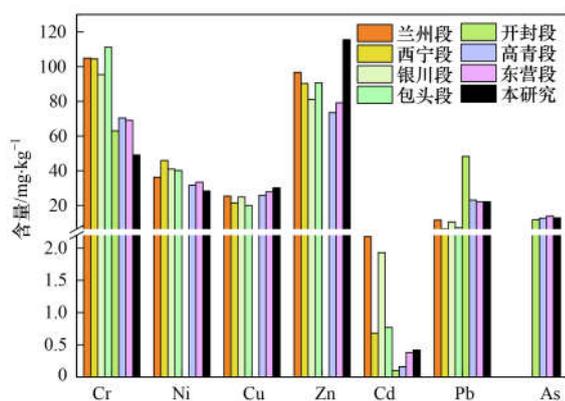


图2 黄河流域沿线土壤中重金属含量对比

Fig. 2 Comparison of heavy metal contents in soils along the Yellow River

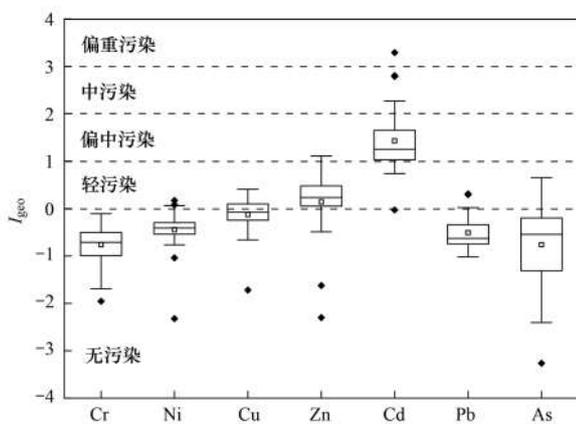
图3 地累积指数 I_{geo}

Fig. 3 Cumulative index of I_{geo}

和 Zn 出现一定程度的富集,其他元素并未明显累积。

2.3 土壤重金属源解析

2.3.1 绝对主成分-多元线性回归法 (APCS-MLR)

利用 SPSS 25.0 对研究区土壤重金属进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 的统计值和 Bartlett's 球体检验,其数据结果为 0.717 和 0.000,对数据进一步开展主成分分析,结果见表 2. 前 3 个主成分累积占比为 77.94%,第一主成分占比为 44.44%,其中元素 Cr、Ni 和 Cu 的载荷系数为强负荷 (>0.75)^[20],载荷系数分别为 0.799、0.837 和 0.814. 第二主成分占比为 18.66%,元素 Cd 和 Pb 为强负荷,载荷系数为 0.875 和 0.850,此外,元素 Cr 和 Zn 均为弱负荷,说明第二主成分对 Cr、Zn 有一定影响. 第三主成分占比为 14.83%,元素 Zn 和 As 为强负荷,负荷系数为 0.774 和 0.864.

基于 APCS-MLR 模型和 PMF 模型分别对公园土壤金属 (Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、P 和 As) 进行多元线性回归分析 (表 3). 由表 3 可知, Cr、Ni、Cu、Zn、

表 2 主因子影响因素¹⁾

Table 2 Influence factors of the principal factors

元素	旋转后的载荷系数		
	第一主成分	第二主成分	第三主成分
Cr	0.799	0.394	-0.020
Ni	0.837	-0.012	0.242
Cu	0.814	0.133	0.227
Zn	0.113	0.415	0.774
Cd	0.051	0.875	0.090
Pb	0.263	0.850	0.088
As	0.237	-0.084	0.864
方差贡献率/%	44.44	18.66	14.83
累积方差贡献率/%	44.44	63.10	77.94

1) 黑体字表示各主成分中的较大载荷值

表 3 研究区土壤重金属污染源估计值与实测值对比

Table 3 Comparison between the contribution rate and estimated value of soil heavy metal pollution sources in the study area and the measured values

重金属	实测值 (O) /mg·kg ⁻¹	基于 APCS-MLR 模型			基于 PMF 模型		
		预测值 (E)/mg·kg ⁻¹	E/O	R ²	预测值 (E)/mg·kg ⁻¹	E/O	R ²
Cr	49.06	49.06	1.00	0.773	47.55	0.97	0.758
Ni	28.31	28.31	1.00	0.735	27.74	0.98	0.701
Cu	30.11	30.11	1.00	0.705	29.73	0.99	0.797
Zn	115.58	115.58	1.00	0.763	113.18	0.98	0.843
Cd	0.42	0.41	0.98	0.751	0.33	0.80	0.382
Pb	22.07	22.07	1.00	0.782	22.02	1.00	0.958
As	12.82	12.83	1.00	0.791	10.78	0.84	0.545

Cd、Pb 和 As 的线性回归可决系数 (R^2) 均大于 0.7,所有元素的估计值/实测值 (E/O) 均接近 1,表明 APCS-MLR 模型的拟合度好,分析的可信度高。

在主成分分析基础上,利用 APCS-MLR 模型计算元素贡献率 (图 4). 成分 1 以 Cr (70.77%)、Cu (77.67%) 和 Ni (87.01%) 贡献率为主. 由克里格空

间分布特征可知 (图 5), Cr、Ni 和 Cu 的高值区在公园东北部, Ni 和 Cu 在公园西南部也有一个高值区. 公园西南部海拔较高,人迹罕至,游客及景点主要集中在公园北部, Cr、Ni 和 Cu 这 3 种重金属在上述两处位置富集, Cr、Ni 和 Cu 的变异系数相对较小 (<24.74%) 且 I_{geo} 均小于 0,说明受人为影响较

小,结合以往的研究结果^[40,41],可初步判定成分 1 为自然源.

成分 2 以 Pb 和 Cd 的载荷较高,贡献率为 64.78% 和 47.38%,Cr 和 Zn 亦有贡献,Cd 和 Pb 含量平均值显著高于黄河下游潮土区土壤背景值,其中 Cd 含量平均值高于背景值 4.61 倍,Cd 的 I_{geo} 最高为 1.43,属于偏中污染,图 5 的空间分布特征亦表明两种元素的高值区多位于人类扰动较大的园区停车场或景区出入口处等区域.由图 1 可知,黄河文化公园周边景点较多,交通便利,人类活动扰动较大.有研究表明^[41,42],Cd 和 Pb 是典型的人为源重金属,其与机动车尾气排放、轮胎磨损和汽油添加剂的使用等密切相关.因此可初步判定成分 2 为交通源.

Zn(41.82%) 和 As(44.55%) 对成分 3 贡献率较高.Zn 的 I_{geo} 为 0.14,为轻污染,Zn 作为禽畜饲料的添加剂,由于在动物体内不能完全吸收,常以动物粪便形式排出,被做成有机肥^[32,43].而 As 的 I_{geo} 为 -0.76,无污染,主要受成土母质影响.空间分布特征表明(图 5),Zn 和 As 的高值区主要分布在公园星海湖附近园林养护区内,与湖积物位置基本吻合.部分学者研究表明 As 是农药的重要组成元素,多次施用含 As 农药的土壤 $\omega(As)$ 达到 $2000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是未施过农药土壤的 200 倍^[44].因此园林区内的施肥农药喷洒等养护工作可能对养护区内 Zn 和 As 贡献较大.因此可初步判定成分 3 为少量农业活动和

自然累积的混合源.

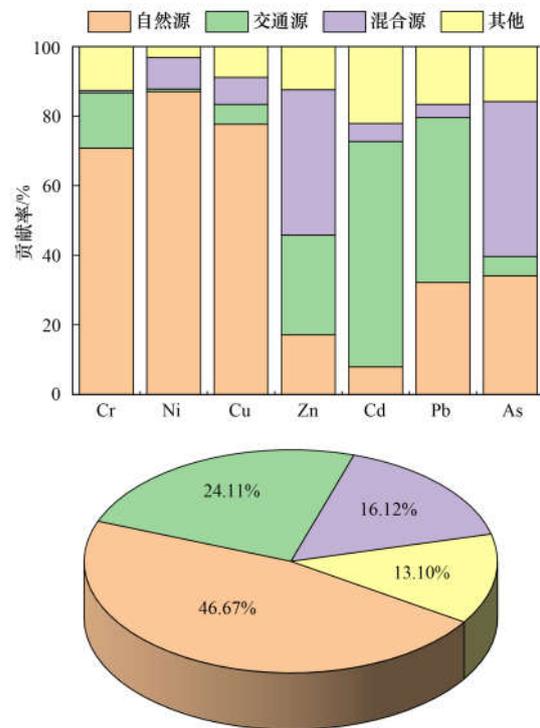


图 4 公园土壤 APCS-MLR 源解析所选变量的贡献率和平均贡献率

Fig. 4 Contributions and average contributions of selected variables of pollution sources by APCS-MLR in the study area

2.3.2 正定矩阵因子分解法 (PMF)

利用 PMF 模型对黄河文化公园土壤重金属来源展开溯源,首先计算相应重金属不确定度,将 33

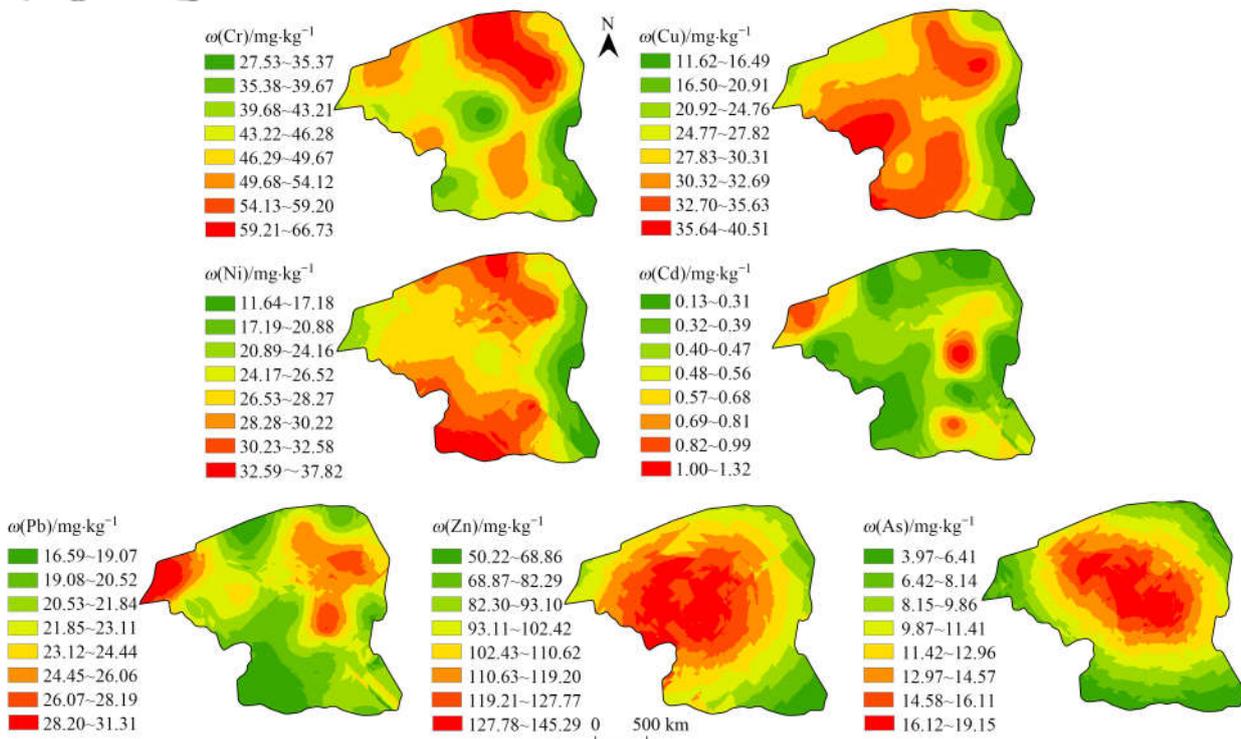


图 5 土壤重金属含量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of heavy metal contents in soils

个样本 \times 7 种重金属元素含量组成的数据表和相对应的不确定度数据表导入 EPA PMF 5.0 软件中, 7 种重金属中, 根据测量浓度和预测浓度之间的相关系数 R^2 (表 3), 除 Cd 和 As 的 R^2 为 0.382 和 0.545, 其他 R^2 均大于 0.701, 表明 PMF 模型对其他 5 种重金属有较好的预测效果. 所有样本的残差均在 $-3 \sim 3$ 之间. 选择因子 2 ~ 5 进行迭代运算 20 次, 最终确定 3 个因子数, 结果如图 6 和图 7 所示. 由图 6 可知, 因子 1 具有高负荷的元素有 Cr (49.00%)、Ni (60.00%) 和 Cu (56.50%), 这 3 种元素存在的区域主要为较高海拔的山坡和人类聚集区, 与 APCS-MLR 模型分析结果一致, 认为因子 1 为自然源. 因子 2 具有高负荷的元素有 Cr (49.10%)、Cd (44.10%) 和 Pb (47.80%), 与其他学者的研究结果相比, 黄河上游段沉积物^[22,23] 以及黄土背景值^[45] 的 Cr 含量均显著高于黄河下游潮土区土壤元素背景值, 分别为背景值的 1.62、1.17、1.37 和 1.26 倍, 整体均高于黄河文化土壤 Cr 含量, 这表明黄河文化公园土壤 Cr 元素可能受上游冲积物影响相对较多, 结合 APCS-MLR 分析结果可知, Cr 主要受自然源的影响, 因此此处不再考虑 Cr, 仅考虑 Cd 和 Pb, 因子 2 为交通源. 因子 3 对 Zn 和 As 的贡献率较高, 分别为 67.00% 和 61.70%, 少量的农业活动 (施用农药、化肥) 和成土母质影响会导致重金属 Zn 和 As 的积累^[40], 判断因子 3 为农业和自然的混合源.

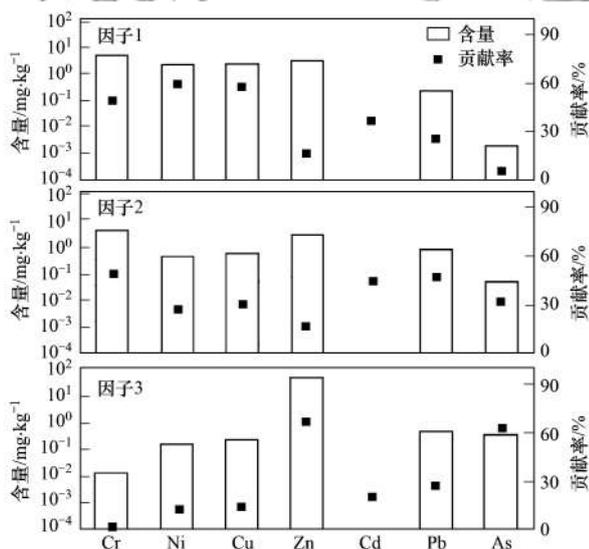


图 6 各因子对土壤重金属含量分布的贡献率

Fig. 6 Source contribution ratios of heavy metals in soils

2.3.3 公园土壤重金属结果解析

由表 3 可知, APCS-MLR 模型对 7 种重金属元素的拟合度 R^2 介于 0.705 ~ 0.791 之间; 而 PMF 模型除 As 和 Cd 拟合度 R^2 较低之外, 其他 5 种金属元素 R^2 均大于 0.701. 表明两种模型的拟合度各有优

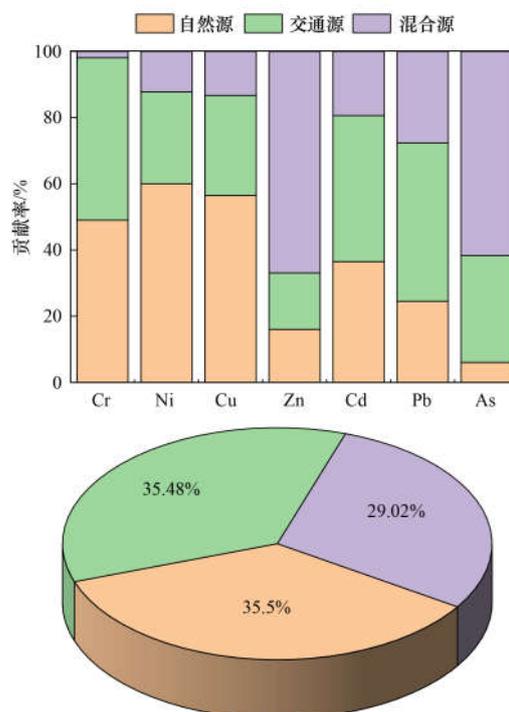


图 7 公园土壤 PMF 源解析所选变量的贡献率和平均贡献率

Fig. 7 Contributions and average contributions of selected variables of pollution sources by PMF in the study area

势, 预测含量与实测含量拟合良好, 源解析结果具有一定参考价值. 从 APCS-MLR 模型和 PMF 模型的综合结果分析可知 (图 4 和图 7), APCS-MLR 模型识别黄河文化公园土壤重金属污染来源为 4 种: 自然源、交通源、混合源和其他来源, 各源平均贡献率分别为 46.67%、24.11%、16.12% 和 13.10%. PMF 模型识别的重金属污染来源为 3 种, 自然源、交通源和混合源, 其平均贡献率依次为 35.50%、35.48% 和 29.02%.

尽管 APCS-MLR 和 PMF 模型源成分谱组分比例及贡献率稍有差异, 但 2 个模型所对应的负荷元素一致, 自然源对应的元素为 Cr、Cu 和 Ni, 交通源负荷高的元素为 Pb 和 Cd, 混合源对应的高负荷元素为 Zn 和 As. 出现这一结果的原因与两种模型因子分解的计算过程有直接关系. 两种模型的基本原理均为最小二乘法, 其中 APCS-MLR 模型是以主成分分析为基础, 能鉴别因子个数, 能很好解释环境介质中重金属来源贡献率^[15-17,44]; PMF 模型在求解过程中对因子载荷和因子得分均做非负约束, 并且对每一个单独的数据点都进行了权重处理, 赋予每个数据点合适的的不确定度, 使得因子分解计算得到的源成分谱和源贡献率具有可解释性和明确的物理意义^[19-21,37]. 因此, 两种方法互为补充, 相互验证, 在土壤重金属解析方面具有良好的应用前景, 这与以往研究的结果一致^[20,21].

3 结论

(1) 黄河文化公园土壤重金属 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 和 $\omega(\text{As})$ 平均值分别为 49.06、28.31、30.11、115.58、0.42、22.07 和 12.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除 Cr 外, 其他 6 种金属元素含量高于黄河下游潮土区土壤元素背景值, 存在一定的富集. 元素 Cd 和 As 的变异系数均大于 50%, 表现出了明显的空间变异性. 研究区土壤重金属含量均低于农用地土壤风险筛选值, 表明公园土壤环境质量整体较好. 与黄河流域沿线不同区域土壤重金属含量对比可知, 公园土壤重金属除 Zn 外, 其他大部分元素含量都相对较低.

(2) 地累积指数表明, 7 种金属元素的 I_{geo} 变化趋势为: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{As} = \text{Cr}$, 其中只有 Zn 和 Cd 呈现较轻积累, 表明该研究区的这些元素总体上不存在明显积累.

(3) 克里格空间插值分析表明: Cr、Cu 和 Ni 含量高值分布在公园西南和东北部, Cd 和 Pb 高值区与人类活动强度区域吻合, Zn 和 As 的高值区位于湖积物中心.

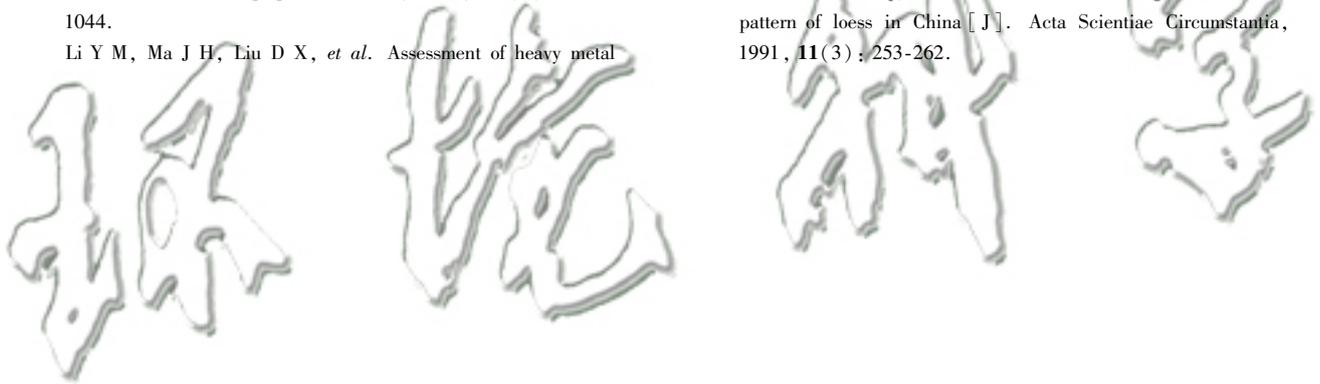
(4) APCS-MLR 模型识别结果显示污染源主要为 4 种来源, 其平均贡献率为自然源 (46.67%)、交通源 (24.11%)、混合源 (16.12%) 和其他源 (13.10%). PMF 模型的解析结果更加强调了人为因素的影响, 交通源贡献率提升至 35.48%, 混合源的贡献率提升至 29.02%, 而自然源下降为 35.50%. 总体来说, 自然源、交通源和少量公园养护等农业源对公园土壤重金属的累积贡献较大.

参考文献:

- [1] 李军, 李开明, 王晓槐, 等. 兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(6): 3475-3487.
- Li J, Li K M, Wang X H, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in surface dusts and its surrounding green land soils from Yellow river custom tourist Line in Lanzhou[J]. Environmental Science, 2023, **44**(6): 3475-3487.
- [2] 刘玲玲, 安燕飞, 马瑾, 等. 基于 UNMIX 模型的北京城区公园土壤重金属源解析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(12): 2856-2863.
- Liu L L, An Y F, Ma J, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals in Beijing urban park based on the UNMIX model [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(12): 2856-2863.
- [3] Jin Y L, O'Connor D, Ok Y S, *et al.* Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis[J]. Environment International, 2019, **124**: 320-328.
- [4] Shoari N, Ezzati M, Baumgartner J, *et al.* Accessibility and allocation of public parks and gardens in England and Wales; a COVID-19 social distancing perspective[J]. PLoS One, 2020, **15**(10), doi: 10.1371/journal.pone.0241102.
- [5] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China[J]. Chemosphere, 2005, **60**(4): 542-551.
- [6] Han Q, Wang M S, Cao J L, *et al.* Health risk assessment and bioaccessibilities of heavy metals for children in soil and dust from urban parks and schools of Jiaozuo, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **191**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110157.
- [7] 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.
- [8] Xiang M T, Li Y, Yang J Y, *et al.* Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops[J]. Environmental Pollution, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116911.
- [9] Bo X, Guo J, Wan R X, *et al.* Characteristics, correlations and health risks of PCDD/Fs and heavy metals in surface soil near municipal solid waste incineration plants in Southwest China[J]. Environmental Pollution, 2022, **298**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118816.
- [10] 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价[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.
- [11] El Fadili H, Ali M B, Touach N, *et al.* Ecotoxicological and pre-remedial risk assessment of heavy metals in municipal solid wastes dumpsite impacted soil in morocco [J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2022, **17**, doi: 10.1016/j.enmm.2021.100640.
- [12] 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.
- [13] 石雨佳, 方林发, 方标, 等. 三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- Shi Y J, Fang L F, Fang B, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in vegetable field in the three gorges reservoir area (Chongqing Section) [J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1611-1619.
- [14] 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 等. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4578-4589.
- Che K, Chen C M, Zheng Q Y, *et al.* Heavy metal emissions from coal-fired power plants and heavy metal pollution characteristics and health risks in surrounding soils [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4578-4589.
- [15] 后希康, 张凯, 段平洲, 等. 基于 APCS-MLR 模型的沱河流域污染来源解析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(10): 2350-2357.
- Hou X K, Zhang K, Duan P Z, *et al.* Pollution source apportionment of Tuohu river based on absolute principal component score-multiple linear regression [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(10): 2350-2357.

- [16] Cheng G W, Wang M J, Chen Y, *et al.* Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS-MLR[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42** (11): 3795-3810.
- [17] 王美华. 基于 PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44** (6): 3509-3519.
Wang M H. Source analysis of heavy metals in typical farmland soils based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (6): 3509-3519.
- [18] 张忠诚, 谢宇琪, 张智杰, 等. 基于两种受体模型的太原市大气降尘来源解析及季节变化特征[J]. *中国环境科学*, 2022, **42** (6): 2577-2586.
Zhang Z C, Xie Y Q, Zhang Z J, *et al.* Source apportionment and seasonal variation characteristics of atmospheric dustfall in Taiyuan by two receptor models [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42** (6): 2577-2586.
- [19] Wang Y N, Li Y R, Yang S Y, *et al.* Source apportionment of soil heavy metals: a new quantitative framework coupling receptor model and stable isotopic ratios [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **314**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120291.
- [20] 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 等. 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2023, **44** (4): 2192-2203.
Ma J, Shen Z J, Zhang P P, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in farmland soils around the Gangue heap of coal mine based on APCS-MLR and PMF receptor model [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (4): 2192-2203.
- [21] 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 等. APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源[J]. *环境科学*, 2022, **43** (5): 2476-2488.
Shen C Y, Yan Y, Yu R L, *et al.* APCS-MLR combined with PMF model to analyze the source of metals in sediment of Xinglin Bay suburban watershed, Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (5): 2476-2488.
- [22] 王韬轶, 潘保柱, 韩谓, 等. 黄河沉积物重金属时空分布与污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43** (5): 2467-2475.
Wang T Y, Pan B Z, Han X, *et al.* Spatial-temporal distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments of the Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (5): 2467-2475.
- [23] 庞阔, 李敏, 刘璐, 等. 基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43** (8): 4008-4017.
Pang K, Li M, Liu L, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in sediments of the Yellow River Basin based on Monte Carlo simulation and PMF model [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (8): 4008-4017.
- [24] 郝建秀, 任珺, 陶玲, 等. 黄河底泥重金属空间分异影响因素与源解析研究[J]. *安全与环境学报*, 2022, **22** (2): 1084-1093.
Hao J X, Ren J, Tao L, *et al.* Influence factors of spatial differentiation and source analysis of heavy metals of sediment in the Yellow River [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, **22** (2): 1084-1093.
- [25] 唐本玲, 胡振琪, 王亚平. 不同黄河泥沙充填复垦土壤剖面对土壤与作物中元素分布的影响[J]. *煤炭学报*, 2021, **46** (S2): 915-924.
Tang B L, Hu Z Q, Wang Y P. Effects of different Yellow River sediment filling reclaimed soil profiles on the distribution of elements in soil and crops [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, **46** (S2): 915-924.
- [26] 丁美琪, 孟昭虹. 黄河流域和松花江流域土壤重金属污染对比分析及防治研究—以河南段背河地和吉林段灌区为例[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2021, **37** (2): 72-78.
Ding M Q, Meng Z H. Analysis and control of soil heavy metal pollution in Yellow River Basin and Songhua River Basin [J]. *Natural Science Journal of Harbin Normal University*, 2021, **37** (2): 72-78.
- [27] 张倩, 刘湘伟, 税勇, 等. 黄河上游重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, **57** (2): 333-340.
Zhang Q, Liu X W, Shui Y, *et al.* Distribution of heavy metals in the upstream of Yellow River and ecological risk assessment [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, **57** (2): 333-340.
- [28] 李晓. 黄河口湿地土壤重金属分布及其形态对水盐的响应机制[D]. 烟台: 鲁东大学, 2020.
Li X. Distribution of heavy metal and its effect of water level and salinity in sediments in soil of the Yellow River Estuary [D]. Yantai: Ludong University, 2020.
- [29] 刘晟, 张文馨, 李召阳, 等. 黄河三角洲不同类型湿地土壤重金属累积特征及风险评价[J]. *山东林业科技*, 2021, **51** (1): 21-26.
Liu S, Zhang W X, Li Z Y, *et al.* Accumulation characteristics and risk assessment of soil heavy metals in different wetlands of Yellow River Delta [J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2021, **51** (1): 21-26.
- [30] 张鹏岩, 秦明周, 陈龙, 等. 黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价[J]. *环境科学*, 2013, **34** (9): 3654-3662.
Zhang P Y, Qin M Z, Chen L, *et al.* Study on distribution characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (9): 3654-3662.
- [31] 缪雄谊, 郝玉培, 阳莲锦, 等. 黄河三角洲表层土壤重金属元素的空间分布及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, **36** (1): 57-68.
Miao X Y, Hao Y P, Yang L J, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in the surface soil of Yellow River Delta and influence factors [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, **36** (1): 57-68.
- [32] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *环境科学*, 2018, **39** (6): 2865-2874.
Yu Y H, Lv J S, Wang Y M. Source identification and spatial distribution of heavy metals in soils in typical areas around the Lower Yellow River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (6): 2865-2874.
- [33] 张敏. 宁夏平原引黄灌区重金属污染特征及其两种土地利用类型源解析研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2020.
- [34] 河南省土壤普查办公室. 河南土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [35] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geology Journal*, 1969, **2** (3): 108-118.
- [36] 夏增禄, 李森照, 李廷芳, 等. 土壤元素背景值及其研究方法[M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [37] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. 基于 PMF 模型及地统计法的乐安河中上游地区土壤重金属来源解析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32** (6): 984-992.
Li J, Teng Y G, Wu J, *et al.* Source apportionment of soil heavy

- metal in the middle and upper reaches of Le'an River based on PMF model and geostatistics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(6): 984-992.
- [38] 王颜昊, 刘增辉, 柳新伟, 等. 黄河三角洲表层土壤重金属空间分布与潜在生态风险评价[J]. *水土保持学报*, 2019, **33**(3): 305-311, 319.
Wang Y H, Liu Z H, Liu X W, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in the topsoil of the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, **33**(3): 305-311, 319.
- [39] 郭永春. 黄河上游典型城市底泥重金属污染分析与评价[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
Guo Y C. Investigation and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of typical cities in upstream of Yellow River [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [40] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 507-515.
Dai B, Lv J S, Zhan J C, *et al.* Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 507-515.
- [41] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
Li Y M, Ma J H, Liu D X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 1037-1044.
- [42] 张宏泽, 崔文刚, 黄月美, 等. 黔中喀斯特地区临近矿区耕地土壤重金属污染评价及其源解析[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(4): 412-421.
Zhang H Z, Cui W G, Huang Y M, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution of farmland soil around the mining area of karst region of central Guizhou Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(4): 412-421.
- [43] Lu A X, Wang J H, Qin X Y, *et al.* Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **425**: 66-74.
- [44] 霍明珠, 高秉博, 乔冬云, 等. 基于 APCS-MLR 受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(5): 978-986.
Huo M Z, Gao B B, Qiao D Y, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soil based on the APCS-MLR model [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(5): 978-986.
- [45] 田均良, 李雅琦, 陈代中. 中国黄土元素背景值分异规律研究[J]. *环境科学学报*, 1991, **11**(3): 253-262.
Tian J L, Li Y Q, Chen D Z. Elemental background variation pattern of loess in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1991, **11**(3): 253-262.



CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)