

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 ..... 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 ( 1 )

粤港澳大湾区大气PM<sub>2.5</sub>浓度的遥感估算模型 ..... 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 ( 8 )

典型输送通道城市冬季PM<sub>2.5</sub>污染与传输变化特征 ..... 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 ( 23 )

郑州市夏季PM<sub>2.5</sub>中二次无机组分污染特征及其影响因素 ..... 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 ( 36 )

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 ..... 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 ( 48 )

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 ..... 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 ( 61 )

2020年“三连击”台风对我国东部地区O<sub>3</sub>污染的影响分析 ..... 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 ( 71 )

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 ..... 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 ( 81 )

机动车减排降碳综合评价体系综述 ..... 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 ( 93 )

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 ..... 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 ( 104 )

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 ..... 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 ( 115 )

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 ..... 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 ( 123 )

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估 ..... 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 ( 131 )

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 ..... 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 ( 140 )

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 ..... 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 ( 151 )

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 ..... 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 ( 159 )

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 ..... 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 ( 173 )

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 ..... 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 ( 181 )

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 ..... 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 ( 194 )

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 ..... 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 ( 207 )

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 ..... 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 ( 218 )

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 ..... 王耕, 张芙蓉 ( 228 )

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 ..... 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 ( 239 )

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 ..... 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 ( 248 )

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 ..... 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 ( 262 )

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 ..... 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 ( 275 )

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 ..... 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 ( 287 )

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 ..... 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 ( 300 )

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 ..... 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 ( 314 )

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 ..... 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 ( 323 )

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 ..... 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 ( 335 )

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 ..... 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 ( 343 )

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 ..... 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 ( 354 )

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 ..... 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 ( 364 )

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 ..... 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 ( 376 )

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 ..... 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 ( 386 )

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 ..... 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 ( 396 )

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 ..... 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 ( 407 )

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 ..... 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 ( 417 )

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 ..... 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 ( 429 )

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 ..... 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 ( 439 )

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 ..... 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 ( 450 )

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 ..... 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 ( 459 )

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 ..... 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 ( 470 )

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 ..... 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 ( 480 )

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 ..... 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 ( 489 )

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 ..... 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 ( 496 )

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 ..... 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 ( 508 )

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 ..... 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 ( 520 )

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 ..... 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 ( 530 )

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 ..... 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 ( 543 )

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 ..... 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 ( 555 )

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 ..... 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 ( 567 )

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 ..... 黄福义, 周曙仟, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 ( 576 )

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 ..... 刘可, 董蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 ( 584 )

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 ..... 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 ( 594 )

CO<sub>2</sub>气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb<sup>2+</sup>吸附性能对比 ..... 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 ( 606 )

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

# 天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价

李春艳<sup>1</sup>, 王新民<sup>2\*</sup>, 王海<sup>1</sup>, 吕晓斌<sup>1</sup>

(1. 甘肃林业职业技术学院环境工程学院, 天水 741020; 2. 天水师范学院资源与环境工程学院, 天水 741000)

**摘要:** 为探明公交站地表灰尘重金属来源和污染水平, 利用PMF模型解析重金属污染源, 在传统重金属污染评价方法基础上, 采用Hakanson毒性响应系数来修正传统权重, 引入物元可拓集理论, 进而体现重金属的毒理性质和危害程度, 建立物元可拓模型对研究区地表灰尘重金属污染水平进行评价, 并与 $I_{geo}$ 、 $P_N$ 和RI结果对比分析. 结果表明: ①除Co和V外, 其余重金属含量平均值都高于甘肃省土壤背景值, 为背景值的1.29~9.30倍, Cu和Pb的点位超标率均为100%, Cr、Ni和As分别为96.15%、94.23%和96.15%, Co和V未超标. ②相关性分析和PMF模型结果表明, 源1为自然源, 对V的贡献率为32.12%; 源2为自然-交通混合源, 对Cu和Co分别为51.50%和33.37%; 源3为建筑废弃物污染源, 对Cr和Ni分别为45.06%和44.70%, 源4为燃煤-交通混合源, 对As和Pb分别为49.89%和75.25%. ③物元评价结果显示, 研究区公交站地表灰尘以IV级(中度污染)为主, 13%的样点为尚清洁, 37%的样点为中度污染, 轻度和重度污染样点各占25%. 此方法与 $P_N$ 结果有较大差异, 与RI结果较为一致, 表明其评价结果更为敏感, 可用于地表灰尘重金属污染评价.

**关键词:** 物元可拓模型; 地表灰尘; PMF模型; 毒性响应系数; 重金属; 公交站

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0417-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202302023

## Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City

LI Chun-yan<sup>1</sup>, WANG Xin-min<sup>2\*</sup>, WANG Hai<sup>1</sup>, LU Xiao-bin<sup>1</sup>

(1. College of Environment Engineering, Gansu Forestry Polytechnic, Tianshui 741020, China; 2. College of Resource and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China)

**Abstract:** In this study, a PMF model was used to identify the sources and pollution level of heavy metals in the surface dust of a bus station. On the basis of the traditional heavy metal pollution evaluation methods, the Hakanson toxicity response coefficient was used to modify the traditional weight. The matter-element extension theory was introduced to reflect the toxicological properties and hazard degree of the heavy metals, and the matter-element extension model was established to evaluate the pollution level of heavy metals in the surface dust of the study area. The results were compared with  $I_{geo}$ ,  $P_N$ , and RI. ① Except for Co and V, the other heavy metals were higher than the Gansu soil background values by 1.29-9.30 times. The points of Cu and Pb exceeded the rate by 100%, and Cr, Ni, and As exceeded the rate by 96.15%, 94.23%, and 96.15%, respectively. ② PMF showed that source 1 was a natural source, and its contribution rate to V was 32.12%. Source 2 was natural-traffic pollution sources, contributing 51.50% and 33.37% to Cu and Co, respectively. Source 3 was a construction waste pollution source, with contribution rates of 45.06% and 44.70% for Cr and Ni, respectively, and source 4 was a coal-traffic mixed source, with contribution rates of 49.89% and 75.25% for As and Pb, respectively. ③ The matter-element evaluation results showed that the surface dust of the bus stops was mainly class IV (moderately polluted), and 13% of sample points were still clean, 37% were moderately polluted, and 25% were slightly and heavily polluted. The results of this method were quite different from the  $P_N$  results and were more consistent with the RI results, indicating that its evaluation results were more sensitive and can be used for heavy metal pollution assessment.

**Key words:** matter-element extension model; surface dust; PMF model; toxic response coefficients; heavy metals; bus stops

城市地表灰尘是城市环境中众多污染物的源和汇,其携带的重金属污染具有隐蔽性、累积性和长期性特点,会威胁城市生态环境和危害人体健康<sup>[1-3]</sup>.近年来城市地表灰尘重金属污染研究集中在含量、污染特征和源识别方面,研究对象多为城市道路、公园和学校等场所<sup>[4-8]</sup>,有研究表明城市地表灰尘重金属源于交通污染物、燃煤飞灰和各种工业活动等<sup>[2]</sup>.随着城市化进程的加快,只有发展公共交通系统才能有效满足频繁的城市人口流动<sup>[2,3]</sup>,所以对城市交通出行特别是公共交通站点引起的地表灰尘重金属污染问题引起了部分学者的关注<sup>[3,9-14]</sup>.如城市公交

站是学生和上班族等人群乘坐公共交通工具的必经之地,但目前对其地表灰尘重金属污染研究较少<sup>[11-13]</sup>,为了针对性地防治城市环境重金属污染,识别并量化地表灰尘重金属来源至关重要<sup>[15,16]</sup>.目前,地表灰尘重金属污染来源识别方法众多,多元统计法可对重金属数据降维归类<sup>[17]</sup>,也可结合受体模型UNMIX<sup>[18]</sup>、PMF<sup>[19]</sup>和APCS/MLR<sup>[20]</sup>定量溯源重金属.

收稿日期: 2023-02-04; 修订日期: 2023-04-04

基金项目: 项目信息: 国家自然科学基金项目(41771220); 甘肃省教育科技创新基金项目(2022B-350)

作者简介: 李春艳(1994~),女,硕士,助教,主要研究方向为城市环境污染及元素地球化学, E-mail: m15117147165@163.com

\* 通信作者, E-mail: wangxm519@163.com

受体模型不仅可识别污染源类型,还能量化污染源对受体的贡献率,广泛用于重金属源解析<sup>[21]</sup>,多种源解析方法结合能客观解析重金属污染来源。但受体模型缺乏空间异质性的表达,难以展示重金属含量的空间分布规律<sup>[18]</sup>,灰尘具有的空间变异性,需要辅以地理信息系统来刻画重金属空间结构,进一步解释其来源<sup>[22,23]</sup>。

传统重金属污染评价方法以指数法为主<sup>[22]</sup>,没有考虑不同污染物源所引起的背景差别<sup>[18]</sup>,也难以凸显单一元素的质变特征<sup>[19]</sup>。而物元可拓模型通过建立重金属污染水平的含量矩阵,确定待判物元的节域和经典域矩阵<sup>[24]</sup>,利用评价指标与等级间的综合关联度确定风险等级,克服了其他评估方法失真度高和评价效率低的问题<sup>[25]</sup>,已广泛用于多指标生态环境的污染评估<sup>[26,27]</sup>。已有研究均表明,物元可拓模型较其它评价方法,具有更高精确度和可靠性<sup>[26,27]</sup>。目前关于公交站地表灰尘重金属污染的研究较少<sup>[11-13,28]</sup>,将物元可拓模型运用于地表灰尘重金属污染评价的研究鲜见报道。故本文以天水市主城区为研究区域,在采用PMF模型对研究区地表灰尘重金属来源解析的基础上,结合物元可拓模型、地累积指数、内梅罗指数和潜在生态风险指数对研究区公交站地表灰尘重金属污染程度进行对比分析,验证物元可拓模型在重金属污染评价方面的精确性和可靠性,以期为研究区环境评估及生态保护提供依据。

## 1 研究区概况

天水市(34°05'~35°10'N,104°35'~106°44'E)位于甘肃省东南部,是“关天经济区”的重要节点城市,属典型的温带大陆性季风气候类型,年均温11℃,年均降水量492 mm左右,区域内平均海拔约1 100 m,东西长约36 km,南北宽约1~3 km。河谷地形影响下形成的逆温层,冬季易形成以颗粒物污染为主的污染事件;加之近几十年来快速城市化和工业化,机动车辆和人口数量激增,使得污染物排放量增加,影响城市生态环境质量<sup>[29]</sup>。本文所研究的天水市主城区是指位于河谷盆地内,由南北两山夹持的秦州区与麦积区,其中秦州区为天水市的政治、经济和文化中心,麦积区是老工业基地,已形成机械制造、轻工食品和建材化工三大行业为主导的地方工业体系。本文选取研究区5条以上停靠线路的公交站点,所取样点周围分布商业中心、学校、医院和工业企业,乘坐公交是大部分市民日常出行的必然选择(图1)。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与测定

为确保样品的代表性和测得数据的可信度,选择研究区内5条以上停靠线路的公交站为采样点,采样时在连续天晴3 d以上无风时进行,利用毛刷和塑料铲收集公交站台及周边不透水地面表层尘土,避开低洼地带,远离明显污染源。各采样点选择4个平行样点,混合成1个样品,共采集到52个样品,每份约重50 g,密封于贴好标签的自封袋中。最后详细记录各样点经纬度坐标、周围环境状况和人流车流情况等,绘制研究区地表灰尘样点示意图(图1)。

灰尘样品剔除杂质过0.15 mm铜筛后混匀,取15 g用碳化钨磨样机(ZHM-1A)研磨至粒径小于200目,研磨样品在105℃下烘干后取4 g放入制样模具,加入硼酸镶边垫底,用30 t的半自动压样机(ZHY-401A)压成内径为32 mm的样片放入干燥器中。分析软件为SuperQ Version 5.0,分析时选用国家一级标准物质中的岩石成分分析标准物质GBW07103~GBW07114、GBW07120~GBW07122、土壤成分分析标准物质GBW07401~GBW07408、GBW0743~GBW07430和水系沉积物成分分析标准物质GBW07301a~GBW07318作为标准样品。以国标(GB/T 14506.28-93)为依据,确定最佳测试条件,本文选取Cu、Co、Pb、V、Cr、Ni和As进行分析。

### 2.2 PMF模型

本文使用US-EPA推荐的PMF 5.0程序实现重金属的源解析,PMF模型通过不断地分解原始矩阵 $X$ 来得到最优矩阵 $G$ 和 $F$ ,最终将目标函数 $Q$ 最小化<sup>[19]</sup>,定义如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj} + \delta_{ij} \quad (1)$$

式中, $X_{ij}$ 为重金属含量, $G_{ik}$ 为第 $k$ 个污染源对第 $i$ 个样品的贡献, $F_{kj}$ 为第 $k$ 个污染源中第 $j$ 个重金属元素的含量, $\delta_{ij}$ 为残差矩阵。

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \text{ 或 } Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{\delta_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (2)$$

式中, $i$ 和 $j$ 分别为样品数和化学物质种类, $p$ 为因子数目。

PMF模型运行过程不需要详细的源成分谱,只需要载入样本含量数据和样本含量对应的不确定度数据,不确定度 $u_{ij}$ 按时按如下公式计算:

当 $X_{ij} \leq \text{MDL}$ 时:

$$u_{ij} = (5/6) \times \text{MDL} \quad (3)$$

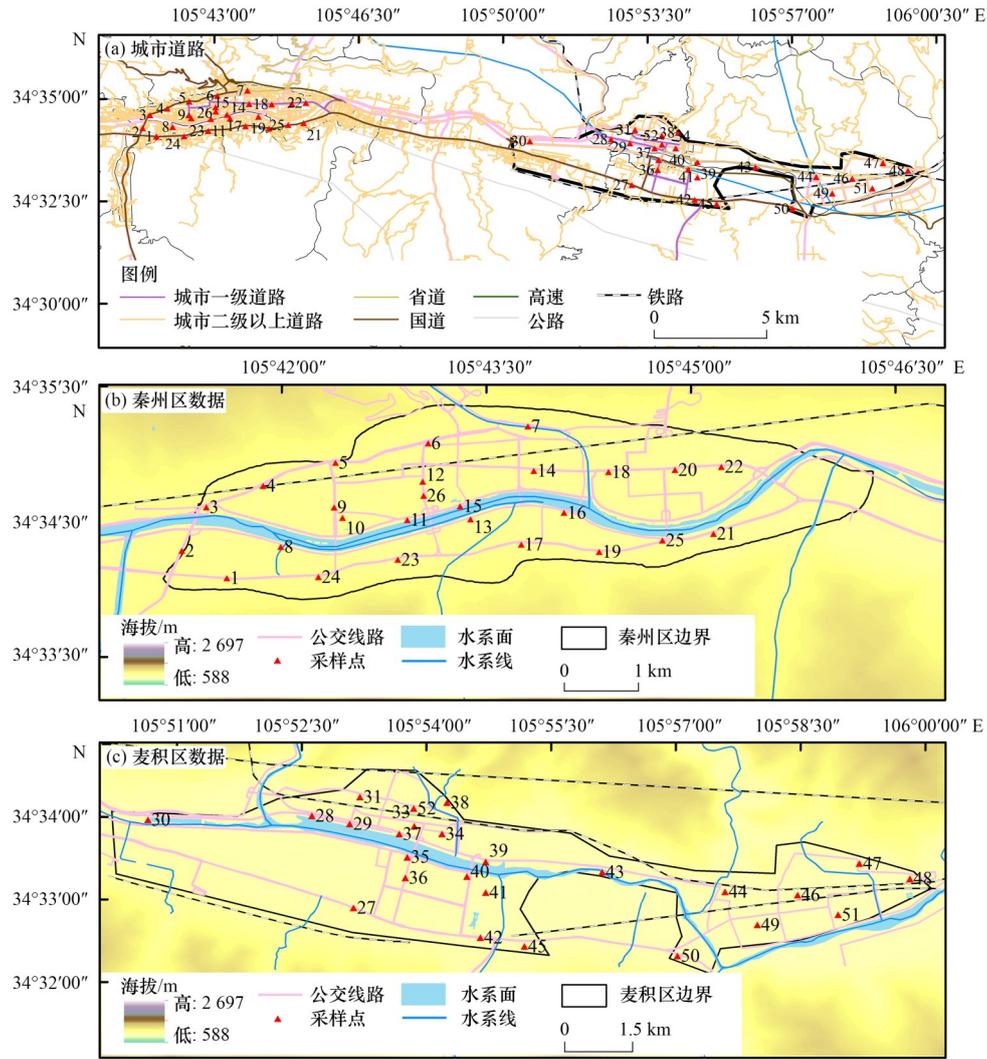


图 1 研究区域采样点分布示意  
Fig. 1 Schematic of the study area and sampling location

当  $X_{ij} > MDL$  时:

$$u_{ij} = \sqrt{(RSD \times X_{ij})^2 + MDL^2} \quad (4)$$

式中, RSD 为相对标准偏差, MDL 为检出限值<sup>[30]</sup>, 其中 Cu、Co、Pb、V、Cr、Ni 和 As 的 MDL 分别为 1.1、0.7、1.0、3.6、3.7、1.7 和 4.5  $mg \cdot kg^{-1}$ , 本文所有样品重金属的含量值都高于 MDL.

### 2.3 传统评价方法

地累积指数法<sup>[31]</sup>( $I_{geo}$ )、内梅罗综合污染指数<sup>[22]</sup>( $P_N$ )和潜在生态风险指数<sup>[32]</sup>(RI)被广泛用于地表灰尘重金属污染评价. 为检验物元可拓结果的可靠性, 使用  $I_{geo}$ 、 $P_N$  和 RI 对研究区地表灰尘重金属污染状况进行综合评价, 表示为:

$$I_{geo} = \log_2 \left( \frac{C_i}{k \times B_i} \right) \quad (5)$$

式中,  $I_{geo}$  为地累积指数,  $C_i$  为重金属的实测含量 ( $mg \cdot kg^{-1}$ ),  $B_i$  为甘肃省重金属土壤背景值<sup>[33]</sup> ( $mg \cdot kg^{-1}$ ),  $k$  取 1.5. 分级: 极严重富集 ( $5 < I_{geo}$ )、严重

富集 ( $4 < I_{geo} \leq 5$ )、偏严重富集 ( $3 < I_{geo} \leq 4$ )、中度富集 ( $2 < I_{geo} \leq 3$ )、偏中度富集 ( $1 < I_{geo} \leq 2$ )、轻微富集 ( $0 < I_{geo} \leq 1$ ) 和无富集 ( $I_{geo} \leq 0$ ).

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/B_i)_{\max}^2 + (C_i/B_i)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (6)$$

式中,  $P_N$  为综合污染指数, 分级标准: 重度污染 ( $P_N > 3$ )、中度污染 ( $2 < P_N \leq 3$ )、轻度污染 ( $1 < P_N \leq 2$ )、警戒线 ( $0.7 < P_N \leq 1$ ) 及非污染 ( $P_N \leq 0.7$ ).

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i/B_i) \quad (7)$$

式中, RI 和  $E_r^i$  分别为综合和单项生态风险指数,  $E_r^i$  分级标准: 轻微生态风险 ( $E_r^i < 10$ )、中等生态风险 ( $10 \leq E_r^i < 20$ )、强生态风险 ( $20 \leq E_r^i < 40$ )、很强生态风险 ( $40 \leq E_r^i < 80$ ) 和极强生态风险 ( $80 \leq E_r^i < 160$ ); RI 分级标准<sup>[34]</sup>: 轻微生态风险 ( $RI < 38$ )、中等生态风险 ( $38 \leq RI < 76$ )、强生态风险 ( $76 \leq RI < 152$ ) 和极强生态风险 ( $RI \geq 152$ ).

## 2.4 物元可拓分析法

### 2.4.1 建立物元矩阵

物元矩阵  $R$  由待评对象  $U$  (样点)、污染指标  $C$  (重金属) 和量值  $V$  (含量) 共同构成, 记为  $R=(U, C, V)$ , 表示为:

$$R = (U, C_n, V_n) = \begin{pmatrix} U & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

### 2.4.2 确定经典域和节域

经典域  $R(N)$  和节域  $R(P)$  的物元矩阵为:

$$R(N) = (U_i, C_n, V_n)$$

$$= \begin{pmatrix} U_i & C_1 & V_{i1} \\ & C_2 & V_{i2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{in} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_i & C_1 & (e_{i1}, f_{i1}) \\ & C_2 & (e_{i2}, f_{i2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (e_{in}, f_{in}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$R(P) = (U_p, C_n, V_p)$$

$$= \begin{pmatrix} U_p & C_1 & V_{p1} \\ & C_2 & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_p & C_1 & (e_{p1}, f_{p1}) \\ & C_2 & (e_{p2}, f_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (e_{pn}, f_{pn}) \end{pmatrix} \quad (10)$$

显然有  $(e_{pn}, f_{pn}) \subset (e_{in}, f_{in}) \quad (n=1, 2, 3, \dots, i)$ .

### 2.4.3 关联度计算

关联度  $K(V_i)$  指评价指标是否符合评价等级的归属程度,  $-1 \leq K(V_i) < 0$  (评价对象不符合标准, 但具备转化为符合标准的条件),  $K(V_i) \geq 0$  (评价对象符合标准),  $K(V_i) \leq -1$  (评价对象不符合标准)<sup>[35]</sup>, 表示为:

$$V_{ij} = |f_{in} - e_{in}| \quad (11)$$

$$\rho(V_i, V_{ij}) = |V_{dn} - (f_{in} + e_{in}) \times 0.5| - (f_{in} - e_{in}) \times 0.5 \quad (12)$$

$$\rho(V_i, V_{pn}) = |V_{dn} - (f_{pn} + e_{pn}) \times 0.5| - (f_{pn} - e_{pn}) \times 0.5 \quad (13)$$

$$K(V_i)_j = \begin{cases} \frac{-\rho(V_i, V_{ij})}{|V_{ij}|} & V_i \in V_{ij} \\ \frac{\rho(V_i, V_{ij})}{\rho(V_i, V_{pn}) - \rho(V_i, V_{ij})} & V_i \notin V_{ij} \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\rho(V_i, V_{ij})$  和  $\rho(V_i, V_{pn})$  分别为点  $V_i$  到经典域  $V_{ij}=(e_{in}, f_{in})$  和节域  $V_{pn}=(e_{pn}, f_{pn})$  的距离.

$$K_j(U) = \sum_{i=1}^n W_{ki} \times K(V_i)_j \quad (15)$$

式中,  $K_j(U)$  为综合关联度,  $W_{ki}$  为权重, 若  $K_j = \max\{K_j(U)\}$ , 则待评对象  $N$  属于重金属污染等级  $j$ .

### 2.4.4 权重修正

重金属污染评价的传统权重方法是超标倍数赋

权法<sup>[36]</sup>, 表示为:

$$W_{ki} = (X_{ki}/\bar{S}_i) / \left( \sum_{i=1}^n X_{ki} / \bar{S}_i \right) \quad (16)$$

式中,  $W_{ki}$  为常规权重,  $X_{ki}$  为实测值,  $\bar{S}_i$  为评价等级的算术平均值,  $n$  为因子个数.

引入 Hakanson 重金属毒性响应系数 ( $Cr=V=2$ ,  $Cu=Ni=Pb=Co=5$  和  $As=10$ )<sup>[32]</sup> 对常规权重进行修正, 表示为:

$$W'_{ki} = (W_{ki} \times T_r^i) / \left( \sum_{i=1}^n W_{ki} \times T_r^i \right) \quad (17)$$

式中,  $W'_{ki}$  为修正权重,  $T_r^i$  为毒性系数.

## 2.5 评价标准

结合甘肃省土壤背景值<sup>[33]</sup>、《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)<sup>[37]</sup> 及相关报道来确定重金属污染评价标准<sup>[24, 26, 27, 35, 38]</sup>. 评价分 5 级: I 级(清洁)、II 级(尚清洁)、III 级(轻度污染)、IV 级(中度污染)和 V 级(重度污染), I 级上限值为甘肃省土壤背景值; II 级上限值为管制值的 0.3 倍; III 级上限值为管制值的 0.7 倍; IV 级上限值为管制值; V 级上限值为管制值的 1.3 倍<sup>[22, 26, 35, 38]</sup>.

## 3 结果与分析

### 3.1 灰尘重金属含量统计

研究区公交站点地表灰尘重金属的含量统计结果如表 1 所示. 各重金属的均值依次为:  $Pb > Cr > V > Cu > Ni > As > Co$ , 其中  $Pb$  的总量极值差距最大, 最大与最小值的比值达到 16.48,  $Co$  最小, 比值为 1.93, 说明  $Pb$  拥有较多异常高值. 除  $Co$ 、 $V$  和  $Ni$  外,  $Cu$ 、 $Pb$ 、 $Cr$  和  $As$  的含量平均值都高于甘肃省土壤背景值, 为背景值的 1.29 ~ 9.30 倍; 其中  $Cu$  和  $Pb$  的点超标率为 100% (超过研究区背景值样本数占总样本数的百分比),  $Cr$ 、 $Ni$  和  $As$  各为 96.15%、94.23% 和 96.15%,  $Co$  和  $V$  未超标. 变异系数 (CV) 能够反映数据的离散程度,  $CV < 16\%$  为弱变异,  $CV$  处于 16% ~ 30% 之间为中等变异,  $CV > 30\%$  为强变异<sup>[28]</sup>, 各重金属的  $CV$  依次为:  $Pb > As > Cu > Cr > Ni > Co > V$ , 其中  $Pb$ 、 $As$  和  $Cu$  的  $CV$  大于 30%, 表明其空间变异和离散程度最大, 可能受人为活动影响最大;  $Cr$  和  $Ni$  的  $CV$  在 16% ~ 30% 之间, 为中等强度变异, 可能同时受到成土母质和人为活动的影响;  $Co$  和  $V$  的  $CV$  在 16% 以下, 为弱变异, 说明其空间分布相对均匀. 由此可见, 研究区地表灰尘重金属出现了一定程度的超标现象, 尤其是  $Cu$  和  $Pb$  元素, 存在灰尘重金属污染风险.

与已有相关研究对比发现 (表 2), 石家庄市公交

表1 地表灰尘重金属含量统计

Table 1 Statistics of heavy metal contents in bus stop dusts

统计量	Cu	Co	Pb	V	Cr	Ni	As
最小值/mg·kg <sup>-1</sup>	28.36	6.27	49.68	50.03	57.10	18.87	11.00
最大值/mg·kg <sup>-1</sup>	121.57	12.08	807.07	72.10	177.85	66.94	47.29
平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	52.11	8.02	166.48	60.41	89.24	27.79	18.95
标准差/mg·kg <sup>-1</sup>	18.37	0.96	146.86	4.66	25.60	7.64	6.78
变异系数/%	35	12	88	8	29	27	36
超标比例/%	100	0	100	0	96.15	94.23	96.15
背景值 <sup>[33]</sup> /mg·kg <sup>-1</sup>	23.4	12.4	17.9	81.9	69.3	34.4	11.7

站点地表灰尘 Cu 和 Pb 污染与交通有关<sup>[11]</sup>,北京和兰州市 Cu、Pb 和 Cr 的含量较高<sup>[12,14]</sup>,福州市 Cu 的含量平均值是本研究区的 2.67 倍<sup>[13]</sup>,庆阳市 Co 污染严重<sup>[28]</sup>,武汉地铁站灰尘中 Pb、Cu 和 Cr 为严重污染<sup>[10]</sup>,西安汽车站 Pb 污染严重<sup>[16]</sup>,伊洛林汽车站 Cr 和 As 污

染严重<sup>[3]</sup>,青岛火车站 Cu 污染严重<sup>[9]</sup>. 总体而言,与其它城市公交站<sup>[11-14,28]</sup>、地铁站<sup>[10]</sup>、汽车站<sup>[3,16]</sup>和火车站<sup>[9,15]</sup>地表灰尘重金属含量值相比,本研究区 Pb 偏高,Cu 和 Co 偏低,V、Cr、Ni 和 As 居中,故对环境危害大的重金属需进一步作来源解析.

表2 不同城市灰尘重金属含量比较<sup>1)</sup>/mg·kg<sup>-1</sup>Table 2 Comparison of heavy metal contents in dust of different cities/mg·kg<sup>-1</sup>

城市	Cu	Co	Pb	V	Cr	Ni	As	灰尘类型	文献
石家庄	69.75	—	44.49	—	46.27	—	—	公交站	[11]
北京	206.94	14.65	107.98	78.96	128.13	56.68	—	公交站	[12]
福州	138.96	5.13	112.73	—	106.49	21.20	—	公交站	[13]
庆阳	32.10	27	43.70	—	56.60	18.20	9.60	公交站	[28]
武汉	103.37	9.71	72.23	—	135.33	38.65	7.90	地铁站	[10]
兰州	123.75	—	131.25	—	188.63	—	33.38	BRT	[14]
西安	36.30	—	107.70	46.80	—	23.30	—	汽车站	[16]
青岛	120.33	—	62.94	—	55.42	37.04	—	火车站	[9]
徐州	46.29	—	43.07	—	60.06	—	—	火车站	[15]
伊洛林	22.65	—	28.65	—	108.23	—	42.38	汽车站	[3]
天水	52.11	8.02	166.48	60.41	89.24	27.79	18.95	公交站	本研究

1)“—”表示文献中没有相关数据

### 3.2 基于 PMF 模型的源解析

#### 3.2.1 相关性分析

相关性分析对 PMF 模型解析结果的合理性以及污染源类型的判断有很大帮助<sup>[21]</sup>. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 为土壤母质风化形成的主要产物,与其相关性较高的元素常被判断为自然源<sup>[22]</sup>,由表 3 可知,Co-MgO 和 V-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的相关系数较高,分别为 0.86 和 0.85,且通过了 0.01 水平的检验.由表 1 可知,V 和 Co 元素点位超标率为 0 且为弱变异,说明含量受彼此影响较大,其来源具有一致性,初步考虑受成土母质的影响. Cr-Co(0.67)、Ni-Co(0.89)和 Cr-Ni(0.66)的相关系数较高,且与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 的相关性较高( $P < 0.01$ ),说明这 3 种元素两两相关性很高,可能具有同源性. As-Pb 的相关系数为 0.65( $P < 0.01$ ),指示可能具有相同的来源. Cu 与成土母质主量元素的相关性较低,且与其它元素的相关性也较低,故难以通过重金属间的相关系数判断其污染来源,具体来源需作进一步分析.

#### 3.2.2 PFM 模型

在 PFM 模型中测试了不同数量的污染源,将重金属含量数据导入 EPA PMF 5.0 软件后,模型运行了 20 次,根据最小  $Q$  值选择 4 个最优因子作为 PMF 模型的最佳结果,所有元素的信噪比(S/N)均大于 2, $Q_{robust}/Q_{true}$  之间趋于收敛,残差在 -3 ~ 3 之间,表明数据质量合理,故这 4 个因子得出的解析结果是可信的.

由表 4 可知,因子 1 对 V 的贡献率为 32.12%,V 通常为地壳的标志元素,受全新世近期黄土的影响,在成土过程和土壤母质中均广泛存在<sup>[39]</sup>. 利用 ArcGIS 10.4 对 PMF 模型得到的各源在各采样点贡献值进行反距离插值,得到研究区不同污染源的分布(图 2).由图 2 可知,因子 1 源贡献高值区域分布在山脚和河流拐弯汇集处,该区域附近无工业企业分布,地势低洼,重金属易受到水流冲击的影响而富集并迁移<sup>[40]</sup>;表 1 重金属含量统计表明,所有样点 V 的含量都低于甘肃省土壤背景值,超标率为 0 且为弱变异,受人为活动影响较小,指示其来源主要与自然成

表 3 各重金属之间的相关系数<sup>1)</sup>  
Table 3 Correlation coefficients among heavy metals

	Cu	Co	Pb	V	Cr	Ni	As	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Cu	1								
Co	-0.11	1							
Pb	0.16	-0.30*	1						
V	-0.30*	0.22	-0.05	1					
Cr	0.18	0.67**	-0.09	-0.10	1				
Ni	-0.02	0.89**	-0.14	0.03	0.66**	1			
As	0.19	-0.09	0.65**	0.03	0.01	-0.02	1		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.69**	0.21	0.85**	0.47**	0.30*	0.35*	1	
MgO	-0.13	0.86**	-0.24	0.27	0.49**	0.75**	-0.06	0.32*	1

1)\*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$

表 4 PMF 模型各源成分谱及其贡献率  
Table 4 Contribution rates and components of different sources by PMF model

项目	因子	Cu	Co	Pb	V	Cr	Ni	As
源成分谱/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1	0.78	1.76	0.00	19.35	0.00	3.97	1.84
	2	24.74	2.67	0.00	18.67	37.98	8.31	2.62
	3	8.75	2.54	35.03	11.67	39.25	12.25	4.86
	4	13.77	1.03	106.53	10.56	9.87	2.87	9.28
源贡献率/%	1	1.62	21.97	0	32.12	0	14.50	9.91
	2	51.50	33.37	0	30.99	43.60	30.33	14.06
	3	18.22	31.73	24.75	19.36	45.06	44.70	26.14
	4	28.66	12.94	75.25	17.52	11.33	10.48	49.89

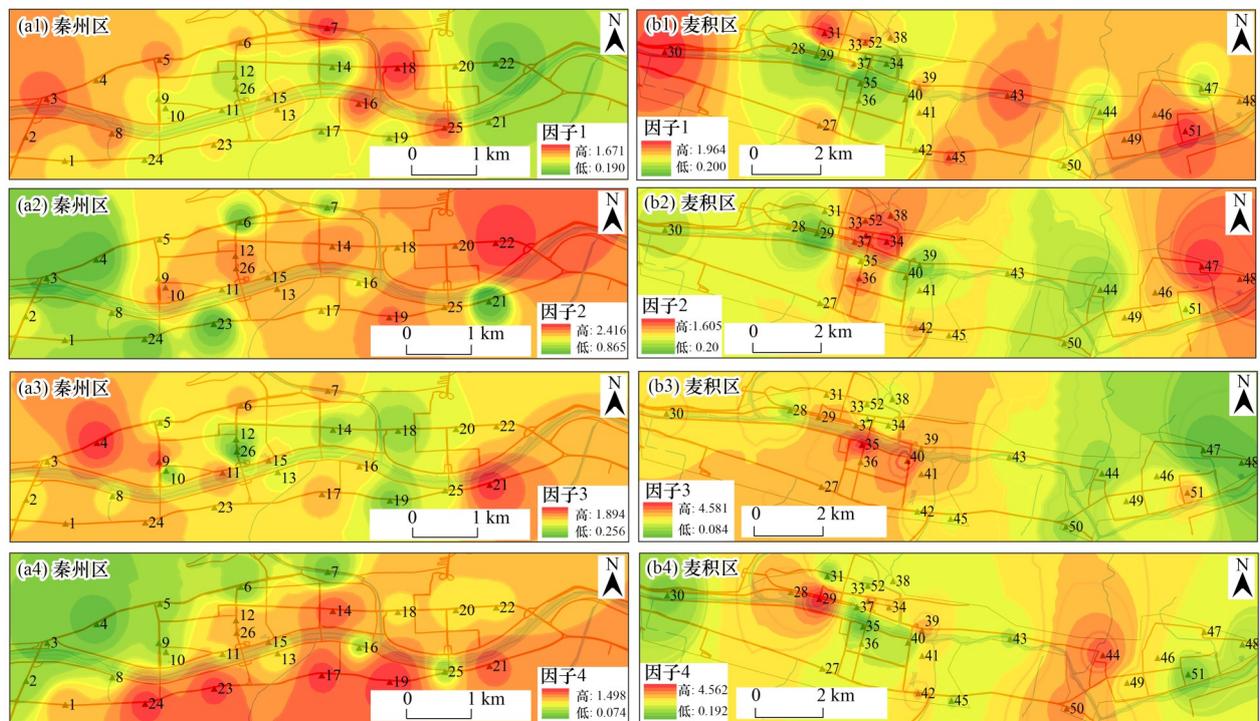


图 2 PMF 因子贡献空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of factor contributions from the PMF model

土母质有关,与相关性分析结果一致. 故将因子 1 归结为自然源.

因子 2 对 Cu 和 Co 的贡献率分别为 51.50% 和

33.37%. Co 的来源与铅锌矿和铁矿有关<sup>[40]</sup>,也有研究表明 Co 受到成土母质的影响<sup>[41]</sup>,但本文 Co 超标率为 0 且为弱变异,指示其来源于成土母质. 公交站开放

环境使灰尘受外部条件影响大,如大气沉降更易造成重金属污染物的累积,轮胎和刹车摩擦释放的超细颗粒物是造成重金属含量偏高的重要原因<sup>[42]</sup>. Cu可能来源于汽车部件的磨损、润滑油添加剂和抗氧化材料<sup>[43]</sup>. 结合图2发现,因子2高值区域集中分布在主城区主要交通线路附近,如藉河北路—大众中路、藉河南路—天庆路和成纪大道西路—罗玉路交界处等,这些区域有大型商业中心、高校及汽修、水泥和道路材料公司,人口密度大,公交线路密集,交通流量大,车辆行驶过程中有汽车轮胎和刹车片等金属零部件的磨损和老化,同时汽修中心零件的搬运和装卸可能会释放不同含量的Cu,含Cu量较高的颗粒物都会释放至大气环境中,随扬尘富集在公交站. 故将因子2归为自然-交通污染混合源.

因子3对Cr和Ni的贡献率分别为45.06%和44.70%. Cr和Ni主要受成土母质的影响<sup>[44]</sup>,但本文Cr和Ni的超标率分别为96.15%和94.23%,指示其主要受人类活动影响. Cr和Ni因优异的耐腐蚀性质用于制作不锈钢和电镀加工等建筑材料,同时也是生产路基和楼盘建筑材料(混凝土、砖块和玻璃等)的重要组成物质<sup>[45]</sup>,城市环境中的Cr污染可能与含Cr合金部件的磨损有关,Ni主要来自于城市社会经济活动,如拆除及装修项目中产生的建筑垃圾<sup>[46]</sup>. 结合图2发现,因子3高值样点集中在秦-麦两区交界处及城区边缘,经实地调查,该区域有大面积的道路翻新、老旧建筑的拆除以及大量的在建楼盘活动,在修缮城市道路、在建楼盘以及拆除老旧小区的过程中,加工、运输和使用建筑材料同时也会产生大量的废料,如文献<sup>[46]</sup>通过浸出实验,在混凝土和水泥混合物中检测到重金属As、Cr、Hg和Ni,并指出建筑垃圾中重金属的污染特征很大程度取决于建筑垃圾的来源. Cr和Ni污染源于建筑工地的扬尘颗粒沉降,因子3为建筑废弃物污染源.

因子4对As和Pb的贡献率分别为49.89%和75.25%. 城市地表灰尘中的As主要与燃煤有关<sup>[47]</sup>,本文As超标率96.15%,自天水市政府“燃煤锅炉提标改造行动计划”实施以来,各企业响应实施锅炉煤改气项目,但部分区域在金属冶炼及冬季取暖时仍以燃煤为重要能源,故As源于燃料燃烧产生的烟气沉降. Pb是交通污染的象征<sup>[48]</sup>,汽油中常加四乙基铅作为防爆剂,绝大部分被分解成无机铅盐及铅的氧化物,随汽车尾气排出后经大气沉降进入不透水地面富集<sup>[49]</sup>;虽然已禁止生产和使用含铅汽油,但无铅汽油是含铅量在 $0.013 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下的汽油,且Pb的半衰期长达几百年,仍累积在地表环境<sup>[50]</sup>. 由图2可知,因子4高值区域主要集中在秦州区,秦州区为天水市

政治、经济和文化中心,市区中心交通路网密集,集中了大部分城市一级及以上道路,有贯穿全市的国道和公路,人口和交通流量大,同时公交站附近分布加油站、学校和医院等,交通车辆停启频率高;此外,受天水市主导风向的影响,释放的颗粒物可随风向沉降到地表,故将因子4归为燃煤-交通活动混合源.

## 4 地表灰尘重金属污染评价

### 4.1 传统方法重金属污染评价及结果

地累积指数( $I_{\text{geo}}$ )可辨别灰尘重金属的富集状况(图3). 研究区公交站地表灰尘重金属 $I_{\text{geo}}$ 平均值依次为:  $\text{Pb}(2.20) > \text{Cu}(0.52) > \text{As}(0.03) > \text{Cr}(-0.17) > \text{Ni}(-0.83) > \text{V}(-0.90) > \text{Co}(-1.13)$ ,其中Pb呈中度富集状态,点位富集以偏中度和中度富集为主,偏中度和中度富集的样点占比分别34.62%和36.54%,部分样点为极严重富集;Cu轻度富集样点占比为76.92%,As轻度富集样点占比为44.23%,Co、V、Cr和Ni则以无富集为主,指示Pb、Cu和As为主要富集因子.

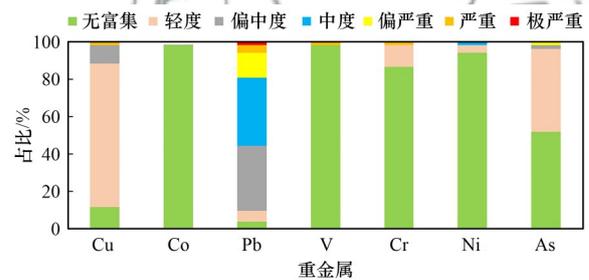


图3 不同重金属 $I_{\text{geo}}$ 评价结果

Fig. 3 Evaluation results of  $I_{\text{geo}}$  on different heavy metals

研究区公交站地表灰尘重金属 $P_N$ 平均值为9.63,属重度污染,其中Pb对 $P_N$ 的贡献最大,已达到重度污染等级,Cu也达到了中度污染;所有样点的 $P_N$ 值都大于3,这说明研究区公交站地表灰尘重金属以重度污染为主,表明人类活动对公交站的干扰较强烈. RI平均值为95.41,属强度生态风险,各重金属平均潜在生态风险依次为:  $\text{Pb}(46.50) > \text{As}(16.19) > \text{Cu}(11.13) > \text{Ni}(4.04) > \text{Co}(3.23) > \text{Cr}(2.58) > \text{V}(1.48)$ ,其中Pb对RI的贡献最大,已达到强生态风险,Cu和As也达到了中等生态风险,Pb、As和Cu为主要生态因子. 56%样点的RI在38~76之间,为中度生态风险状态,38%样点的RI在76~152之间,呈强生态风险状态,仅有6%样点的RI高于152,呈极强生态风险.

### 4.2 物元可拓法重金属污染评价

#### 4.2.1 重金属权重修正

将研究区7种重金属修正权重( $W'_{ki}$ )与传统超标倍数赋权权重( $W_{ki}$ )进行对比分析(图4). 由图可

知,各采样点重金属元素的权重值均有显著变化,除 V 和 Cr 元素的  $W'_{ki}$  较  $W_{ki}$  有所降低,其降幅分别为 66.56% 和 68.61%, Cu、Co、Pb、Ni 和 As 的  $W'_{ki}$  较  $W_{ki}$  均有不同程度增加,其增幅依次为:As>Ni>Co>Cu>Pb,其中 As 的权重变化最为明显,为 65.25%,Pb 的增幅最小,为 28.15%。由此可见,引入了 Hakanson 毒性响应系数,  $W'_{ki}$  值与各重金属的毒性

响应系数呈正比,7 种重金属  $W'_{ki}$  变化幅度与其毒性系数的大小一致,毒性越小,权重的降幅越大,合理体现不同毒性元素的权重变化。故  $W'_{ki}$  值不仅考虑了重金属的毒性效应,还体现了不同重金属标准值的差异,即凸显了低含量高毒性重金属的毒性作用,更能反映地表灰尘重金属污染的实际状况。

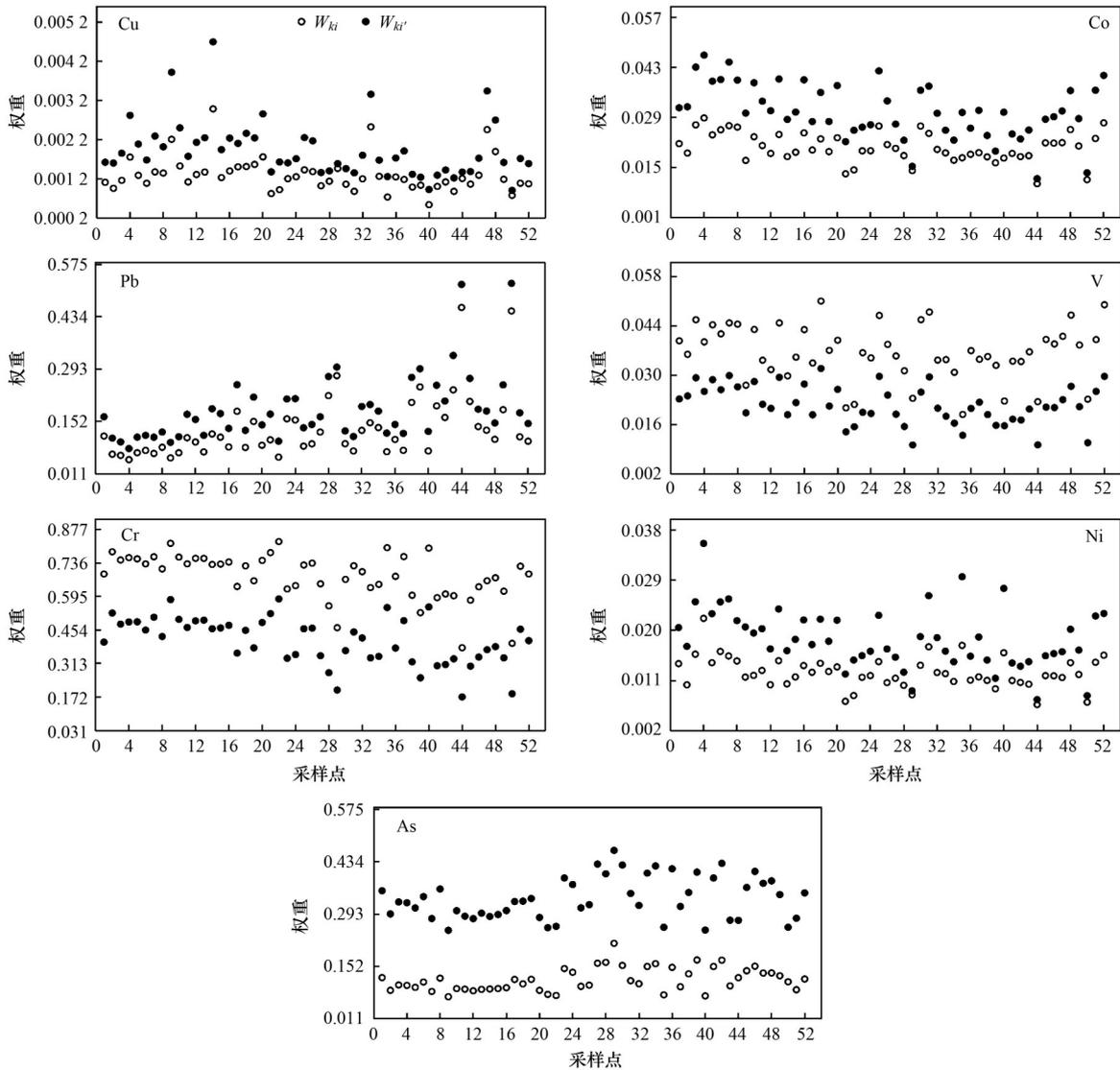


图 4 研究区灰尘重金属元素权重值对比分析

Fig. 4 Comparative analysis of the weight values of surface dust heavy metals in the study area

#### 4.2.2 物元可拓法重金属污染评价及结果

由于物元可拓法运算过程较复杂,现以 1 号采样点  $M_1$  为例进行计算,其过程如下 [ $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Co})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{V})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$  和  $\omega(\text{As})$  分别为 40.95、7.88、120.27、62.21、81.76、28.96 和 17.93  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ].

##### 4.2.2.1 建立物元矩阵

1 号样点( $M_1$ )的物元矩阵为:

$$R_1 = \begin{pmatrix} M_1 & \text{Cu} & 40.95 \\ & \text{Co} & 7.88 \\ & \text{Pb} & 120.27 \\ & \text{V} & 62.21 \\ & \text{Cr} & 81.76 \\ & \text{Ni} & 28.96 \\ & \text{As} & 17.93 \end{pmatrix}$$

##### 4.2.2.2 建立经典域和节域物元矩阵

依据前文地表灰尘重金属污染分级标准建立经

典域和节域物元矩阵:

$$R(N_1) = \begin{pmatrix} N_1 & C_{Cu} & (0, 23.4) \\ & C_{Co} & (0, 12.4) \\ & C_{Pb} & (0, 17.9) \\ & C_V & (0, 81.9) \\ & C_{Cr} & (0, 69.3) \\ & C_{Ni} & (0, 34.4) \\ & C_{As} & (0, 11.7) \end{pmatrix}$$

$$R(N_2) = \begin{pmatrix} N_2 & C_{Cu} & (23.4, 10\ 800) \\ & C_{Co} & (12.4, 105) \\ & C_{Pb} & (17.9, 120) \\ & C_V & (81.9, 450) \\ & C_{Cr} & (69.3, 70.2) \\ & C_{Ni} & (34.4, 600) \\ & C_{As} & (11.7, 42) \end{pmatrix}$$

$$R(N_3) = \begin{pmatrix} N_3 & C_{Cu} & (10\ 800, 25\ 200) \\ & C_{Co} & (105, 245) \\ & C_{Pb} & (120, 280) \\ & C_V & (450, 1\ 050) \\ & C_{Cr} & (70.2, 74.1) \\ & C_{Ni} & (600, 1\ 400) \\ & C_{As} & (42, 98) \end{pmatrix}$$

$$R(N_4) = \begin{pmatrix} N_4 & C_{Cu} & (25\ 200, 36\ 000) \\ & C_{Co} & (245, 350) \\ & C_{Pb} & (280, 2500) \\ & C_V & (1\ 050, 1\ 500) \\ & C_{Cr} & (74.1, 78) \\ & C_{Ni} & (1\ 400, 2\ 000) \\ & C_{As} & (98, 140) \end{pmatrix}$$

$$R(N_5) = \begin{pmatrix} N_5 & C_{Cu} & (36\ 000, 46\ 800) \\ & C_{Co} & (350, 455) \\ & C_{Pb} & (2\ 500, 3\ 250) \\ & C_V & (1\ 500, 1\ 950) \\ & C_{Cr} & (78, 101.4) \\ & C_{Ni} & (2\ 000, 2\ 600) \\ & C_{As} & (140, 182) \end{pmatrix}$$

$$R(P) = \begin{pmatrix} N_P & C_{Cu} & (0, 46\ 800) \\ & C_{Co} & (0, 455) \\ & C_{Pb} & (0, 3\ 520) \\ & C_V & (0, 1\ 950) \\ & C_{Cr} & (0, 101.4) \\ & C_{Ni} & (0, 2\ 600) \\ & C_{As} & (0, 182) \end{pmatrix}$$

#### 4.2.2.3 评定污染等级

根据公式计算出 52 个待评物元各重金属元素评

价等级的单指标关联度  $[K(V_i)]$ , 当  $K(V_i) > 0$  时, 表示评价对象符合标准, 值越大则与评价等级的符合度越高. 对于同一评价对象, 不同指标的  $K(V_i)$  不同, 表现出物元的不相容性. 结合  $W'_i$  在  $K(V_i)$  的基础上计算综合关联度  $[K_j(U)]$  并进行污染等级评定.

以 1 号样点为例, 其综合指标关联度依次为  $-0.199$ 、 $0.288$ 、 $-0.426$ 、 $-0.714$  和  $-0.799$ , 其中  $\max\{K_j(N)\} = 0.288$ , 按照评价标准, 可以得出  $M_1$  号样点属于 II 级, 呈尚清洁状态, 依照上述方法计算天水市主城区 52 个待评物元地表灰尘重金属的污染等级. 结果发现, 有 7 个样点在 II 级的综合关联度最大, 占总样点的 13%, 按照评价标准属于 II 级(尚清洁); 有 13 个样点在 III 级的综合关联度最大, 占总样点的 25%, 属于 III 级(轻度污染); 有 19 个样点在 IV 级的综合关联度最大, 占总样点的 37%, 属于 IV 级(中度污染); 有 13 个样点在 V 级的综合关联度最大, 占总样点的 25%, 属于 V 级(重度污染); 没有 I 级清洁状态. 整体来看, 研究区公交站地表灰尘重金属污染等级以中度污染为主, Pb 为主要污染因子.

## 5 讨论

以上评价方法各有侧重, 故计算结果存在部分差异. 物元可拓模型计算结果中尚清洁占 13%, 中度污染占 37%, 轻度和重度污染各占 25%;  $I_{geo}$  结果指示 Pb、Cu 和 As 为主要富集因子, Pb 以偏中度-中度污染为主;  $P_N$  重度污染样品占 100%, RI 中等生态风险样品占 56%, 强生态风险样品占 38%, 极强生态风险样品占 6% (图 5). 综合来看, 物元可拓法和传统方法评价结果的共同点为 Pb 是主要污染因子, 但物元可拓法与  $P_N$  结果差异较大, 和 RI 评价结果较为相似, 物元可拓模型评价结果为 4 级,  $P_N$  为 1 级, RI 为 3 级. 出现这种现象的原因是由于物元可拓由重金属含量及毒性响应系数依次赋权, 既考虑了重金属对环境背景值的富集程度和在土壤环境质量标准下环境容量的污染程度, 也反映区域地表灰尘不同重金属元素累积对生态环境的负面影响; 而  $P_N$  突出了高浓度污染物的作用, 未考虑不同重金属的毒性差异, 评价结果明显高于其他方法; RI 结合毒性系数和环境背景值, 评价结果较  $P_N$  更为科学. 综合来看, 物元可拓模型评价结果更为客观.

此外, 物元可拓模型通过界定评价指标经典域的区间, 利用单指标的关联函数获取单指标状态, 再通过模型集成和修正权重得到多指标综合水平, 提高了评价的科学性; 其关联度函数逻辑域可取负值, 克服了评价过程中的不确定性和模糊性<sup>[22]</sup>, 且关联度函数计算公式固定, 不涉及取最值的模糊运算和

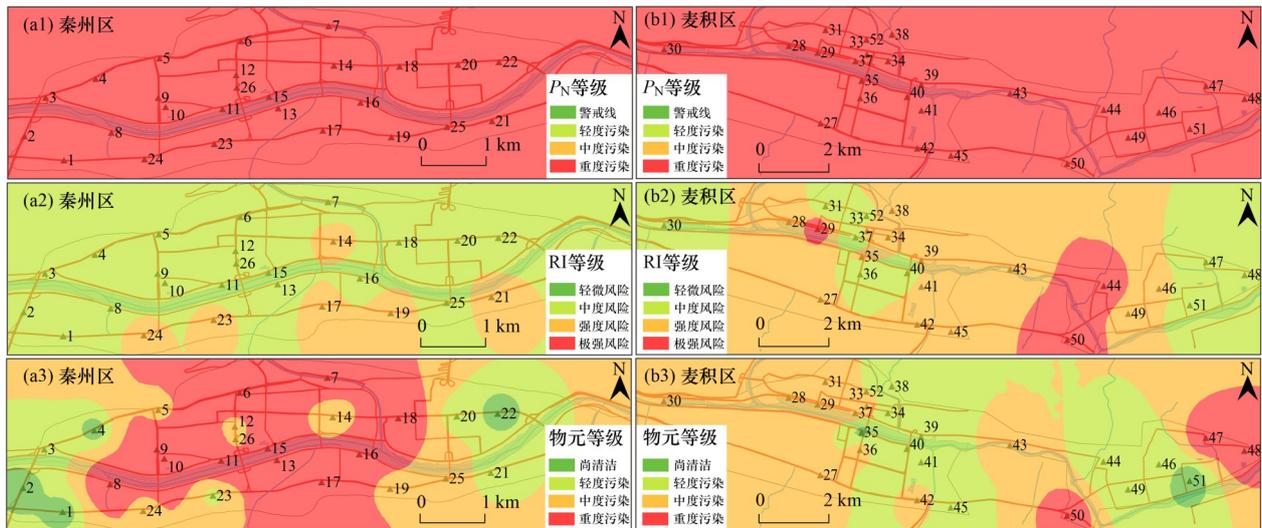


图5 研究区地表灰尘重金属污染等级评价空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of heavy metal pollution grade of surface dust in the study area

构造隶属函数,不会造成信息丢失能全面分析重金属的污染程度<sup>[35]</sup>。综上,相较于传统的重金属污染评价方法,物元可拓模型既能反映重金属含量超标情况及毒性效应在评价等级中的占比和影响,也不会造成信息的丢失,评价结果则更准确客观,相关研究也证实了物元可拓模型可用于地表灰尘重金属的污染评价<sup>[35,38]</sup>。

## 6 结论

(1)研究区公交站地表灰尘重金属含量平均值依次为:  $Pb > Cr > V > Cu > Ni > As > Co$ ,其中  $Cu$  和  $Pb$  的超标率 100%,  $Cr$ 、 $Ni$  和  $As$  分别为 96.15%、94.23% 和 96.15%,  $Co$  和  $V$  未超标,  $Pb$ 、 $As$  和  $Cu$  为强变异,指示其与强烈的人为干扰有关。

(2)相关性分析和 PMF 模型结果表明,研究区污染源主要为自然源、自然-交通混合源、建筑废弃物污染源和燃煤-交通混合源,其中  $V$  为自然来源,  $Cu$  和  $Co$  为自然-交通混合源,  $Cr$  和  $Ni$  为建筑废弃物污染源,  $As$  和  $Pb$  受燃煤-交通混合源的控制。

(3)修正权重后的物元可拓模型结果显示,研究区占仅有 13% 样点的地表灰尘为尚清洁,中度污染占 37%,轻度和重度污染各占 25%,  $Pb$  为主要污染因子。与  $P_n$  和  $RI$  相比,  $P_n$  评价结果偏高,与  $RI$  结果较为相似,证明其结合重金属含量和毒性来评价较准确客观,可用于地表灰尘重金属污染评价。

### 参考文献:

- [1] Pekey H, Dogan G. Application of positive matrix factorisation for the source apportionment of heavy metals in sediments: a comparison with a previous factor analysis study [J]. *Microchemical Journal*, 2013, **106**: 233-137.
- [2] Shi G T, Chen Z L, Bi C J, *et al.* A comparative study of health risk of potentially toxic metals in urban and suburban road dust in

the most populated city of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(3): 764-771.

- [3] Orosun M M, Oniku S A, Peter A, *et al.* Magnetic susceptibility measurement and heavy metal pollution at an automobile station in Ilorin, North-central Nigeria [J]. *Environmental Research Communications*, 2020, **2**(1), doi: 10.1088/2515-7620/ab636a.
- [4] Men C, Liu R M, Wang Y F, *et al.* Impact of particle sizes on health risks and source-specific health risks for heavy metals in road dust [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, **29**(50): 75471-75486.
- [5] 耿雅妮, 梁青芳, 杨宁宁, 等. 宝鸡市城区灰尘重金属空间分布、来源及健康风险 [J]. *地球与环境*, 2019, **47**(5): 696-706.  
Geng Y N, Liang Q F, Yang N N, *et al.* Distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in dusts of the urban area of the Baoji city [J]. *Earth and Environment*, 2019, **47**(5): 696-706.
- [6] Li H H, Chen L J, Yu L, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 1076-1084.
- [7] 江英辉, 张华, 丁明军, 等. 南昌市街道灰尘重金属时空分布特征及健康风险评估 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(4): 849-861.  
Jiang Y H, Zhang H, Ding M J, *et al.* Spatial-temporal distribution and health risk assessment of heavy metals in street dust of Nanchang [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(4): 849-861.
- [8] Nargis A, Habib A, Islam N, *et al.* Source identification, contamination status and health risk assessment of heavy metals from road dusts in Dhaka, Bangladesh [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **121**: 159-174.
- [9] 朱磊, 贾永刚, 潘玉英. 青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3663-3668.  
Zhu L, Jia Y G, Pan Y Y. Study on pollution evaluation of heavy metal in surface soil of the original site of Qingdao North station [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(9): 3663-3668.
- [10] 臧传子. 武汉市地铁站灰尘中重金属的污染特征及健康风险研究 [D]. 武汉: 长江大学, 2022.

- Zang C Z. The research of heavy metals pollution and health risk in dust of the subway station in Wuhan City [D]. Wuhan: Yangtze University, 2022.
- [11] 王可, 左书梅, 李昆, 等. 石家庄市公交站点尘土重金属的生物可给性及人体健康风险评估[J]. 科学技术与工程, 2020, **20**(35): 14737-14742.
- Wang K, Zuo S M, Li K, *et al.* Bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in the dusts in bus stops in Shijiazhuang city [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, **20**(35): 14737-14742.
- [12] Zheng X X, Zhao W J, Yan X, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of airborne heavy metals collected from Beijing bus stations [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(8): 9658-9671.
- [13] 李小飞, 陈志彪, 张永贺, 等. 福州市公交枢纽站地表灰尘重金属含量、来源及其健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(8): 906-912.
- Li X F, Chen Z B, Zhang Y H, *et al.* Concentrations, sources and health risk assessments of heavy metals in ground surface dust from urban bus terminals of Fuzhou city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(8): 906-912.
- [14] 李军, 李开明, 位静, 等. 兰州BRT沿线站台灰尘及其两侧绿化带土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 地球与环境, 2022, **50**(2): 228-240.
- Li J, Li K M, Wei J, *et al.* Contaminations and health risks of heavy metals from the roadside greenbelt soils and dust along the BRT platform in Lanzhou [J]. *Earth and Environment*, 2022, **50**(2): 228-240.
- [15] 刘静, 宋均轲. 徐州市城市生活垃圾重金属污染程度及空间分布[J]. 北方环境, 2012, **27**(5): 109-111.
- Liu J, Song J K. Degree and spatial distribution of heavy metals pollution of municipal solid waste in the city of Xuzhou [J]. *Northern Environment*, 2012, **27**(5): 109-111.
- [16] 田东凡, 卢新卫, 景一鸣, 等. 西安市汽车站地表灰尘中重金属的污染评价及其来源识别[J]. 水土保持通报, 2017, **37**(1): 34-39.
- Tian D F, Lu X W, Jing Y M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and source identification in surface dust at urban coach stations in Xi'an city [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, **37**(1): 34-39.
- [17] 董立宽, 方斌. 茶园土壤重金属乡镇尺度下空间异质性分析——以江浙优质名茶种植园为例[J]. 地理研究, 2017, **36**(2): 391-404.
- Dong L K, Fang B. Analysis of spatial heterogeneity of soil heavy metals in tea plantation: case study of high quality tea garden in Jiangsu and Zhejiang [J]. *Geographical Research*, 2017, **36**(2): 391-404.
- [18] 吕建树. 烟台海岸带土壤重金属定量源解析及空间预测[J]. 地理学报, 2021, **76**(3): 713-725.
- Lü J S. Source apportionment and spatial prediction of heavy metals in soils of Yantai coastal zone [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(3): 713-725.
- [19] Guan Q Y, Wang F F, Xu C Q, *et al.* Source apportionment of heavy metals in agricultural soil based on PMF: a case study in Hexi Corridor, Northwest China [J]. *Chemosphere*, 2018, **193**: 189-197.
- [20] Li Y, Zhou S L, Liu K, *et al.* Application of APCA-MLR receptor model for source apportionment of char and soot in sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141165.
- [21] 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.
- [22] 胡梦璐, 李春艳, 李娜娜, 等. 基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2457-2468.
- Hu M J, Li C Y, Li N N, *et al.* Using the matter-element extension model to assess heavy metal pollution in topsoil in parks in the main district park of Lanzhou city [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2457-2468.
- [23] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for environmental scientists* [M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- [24] Wang W Q, Lyu S R, Zhang Y D, *et al.* A risk assessment model of coalbed methane development based on the matter-element extension method [J]. *Energies*, 2019, **12**(20), doi: 10.3390/en12203931.
- [25] Xiao Q, Wan S S, Lu F C, *et al.* Risk assessment for engagement in sharing economy of manufacturing enterprises: a matter-element extension based approach [J]. *Sustainability*, 2019, **11**(17), doi: 10.3390/su11174774.
- [26] 赵艳玲, 石娟娟, 何厅厅, 等. 基于物元可拓法的土壤重金属污染评价[J]. 金属矿山, 2014, (2): 159-165.
- Zhao Y L, Shi J J, He T T, *et al.* Evaluation of soil heavy metal pollution based on the matter-element extension method [J]. *Metal Mine*, 2014, (2): 159-165.
- [27] 赵杰, 罗志军, 赵弯弯, 等. 基于改进物元可拓模型的鄱阳湖区耕地土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(3): 521-533.
- Zhao J, Luo Z J, Zhao W W, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in arable soils in the Poyang Lake area based on the improved matter-element extension method [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(3): 521-533.
- [28] 武永福. 黄土高原塬区公交站灰尘污染物富集特征及风险评估——以庆阳市为例[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [29] 王芳龙, 李忠勤, 杨宏, 等. 天水市大气颗粒物输送通道及污染源区研究[J]. 环境化学, 2020, **39**(9): 2371-2383.
- Wang F L, Li Z Q, Yang H, *et al.* Study on atmospheric particulate matter transport channel and pollution source area in Tianshui city [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(9): 2371-2383.
- [30] 刘江斌, 党亮, 和振云. X射线荧光光谱法同时测定土壤样品中的36种组分的探讨[J]. 甘肃地质, 2010, **19**(2): 75-79.
- Liu J B, Dang L, He Z Y. Determination of 36 elements in soil samples by XRF [J]. *Gansu Geology*, 2010, **19**(2): 75-79.
- [31] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *GeoJournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [32] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [33] 王博, 赵爽, 夏敦胜, 等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1430-1440.
- Wang B, Zhao S, Xia D S, *et al.* Characteristics of heavy metal elements and their relationship with magnetic properties of river sediment from urban area in Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1430-1440.
- [34] 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 等. 都柳江水系沉积物镉等重金属

- 空间分布特征及生态风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2784-2792.
- Ning Z P, Xiao Q X, Lan X L, *et al.* Spatial distribution characteristics and potential ecological risk of antimony and selected heavy metals in sediments of Duliujiang River [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2784-2792.
- [35] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan Mining Area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [36] 高明美, 孙涛, 张坤. 基于超标倍数赋权法的济南市大气质量模糊动态评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(9): 150-154.
- Gao M M, Sun T, Zhang K. Dynamic fuzzy comprehensive evaluation on the atmosphere environmental quality of Jinan city based on the multiple super-scale weighting method [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(9): 150-154.
- [37] 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].
- [38] 贾丽, 乔玉辉, 陈清, 等. 基于改进物元可拓模型评价设施菜地土壤重金属污染风险[J]. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(6): 960-969.
- Jia L, Qiao Y H, Chen Q, *et al.* Assessment of heavy metal pollution risk in greenhouse soil based on an improved matter-element extension model [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(6): 960-969.
- [39] 杨忠平, 卢文喜, 刘新荣, 等. 长春市城市近地表灰尘重金属污染来源解析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24**(12): 155-160.
- Yang Z P, Lu W X, Liu X R, *et al.* Heavy metal identification for near-surface urban dust in Changchun City [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, **24**(12): 155-160.
- [40] Yalcin M G, Battaloglu R, Ilhan S. Heavy metal sources in Sultan Marsh and its neighborhood, Kayseri, Turkey [J]. *Environmental Geology*, 2007, **53**(2): 399-415.
- [41] Guan Q Y, Wang L J, Wang L, *et al.* Analysis of trace elements (heavy metal based) in the surface soils of a desert-loess transitional zone in the South of the Tengger Desert [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, **72**(8): 3015-3023.
- [42] 杨孝智, 陈扬, 徐殿斗, 等. 北京地铁站灰尘中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 944-950.
- Yang X Z, Chen Y, Xu D D, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution and health risk assessment in subway dust in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(6): 944-950.
- [43] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- Guo W, Sun W H, Zhao R X, *et al.* Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal in different functional zones of Hohhot [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1561-1567.
- [44] 魏晓, 吴鹏豹, 张欢, 等. 长江安徽段江心洲土壤重金属的分布特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(5): 1921-1930.
- Wei X, Wu P B, Zhang H, *et al.* Spatial distribution and source identification of heavy metals in soils on the alluvial islands in the Anhui section of Yangtze river [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(5): 1921-1930.
- [45] 李新月, 张慧, 段华波, 等. 建筑装饰施工过程环境污染特征[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(10): 1811-1818.
- Li X Y, Zhang H, Duan H B, *et al.* Characterizing the environmental impacts associated with decoration processing of building [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(10): 1811-1818.
- [46] Somasundaram S, Jeon T W, Kang Y Y, *et al.* Characterization of wastes from construction and demolition sector [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**, doi: 10.1007/s10661-014-4200-0.
- [47] 尹芳, 封凯, 尹翠景, 等. 青海典型工业区耕地土壤重金属评价及源解析[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 5217-5226.
- Yin F, Feng K, Yin C J, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal in cultivated soil around typical industrial district of Qinghai province [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 5217-5226.
- [48] Wang S, Cai L M, Wen H H, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **655**: 92-101.
- [49] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的积累及其污染风险[J]. 自然资源学报, 2006, **21**(1): 64-72.
- Zheng Y M, Song B, Chen T B, *et al.* Zinc accumulation and pollution risk in soils under different land use types in Beijing [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, **21**(1): 64-72.
- [50] Chen T, Chang Q R, Liu J, *et al.* Identification of soil heavy metal sources and improvement in spatial mapping based on soil spectral information: a case study in northwest China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 155-164.

## CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning .....	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> ( 1 )
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> ( 8 )
Variation Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter .....	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> ( 23 )
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou .....	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> ( 36 )
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter .....	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> ( 48 )
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022 .....	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> ( 61 )
Analysis of O <sub>3</sub> Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China .....	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> ( 71 )
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer .....	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> ( 81 )
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction .....	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 93 )
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model .....	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> ( 104 )
Driving Forces and Mitigation Potential of CO <sub>2</sub> Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China .....	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> ( 115 )
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant .....	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> ( 123 )
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years .....	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> ( 131 )
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment .....	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> ( 140 )
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment .....	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> ( 151 )
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment .....	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> ( 159 )
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary .....	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> ( 173 )
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir .....	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> ( 181 )
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City .....	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> ( 194 )
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang .....	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long ( 207 )
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan ( 218 )
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years .....	WANG Geng, ZHANG Fu-rong ( 228 )
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect .....	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> ( 239 )
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone .....	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> ( 248 )
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China .....	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> ( 262 )
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin .....	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> ( 275 )
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model .....	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> ( 287 )
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model .....	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> ( 300 )
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain .....	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> ( 314 )
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors .....	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> ( 323 )
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region .....	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> ( 335 )
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area .....	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> ( 343 )
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations .....	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> ( 354 )
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing .....	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> ( 364 )
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils .....	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie ( 376 )
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model .....	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> ( 386 )
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented .....	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> ( 396 )
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China .....	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> ( 407 )
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City .....	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> ( 417 )
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials .....	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> ( 429 )
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety .....	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> ( 439 )
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic .....	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> ( 450 )
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks .....	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> ( 459 )
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i> .....	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> ( 470 )
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum .....	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> ( 480 )
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil .....	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> ( 489 )
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities .....	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge ( 496 )
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest .....	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> ( 508 )
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity .....	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei ( 520 )
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function .....	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> ( 530 )
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper .....	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> ( 543 )
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water .....	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> ( 555 )
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County .....	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> ( 567 )
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> ( 576 )
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas .....	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> ( 584 )
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw .....	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> ( 594 )
Comparison of Pb <sup>2+</sup> Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO <sub>2</sub> Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid .....	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> ( 606 )