

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附铅的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟

孙雪菲¹, 张丽霞², 董玉龙², 朱林宇¹, 王政¹, 吕建树^{1*}

(1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358; 2. 山东省地质环境监测总站, 济南 250014)

摘要: 土壤重金属来源定量解析和空间预测是土壤污染调查评价的重要内容, 可以为区域土壤风险管控及修复提供依据。本研究选取典型石化工业城市——淄博市临淄区作为研究对象, 系统开展表层样品采集及重金属分析测试; 借助正定矩阵因子分解 (PMF) 和非负约束的因子分析 (FA-NNC) 两种受体模型解析土壤重金属的来源; 构建基于最小/最大自相关因子 (MAF) 和序贯高斯模拟 (SGS) 的多元地统计模拟技术, 确定了土壤重金属的潜在污染区域。研究结果表明: ① As、Co、Cr 和 Mn 主要为自然来源, 主要受成土母质影响, 高值区分布在研究区南部; ② 研究区内 10 种重金属中 Hg 污染程度最高, 主要受来自于工业排放和煤炭燃烧为主的大气沉降影响, 污染区域分布在研究区东北部; ③ Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 等元素受自然和人类活动综合影响, 高值区主要集中在研究区中部; ④ Cd 和 Hg 的潜在污染区域最广, 分别为 580.80 km² 和 666.60 km², 约占研究区总面积的 85.04% 和 97.59%, 应当引起关注; 其余元素的潜在污染区域面积相对较小, 不足研究区总面积 1%。

关键词: 土壤重金属; 来源解析; 多元地统计模拟; 潜在污染区域; 石化工业城市

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2021) 03-1093-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202008007

Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City

SUN Xue-fei¹, ZHANG Li-xia², DONG Yu-long², ZHU Lin-yu¹, WANG Zheng¹, LÜ Jian-shu^{1*}

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China; 2. Shandong Geological Environmental Monitoring Station, Jinan 250014, China)

Abstract: Identifying the quantitative source and hazardous areas of heavy metals in soils plays a pivotal role in soil pollution research, and can provide a basis for regional soil risk monitoring and environmental management. For this purpose, a total of 175 samples were collected in topsoils from Linzi, a typical petrochemical industrial city in Shandong Province. Positive matrix factorization (PMF) and factor analysis with non-negative constraints (FA-NNC) receptor models were applied to analyze the sources of the heavy metals. Based on the multivariate statistical simulation methods of min/max autocorrelation factors (MAF) and sequential Gaussian simulation (SGS), the distribution of heavy metal and potential pollution areas were determined. As, Co, Cr, and Mn were mainly affected by natural sources, their concentrations were dominated by the parent materials, and the high-value areas were distributed in the south of the study area. Hg was the most serious pollution element among the 10 heavy metals analyzed in Linzi and originated from atmosphere deposition from industrial emissions and coal combustion, and the highest values were distributed in the northeast of the study area. Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn were dominated by natural sources and human activities. The hot-spot areas were mainly concentrated in the middle of the study area. The potentially contaminated areas of Cd and Hg were 580.80 km² and 666.60 km², about 85.04% and 97.59% of the total area, and should require more attention. The potential pollution area of most elements was small and scattered across the study area, accounting for less than 1%.

Key words: heavy metals in soils; source apportionment; multivariate geostatistical simulation; potential polluted area; petrochemical industry city

随着社会经济的不断发展, 人类活动引起的土壤环境污染问题受到广泛关注^[1~4]。文献[5]显示, 全国土壤点位超标率达 16.1%, 以石油煤炭、有色金属和化工医药等为主的重污染企业用地的超标率达 36.3%, 无机污染物中超标率最高的为 Cd^[5]。毒性强、来源广、易积累和难治理是土壤重金属污染的主要特征^[6~8]。重金属不仅对土壤环境造成危害, 同时会沿食物链累积最终威胁人体健康^[9,10]。土壤重金属含量继承自成土母质, 人类活动 (农业、工业以及交通运输活动) 也会造成重金属的积累^[11~13]。因此, 研究土壤重金属污染现状、来源及其空间分布可以为区域治理土壤污染提供参考和理论依据, 对改

善土壤生态环境具有重要意义。

土壤重金属污染源研究包括定性的源识别 (source identification) 和定量的源解析 (source apportionment)^[14,15]。源识别主要应用多元统计分析方法 (如相关分析、主成分分析和聚类分析) 将元素进行降维归类进而判定污染来源, 但不能获取污染元素的来源贡献^[16~19]。受体模型是土壤重金属源解析的范式性方法, 目标是求解化学质量平衡方程, 可

收稿日期: 2020-08-02; 修订日期: 2020-09-13

基金项目: 山东省自然科学基金优秀青年基金项目 (ZR2020YQ31); 国家自然科学基金项目 (41601549, 41701604)

作者简介: 孙雪菲 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染评价, E-mail: 2444342365@qq.com

* 通信作者, E-mail: lvjianshu@126.com

确定不同来源对每种重金属的贡献率;主要包括绝对主成分/多元线性回归(APCS/MLR)^[20]、正定矩阵因子分解(PMF)^[21]和非负约束的因子分析模型(FA-NNC)等.与APCS/MLR相比,PMF和FA-NNC包含非负限定,具有更高的精度和更广泛的适用性^[2].当前的研究侧重于应用单一受体模型开展污染物源解析研究,已在土壤、沉积物以及大气重金属和PAHs来源研究中取得了丰硕的成果^[21~25].然而,单一受体模型的源解析结果存在一定的不确定性,多个受体模型可以相互补充和验证,进而提高源解析的合理性^[26~29].

地质统计学是绘制土壤重金属空间分布格局的主要工具,可以分析土壤重金属的空间结构和变异,主要包括克里格和随机模拟^[2,28].但克里格的平滑效应限制了其空间预测的精度.序贯高斯模拟(SGS)可产生多个等概率的实现,弥补了克里格平滑效应的缺陷^[27,28,30].特别地,土壤重金属元素不是孤立的,各元素由于受到同一种环境要素影响存在空间相关性;考虑元素间空间相关性的多元地统计学技术,逐渐受到国内外研究者的重视.协同区域化线性模型(LMC)可以拟合多元空间结构^[31,32],但拟合难度较大,同时基于LMC的协同克里格和协同模拟计算量也较大.最小/最大自相关因子(MAF)是基于主成分分析的多元统计算法^[33,34],它可以将土壤重金属分解为多个独立因子,结合SGS以实现多元地统计模拟.

淄博市临淄区位于山东省中部,是全国重要的石油化工基地.多年的石化工业发展为临淄区经济

发展做出贡献的同时也造成了土壤重金属的累积,但当前有关该地区重金属污染的研究相对较少,对土壤环境污染现状认识不足.本文以临淄区为研究对象,系统采集175个表层土壤样品,测定土壤样品中As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb和Zn等10种元素含量;结合PMF和FA-NNC对各元素来源进行定量解析,基于MAF和SGS构建多元地统计模拟方法,模拟重金属空间分布并划定潜在污染区域.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

临淄区位于淄博市东北部,地理坐标介于 $36^{\circ}37'51''\text{N} \sim 37^{\circ}00'30''\text{N}$ 、 $118^{\circ}06'27''\text{E} \sim 118^{\circ}29'30''\text{E}$ 之间(图1),东西长约35 km,南北相距41 km,总面积约683 km².研究区位于鲁西隆起的北部边缘,地势南高北低,平原面积广大^[35].从气候条件看,研究区属暖温带大陆性季风气候,年降水量为1 000.7 mm,年平均气温为14.3℃.成土母质以第四系沉积物和石灰岩[图2(b)]为主,发育褐土和黑土;淄河横贯南北,提供了良好的农业发展条件;作物种植以小麦和玉米为主,蔬菜和林果业蓬勃发展.作为全国重要的石油化工基地之一,临淄区化工及成品油生产、储量大,石油加工能力约 $5.0 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[36];汽油、柴油以及合成橡胶等石油化工产品远销全国.至2015年,石化企业约有269家,以齐鲁石化、清源石化和齐翔石化为代表,石油炼化及精细化工产业额达525.9亿元^[35].

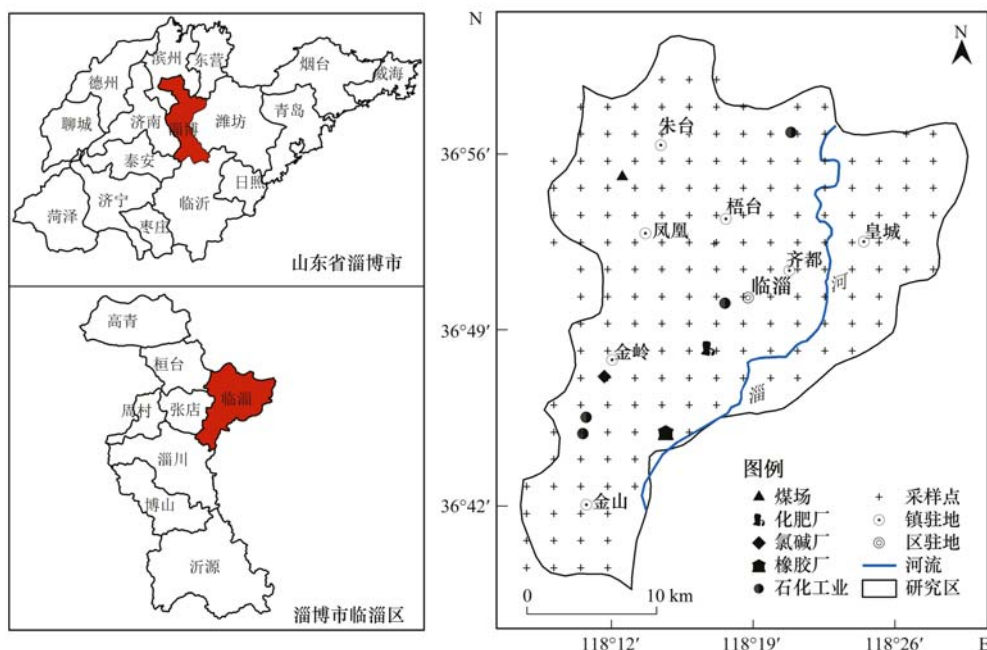


图1 临淄区及采样点位置示意

Fig. 1 Location of soil sampling sites in Linzi

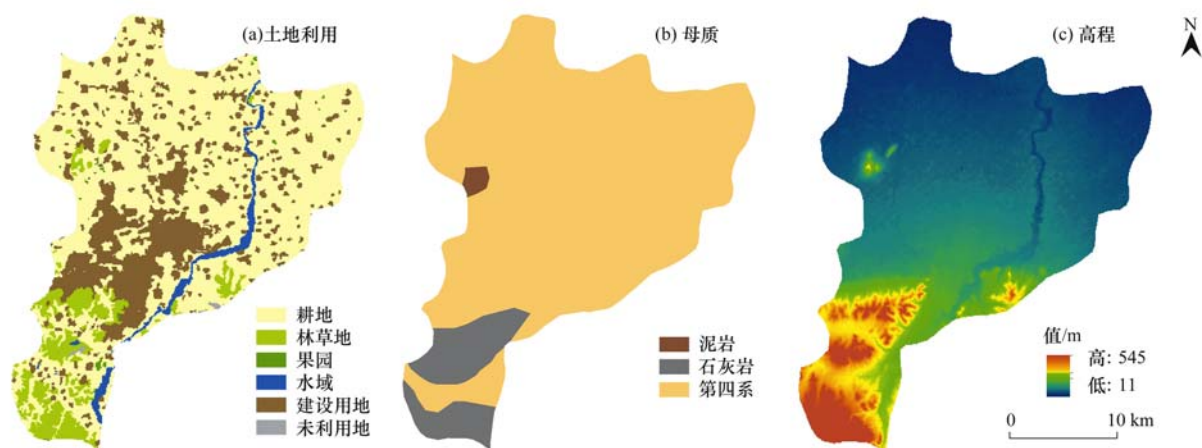


图2 临淄区土地利用、母质类型及高程

Fig. 2 Maps of land use types, parent materials, and elevation of Linzi

1.2 样品采集与分析测试

本研究将整个区域划分为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的网格 (不含金山镇淄河以东区域), 网格中心即为预设采样点, 实际采样点位置根据采样可行性进行调整。样品采集时, 在每个采样点位置周围设置 3~5 个子样点, 在相同深度 (0~20 cm) 采集等量土壤样品经充分混合后装入干净样品袋中, 土壤样品原始重量不少于 1 kg, 记录好对应编号、采样点周围环境以及实际坐标, 共采集 175 个土壤样品。样品在实验室干净环境内经自然风干, 并去除石块杂草等杂质, 采用四分法称取约 10 g 原始样品, 将其研磨至粒径小于 0.149 mm 后, 留置备用。取 0.2 g 研磨后样品经 $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3\text{-HF}$ 消解后, 借助等离子体发射光谱仪 (Agilent 5100) 测试 Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Ti 和 Zn 的含量; 0.5 g 研磨后样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3\text{-KMnO}_4$ 消解后, 使用原子荧光光度计 (AFS-2202) 测定 As 和 Hg 的含量。As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb、Ti 和 Zn 的检出限分别为 0.1、0.01、0.1、0.4、0.2、0.005、0.5、0.3、0.1、6 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。测定过程中采用国家土壤一级标准物质 (GSS-1) 进行质量控制, 所有元素的回收率均在 $100\% \pm 10\%$, 测试结果精度较高, 具有较高可信度。

1.3 PMF 受体模型

本研究将美国环保署 (US-EPA) 推荐的 PMF 5.0 模型^[28,37] 用于研究区土壤重金属源解析。PMF 利用多线性引擎 (multilinear engine-2, ME-2) 求解化学质量平衡方程, 将原始浓度数据分解成因子贡献、元素含量和因子残差这 3 个矩阵:

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}_{ij}$ 表示第 i 个样品中第 j 种元素的浓度, $\mathbf{g}_{ik}$ 表示第 k 个源对第 i 种样品的贡献; $\mathbf{f}_{kj}$ 表示第 k 个源

中第 j 种元素的含量; p 为污染源数目; $\mathbf{e}_{ij}$ 为因子残差矩阵。

PMF 结果合理性的判定标准是得到目标函数 Q 的最小值:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\mathbf{e}_{ij}/u_{ij})^2 \quad (2)$$

式中, u_{ij} 代表第 i 个样品中第 j 种元素的不确定度^[21,37,38]。

$$u_{ij} = \begin{cases} (5/6) \times \text{MDL} & C_{ij} \leq \text{MDL}, \\ \sqrt{(C_{ij} \times \theta)^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} & C_{ij} > \text{MDL}. \end{cases} \quad (3)$$

式中, C_{ij} 为元素含量值, θ 为相对标准偏差, MDL 为检出限。

1.4 FA-NNC 受体模型

FA-NNC 是由 Ozeki 等^[39] 最早提出并应用于酸雨的来源解析, 后经不断补充和完善应用于沉积物中 PAHs 来源解析的方法^[23-25], 对土壤重金属的研究较少。本研究中尝试将其应用于临淄区土壤重金属的来源解析。其解析原理是将原始含量数据经过非负约束的矩阵迭代运算分解为因子载荷矩阵和因子得分矩阵。方程如下:

$$\mathbf{D} = \mathbf{C} \times \mathbf{R} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{D} (m \times n)$ 为标准化后的浓度值矩阵, $\mathbf{C} (m \times p)$ 为因子载荷矩阵, $\mathbf{R} (p \times n)$ 为因子得分矩阵, m 为元素数量, n 为样品个数, p 为源的个数。

为减少数据间差距造成的结果误差, 将原始数据标准化处理。当因子载荷矩阵中负数的平方和小于 α ($\alpha = 0.0001$) 时, 运算终止。依据累计贡献率, Exner 函数和决定系数选取主因子个数^[25]。

1.5 基于 MAF 和 SGS 的多元地统计模拟

1.5.1 MAF 基本原理

MAF 是 Switzer 为处理空间网格图像的多通道

数据提出的^[33,34,40],基于空间自相关和主成分分析的多元统计方法.与主成分分析不同的是,主成分分析是使数据的方差最大化^[33,40,41],MAF 则是按照空间自相关大小进行排列.其计算原理如下:

首先,对 t 时刻原始空间变量 $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 进行 $y_i(t) = a_i^T X(t)$ 变换,得到变量 $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)]^T$.

其次,定义 $y_i(t)$ 的自相关函数 $AR_i(\Delta) = \text{cor}[y_i(t), y_i(t + \Delta)]$ (Δ 为 t 的平移算子).若 $Y(t)$ 的各分量的自相关函数满足:

$$\left. \begin{aligned} AR_1(\Delta) &= \min \text{cor}[a^T X(t), a^T X(t + \Delta)] \\ &\dots\dots\dots \\ AR_m(\Delta) &= \max \text{cor}[a^T X(t), a^T X(t + \Delta)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

且 $\text{cor}[a_i^T X(t), a_j^T X(t)] = 0, i < j$, 则称 $Y(t)$ 为原变量 $X(t)$ 的最小/最大自相关因子分解.

再次,通过计算 $X(t)$ 以及 $X_\Delta(t) = X(t) - X(t + \Delta)$ 的方差和协方差矩阵可以得出最小/最大自相关因子的投影向量 a :

$$S_x = X(t + \Delta)^T X(t + \Delta) / (m - 1) \quad (6)$$

$$S_{\Delta x} = X_\Delta(t)^T X_\Delta(t) / (m - 1) \quad (7)$$

$y_i(t)$ 在平移算子 Δ 下的自相关系数为:

$$p = 1 - 0.5(a^T S_{\Delta x} a) / (a^T S_x a) \quad (8)$$

最后,设 S_x 的伪逆为 S_x^- ,对 $S_x^- S_x$ 进行特征分解, $v = \lambda v$,对特征值排序 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$,特征向量分别为 $v_1, v_2, \dots, v_m$,则 $a = v_1$ 时 p 最小, $a = v_m$ 时 p 最大,即 $X(t)$ 的最小/最大自相关因子分别为 $y_1(t)$ 和 $y_m(t)$.

1.5.2 多元地统计模拟流程

本研究中提出的基于 MAF 和 SGS 的多元地统计模拟主要分为以下步骤(图 3).

(1)将原始变量进行高斯变换. MAF 分解的前提是数据符合正态分布,数据不满足应进行高斯变换.原始变量 $X(u)$ 可表示为能够展开成埃尔米特多项式的高斯变量 $Y(u)$ 的函数: $X(u) = \varphi[Y(u)]$.利用 $\varphi[Y(u)]$ 的反函数 $Y(u) = \varphi^{-1}[X(u)]$ 可进行原始变量标准化^[2].埃尔米特多项式展开如下:

$$\varphi[Y(u)] = \sum_{i=0}^m \psi_i H_i[Y(u)] \quad (9)$$

(2)基于 MAF 求解原始变量的自相关因子矩阵,使用 R 软件包 Rcpp 和 RGeostats 实现.

(3)求解各自相关因子的变异函数.

(4)用 SGS 对求出的各因子进行 100 次模拟.首先创建 390×450 个 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的网格,然后定义随机路径以通过所有网格(仅访问一次)^[42,43].每个网格节点处的模拟过程如下:① 利用克里格方

程组估计条件累积分布函数包括均值和方差在内的参数(conditional cumulative distribution function, ccdf);② 从 ccdf 中随机抽取一个模拟值,并作为模拟下一个节点的条件数据;③ 沿随机路径模拟下一个网格节点,重复前两个步骤(①和②),直到所有网格节点都赋予模拟值.

(5)将模拟得出的因子结果利用 MAF 公式转换成元素变量模拟值(高斯分布).

(6)将高斯变量模拟值逆转换回原始变量模拟值.

(7)利用计算得到的原始含量的模拟结果计算土壤重金属在某点处超出污染阈值的概率,确定潜在污染区域.

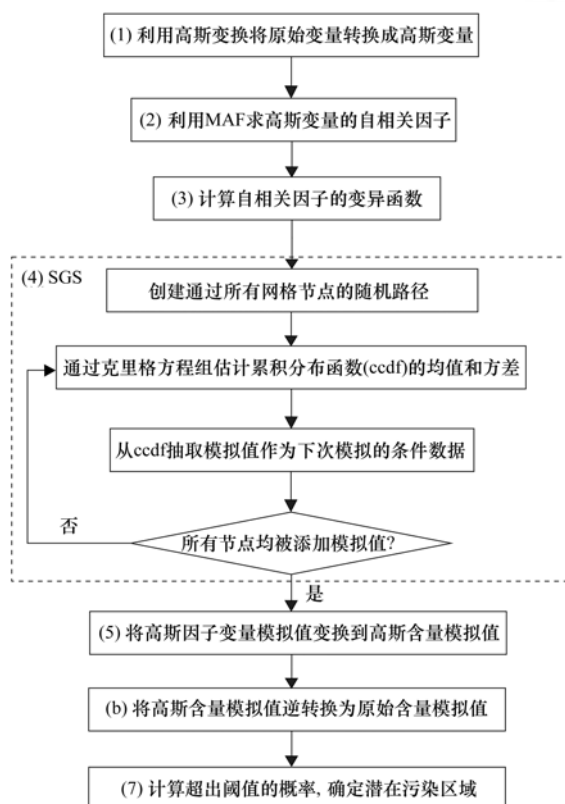


图 3 基于 MAF 和 SGS 的多元地统计模拟流程

Fig. 3 Steps of multivariate geostatistical simulation based on MAF and SGS

2 结果与讨论

2.1 临淄区土壤重金属含量描述性统计与污染现状评价

临淄区表层土壤中 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的平均值分别为 9.29、0.16、11.96、69.50、28.04、0.10、550.05、31.06、28.23 和 74.01 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1).除 Co 和 Mn 外其余 8 种元素含量均超过山东省背景值^[44],分别为背景值的 1.04、2.29、1.08、1.26、5.98、1.27、1.15 和 1.22

倍. Cu、Hg 和 Zn 的变异系数分别为 0.41、1.90 和 0.43,大于 0.36,为高度变异. 土壤样品在耕地采集 105 个,除 Zn 外的 7 种元素(Co 和 Mn 无相关参考值)最高含量及平均含量均没有超出农用地土壤污染风险筛选值(GB 15618-2018),Zn 有 2 个点位超出或接近风险筛选值,含量分别为 393 mg·kg⁻¹ 和 294.8 mg·kg⁻¹. 35 个建设用地样品中,除 Cr、Mn 和 Zn 外(无参考值)的 7 种元素最高含量均低于第一类建设用地土壤污染风险筛选值(GB 36600-2018).

当前评估环境中重金属污染状况的方法很多^[2,17,45],但并未形成统一标准,因此在本研究中选取地累积指数法(geoaccumulation index)^[45]和富集

因子法(enrichment factor)综合评价临淄区表层土壤重金属污染情况. 地累积指数是判断环境中重金属污染的重要参数,不仅反映重金属分布的自然变化特征,还可以区分人为活动的影响,在此选用山东省土壤背景值作为参考背景值^[44]. 除 Cd 和 Hg 外,其余 8 种元素的地累积指数均小于 0,为未污染,Cd 的结果为 0.65,处于轻度~中等污染,Hg 的地累积指数结果为 2.11 处于中等~强污染. 富集因子是评价人类活动对重金属富集程度的重要方法,一般选择在地壳中较为稳定的元素作为参考元素. 本研究选用 Ti 作为参考元素^[2,28]. 结果显示,As、Co、Mn 无富集,Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 为轻微富集,而 Hg 的结果值为 2.95,呈现中度富集.

表 1 临淄区土壤重金属描述性统计/mg·kg⁻¹

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals in the soils from Linzi/mg·kg ⁻¹												
项目	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Ti	Zn	pH
最小值	5.20	0.07	9.00	56.20	17.80	0.02	414	20.10	17.80	2 525	47.80	7.33
最大值	12.40	0.41	28.90	109.10	123.50	1.57	1 096	63.00	112.00	4 217	393.50	8.45
平均值	9.29	0.16	11.96	69.50	28.04	0.10	550.05	31.06	28.23	3 747.10	74.01	7.98
地累积指数	-0.52	0.65	-0.65	-0.47	-0.23	2.11	-0.72	-0.23	-0.36	-0.45	-0.27	— ²⁾
富集因子	0.98	1.15	0.92	1.02	1.14	2.95	0.87	1.04	1.09	—	1.07	—
变异系数	0.15	0.28	0.18	0.10	0.41	1.90	0.13	0.16	0.32	0.08	0.43	0.03
偏度	-0.12	1.94	5.32	1.74	6.31	6.32	2.47	1.76	5.38	-1.13	7.66	-0.86
山东省土壤重金属背景值 ^[44]	8.9	0.07	12.6	64.3	22.3	0.016	608	24.4	24.5	3 400	60.9	—
农用地土壤污染风险筛选值 ¹⁾	30	0.6	—	250	100	3.4	—	190	170	—	300	—
第一类建设用地土壤污染风险筛选值	20	20	20	—	2 000	8	—	150	400	—	—	—

1) 选用 pH>7.5 区间的风险筛选值; 2) “—”表示无相关数据或标准

2.2 临淄区土壤重金属源解析结果

选取 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Zn 等 10 种元素,利用公式(3)计算不确定度,将元素含量和不确定度输入到 PMF 模型中. 在 PMF 拟合过程中,分别尝试不同数量的因子;当因子数设为 3 时,得到最小的 Q 值为 3 204.74,残差值在 -3~3 之间,R² 在 0.51~0.99 之间,且预测值/观测值

(P/O)均接近 1(表 2),得到最优的拟合结果,因此本研究将 PMF 的因子数设定为 3 个. FA-NNC 计算结果在选择 3 个主因子时,得到较好的拟合效果,继续增加主因子个数不能明显改善拟合效果,且 R² 在 0.33~0.98 之间,P/O 接近 1,结果能较好解释研究区土壤重金属的来源. PMF 和 FA-NNC 得到的来源贡献结果如表 2 所示.

表 2 临淄区土壤重金属 PMF 和 FA-NNC 源贡献结果/%

Table 2 Contributions of PMF and FA-NNC modeling of heavy metals in the soils of Linzi/%								
重金属	PMF				FA-NNC			
	P/O	因子 1	因子 2	因子 3	P/O	因子 1	因子 2	因子 3
As	0.98	78.24	6.24	15.52	1.00	83.54	3.42	13.04
Cd	0.96	69.23	8.47	22.30	1.03	76.58	3.31	20.12
Co	0.98	74.27	6.72	19.01	1.00	81.21	2.47	16.32
Cr	0.99	74.79	7.32	17.89	0.99	85.79	4.15	10.06
Cu	0.93	64.69	14.33	20.99	1.00	69.34	5.08	25.57
Hg	0.87	0.01	98.31	1.68	0.96	0.01	94.63	5.36
Mn	0.99	76.30	8.32	15.38	0.99	82.98	5.19	11.83
Ni	0.99	66.21	7.31	26.48	1.00	80.78	3.76	15.47
Pb	0.95	56.10	12.11	31.79	0.99	47.88	5.26	46.85
Zn	0.97	36.32	8.74	54.94	0.96	69.51	4.08	26.41

因子 1 对 As、Co、Cr 和 Mn 等元素的含量贡献最大,PMF 模型的平均贡献率结果超过 70%,FA-NNC 的结果则超过 80%;其次为 Cd、Cu、Ni 和

Pb,两个模型输出的结果均大于 50%. 地累积指数和富集因子的计算结果显示这 8 种元素在土壤中并未受到严重程度污染,较好保持了本底值. 研究区大

部分被第四系所覆盖,As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni 和 Pb 在第四系沉积物中平均含量分别为 9.3、0.09、11.6、56.7、21.3、568、25.3 和 21.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[44,46],显然成土母质显著影响着以上 8 种重金属.重金属来源解析中,Co、Cr、Mn 和 Ni 与其他元素的组合通常被划分为自然来源^[47~50].在自然环境中,Co、Cr、Mn 和 Ni 均属于铁族元素,具有相似的原子半径和化学形态,可通过离子替换实现共生富集^[2],因而在多元受体模型中具有较高的相关性.陈秀端等^[20]在西安、Lv 等^[28]在东营以及 Lv^[49]在广饶的研究结果显示,Co、Cr、Mn 和 Ni 与 As、Cd 和 Pb 的元素组合指示了自然来源因子.因此可以将因子 1 可以归结为自然来源.

Hg 受因子 2 影响最大,两种受体模型的平均贡献率分别为 98.31% 和 94.63%,远高于其他元素.研究区内,Hg 的含量远超山东省土壤背景值,变异系数最高;同时地累积指数和富集因子结果显示 Hg 在研究区受人类活动明显.董騷睿等^[21]、Wang 等^[27]以及 Lv 等^[28]的土壤重金属来源解析结果中 Hg 均为孤立的因子,生态危害大且主要受人类活动影响强烈.环境中 Hg 有多种人为来源,工业排放是主要形式.临淄区是山东省典型石化城市,拥有齐鲁石化、齐翔化工以及清源化工等企业.2017 年,全区规模以上石油炼化和精细化工工业企业有 280 家^[51],柴油和汽油的年产量达 $3.68 \times 10^6 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $2.45 \times 10^6 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[35].石油本身含有多种重金属,石油裂解过程中会添加含 Hg 的催化剂,并通过工业“三废”排放进入环境.煤炭燃烧也是 Hg 的重要来源,燃烧过程中 Hg 会以氧化态、颗粒态和单质态等 3 种形态排放,除尘器仅对氧化态 Hg 和颗粒态 Hg 具有较高的去除作用^[2,28,49].单质态 Hg 则会逸散到大气中,在一定气压条件下可存在 0.5~2 a,通过大气干湿沉降到地面.研究区东部分布有远达化工生产区和敬仲镇工业园,冶金企业、煤炭工业以及石化工业对煤炭的使用,都是造成土壤中 Hg 含量积累的重要来源.因此,因子 2 可认为是以石化工业和煤炭燃烧排放为主的工业来源.

因子 3 对 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的贡献率更高,两种模型解析结果的贡献率均在 20% 以上.尽管 Ni 在 FA-NNC 因子 3 中贡献率不突出,但在 PMF 中的结果较高,同样不可忽视.李伟迪等^[10]在太滹运河流域农田土壤重金属来源的研究表明,Cd、Cu、Pb 和 Zn 主要受人为来源影响.Lv 等^[52]对淄博市博山区的研究发现 Cd 和 Zn 受人类活动影响明显.一般来讲,Pb 和 Zn 通常被认为是交通来源的标志元素^[2,46,47],特别是含 Pb 汽油的使用会造成 Pb 在环

境中的富集.尽管自 2000 年来,含 Pb 汽油已被禁止使用,但在环境中仍然有一定数量残留^[49];且不同类型燃油车尾气组分中污染物存在差异,柴油车尾气排放中的 Cu 含量较高,而汽油车尾气中 Zn 含量更高.Zn 还常被用在轮胎中作为硬度添加剂,汽车零部件中也常会使用镀锌部件^[10,11];Cd 在汽车制造中也通常被用作电镀层以保护汽车材料不受腐蚀,车辆摩擦损耗会导致环境中 Cd、Cu 和 Zn 等元素的累积^[50].至 2019 年,临淄区公路总里程高达 629.4 km,公路货运量 $1.05 \times 10^8 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[51],汽车尾气排放和车辆磨损会增加环境中重金属含量.Cd、Cu、Ni 和 Zn 还受农业活动来源的影响^[52~55].据文献[5]显示,全国耕地土壤点位超标率达 19.4%,主要污染物为 Cd、Cu、Ni 和 Pb.Cd 作为磷矿石的杂质在磷肥中含量较高,在磷肥中含量达 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[17].Chen 等^[56]的研究发现,Cd、Cu 和 Zn 与总磷的含量呈相关性,是化肥使用的标志.畜牧养殖使用含 Cu、Ni 和 Zn 的饲料添加剂,并不能完全得到利用,95% 以上会随动物粪便排出体外^[16],农业活动中有机肥的使用会导致 Cu、Ni 和 Zn 含量的升高.王美等^[57]对有机肥中重金属含量研究发现,猪粪中的 Cu 和 Zn 的含量较高,商品有机肥中 Ni 和 Zn 的含量较高;陈景春等^[58]对重庆市化肥进行调查发现 128 个市售化肥中 Cu 的超标率最高.谢景欢等^[59]研究沼肥中重金属含量状况,发现 Pb 的含量较高.作为肥料消费大省,山东使用化肥量占全国总量的 10%,每亩用量在 20.14 kg~33.17 kg^[60];淄博市蔬菜和果树种植中有机肥平均用量约为 $1882.6 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $3205.6 \text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[60].总的来看,因子 3 是交通排放和农业活动的混合来源.

综上所述,PMF 得到的临淄区土壤重金属来源贡献率依次为自然来源 71.02%、工业来源 8.52% 以及交通和农业来源 20.46%;与之对应,FA-NNC 得到的贡献率分别为 80.19%、4.89% 和 14.92%,可见 PMF 和 FA-NNC 得到的来源结果具有一致性.但在同一个因子中,个别元素的贡献率有较大差异.因子 1 中,除 Hg 和 Pb 外的 8 种元素,FA-NNC 计算的贡献率均高于 PMF;因子 2 和因子 3 中,PMF 得到的各元素的贡献率则普遍高于 FA-NNC. *P/O* 的结果显示,FA-NNC 的解析精度略高于 PMF,10 种元素的预测结果更接近观测结果.解析结果的精确性一方面受样点中异常值的影响;另一方面两种模型提取因子的方法存在差异,PMF 通过标准偏差对因子载荷矩阵和因子得分矩阵进行优化,FA-NNC 则采用非负约束斜交旋转,得到因子载荷和因子得分矩阵^[61].

2.3 临淄区土壤重金属空间分布

对临淄区土壤重金属数据高斯变换之后进行MAF 分析,得到 10 个自相关因子. 计算各自相关因子的变异函数,利用 SGS 做空间分布模拟后,将因

子模拟结果转化为原始变量数据,借助 ArcGIS 将元素含量模拟结果可视化.

图 4 为临淄区 10 种重金属元素空间分布结果. 分析发现,属于同一起来源的重金属具有相似的空间

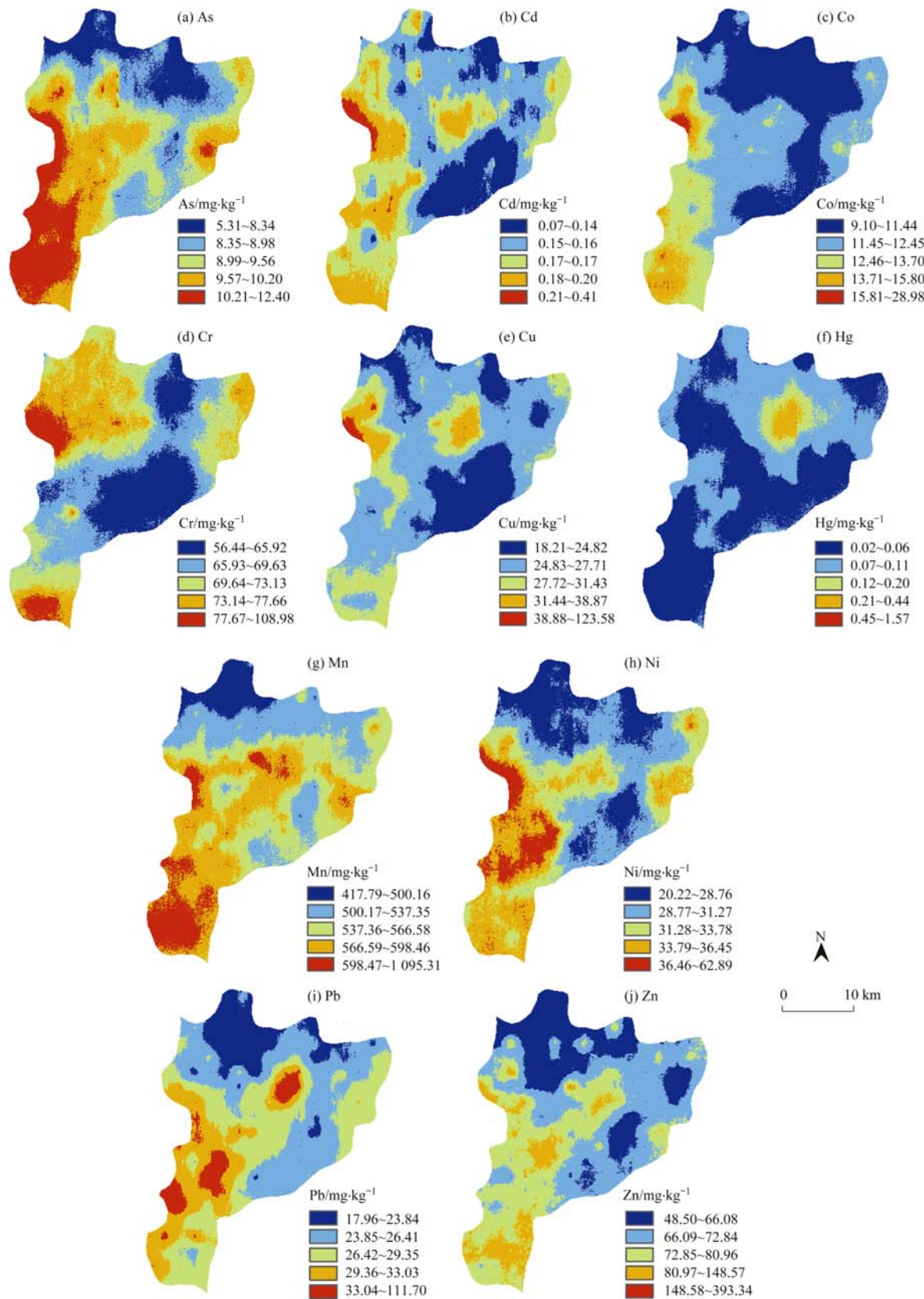


图 4 临淄区表层土壤重金属含量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of heavy metals concentration in the soils of Linzi

分布结果. 其中,受自然来源更明显的 As、Cd、Co、Cr、Cu、Mn、Ni 和 Pb 等 8 种元素在研究区南部均有高值区域的分布[图 4(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(g)、(h)和(i)]. 由研究区土地利用类型分布图可知,此处主要为林地和草地,人类活动程度较轻,且 As 和 Mn 在石灰岩中含量相对较高^[17],与研

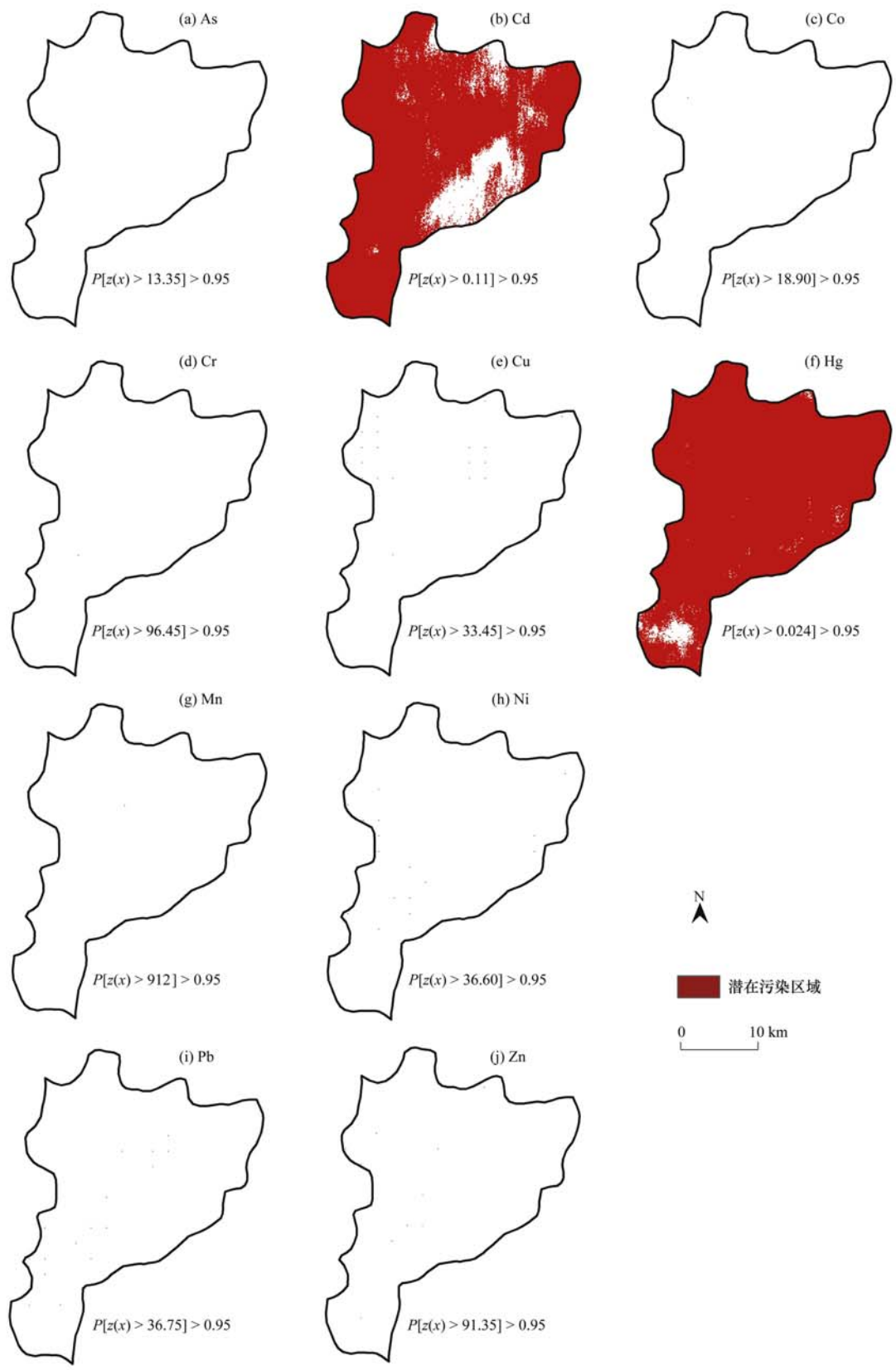


图 5 临淄区土壤重金属潜在污染区域

Fig. 5 Potential polluted areas of heavy metals in the soils of Linzi

究区母质分布相一致,受成土母质影响更大。Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 高值区主要分布在研究区中北部[图 4(b)、(e)、(h)、(i)和(j)],土地利用类型为农田,受农业活动影响更为强烈。相对而言,Cd、Pb 和 Zn 的空间分布格局具有更高的相似性,这 3 种元素受到交通来源的影响更明显,多条公路干线贯穿研究区,繁忙的运输都是造成中部地区重金属含量较高的因素,含 Pb 汽油和汽车零部件磨损均在不同程度上增加了元素的含量^[16]。特别地,与其他 9 种元素的空间分布有较大差异的元素是 Hg,其高值区主要分布在研究区中东部[图 4(f)],形成近似圆形的高值区域,并向四周变低。与受自然来源影响更高的 As、Co 和 Mn 等元素相反,Hg 在研究区南部数值相对较低,空间分布格局受人类活动影响更为强烈。研究区内有多家石化企业和煤炭厂等工厂,石油裂变过程中添加的催化剂和煤炭燃烧产生的 Hg 在大气中逸散,沉降到土壤中导致 Hg 含量的异常升高。

2.4 临淄区土壤重金属潜在污染区域划定

根据地累积指数^[45],将污染阈值设定为山东省表层土壤背景值的 1.5 倍^[2,28],As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Pb 和 Zn 的污染阈值分别为 13.35、0.11、18.90、96.45、33.45、0.024、912、36.60、36.75 和 91.35 mg·kg⁻¹。对潜在污染区域进行空间不确定性分析时,污染临界概率的设定对研究结果的精确性具有重要影响^[2,28,62]。Lv 等^[28]和 Zhao 等^[62]的研究发现,当临界概率设置为 0.95 时的潜在污染范围具有更高可靠性,因此在本研究中设置的临界概率为 0.95。图 5 显示了临淄区表层土壤 10 种重金属潜在的污染区域。Hg 的潜在污染区域范围最大[图 5(f)],面积约为 666.60 km²,为研究区总面积的 97.59%。Hg 在大气中逸散,具有长距离传输性,易造成广泛的污染区域,几乎涵盖整个研究区,仅研究区南部潜在污染区域较小,主要受工业来源的大气干湿沉降影响。其次 Cd 的潜在污染区域面积为 580.80 km²[图 5(b)],约占研究区的 85.04%,在研究区中部、西部和南部均有潜在污染区域,主要受农业和交通的综合影响。其余元素的潜在污染区域范围均不足研究区 1%。由此可以判断研究区 Cd 和 Hg 的污染程度最高,潜在污染范围最广,应当引起关注。

3 结论

(1)临淄区土壤重金属中除 Co 和 Mn 外其余 8 种元素的平均含量均超过山东省背景值;耕地中除 Zn 之外的元素平均值和最大值均未超过农用地土壤污染风险筛选值,Zn 有 2 个点位超出农用地土壤

污染风险筛选值;建设用地各元素平均值和最大值均低于第一类建设用地土壤污染风险筛选值;地累积指数和富集指数计算结果显示,研究区内仅 Cd 和 Hg 存在一定程度污染,其余元素均没有污染。

(2)通过受体模型 PMF 和 FA-NNC 得到 10 种重金属的 3 个不同来源。As、Co、Cr 和 Mn 等 4 种元素主要受成土母质影响;Hg 则主要受研究区内石油化工和煤炭燃烧等工业排放的大气沉降影响;Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 受自然和人类活动的综合影响。

(3)基于 MAF 和 SGS 的多元地统计模拟技术,将 10 种重金属元素在临淄区的分布可视化。空间分布结果显示,受同种来源影响的重金属元素具有相似的空间分布格局。As、Co、Cr 和 Mn 高值区主要分布在受人类活动较小的研究区南部,Hg 主要分布在研究区东北部,Cd、Cu、Ni、Pb 和 Zn 主要分布在农业活动和交通密集的研究区中部。

(4)研究区内 Cd 和 Hg 的潜在污染区域面积最大,达 580.80 km² 和 666.60 km²,且污染区域连接成片,约为研究区总面积 85.04% 和 97.59%。其余元素的潜在污染区域范围均较小且呈点状分布。Cd 和 Hg 在研究区内的污染状况应当引起重视。

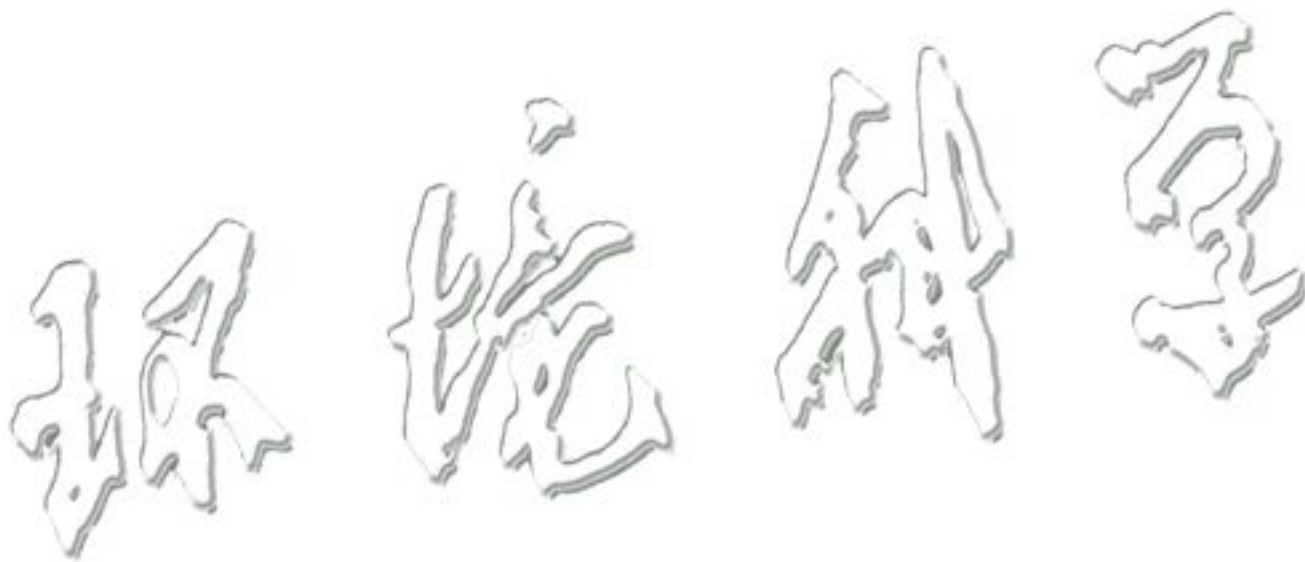
参考文献:

- [1] Alloway B J. Heavy metals in soils[M]. Dordrecht: Springer, 2013.
- [2] 吕建树. 烟台海岸带土壤重金属定量源解析及空间预测[J/OL]. 地理学报. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1856.P.20200615.0844.004.html>.
- [3] Lv J S. Source apportionment and spatial prediction of heavy metals in soils of Yantai Coast[J/OL]. Acta Geographica Sinica. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1856.P.20200615.0844.004.html>.
- [4] 王硕,蔡立梅,王秋爽,等. 中国城市地表灰尘中重金属的富集状况及空间分布特征[J]. 地理研究, 2018, 37(8): 1624-1640.
- [5] Wang S, Cai L M, Wang Q S, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metals in urban surface dust of China[J]. Geographical Research, 2018, 37(8): 1624-1640.
- [6] 杨安,王艺涵,胡健,等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 886-894.
- [7] Yang A, Wang Y H, Hu J, et al. Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 886-894.
- [8] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>, 2020-04-19.
- [9] 方斌,叶子君. 江浙典型茶园土壤铜含量的空间分异对比分析[J]. 地理研究, 2016, 35(3): 525-533.
- [10] Fang B, Ye Z J. Comparative analysis on spatial variation of copper in typical tea garden soils of Jiangsu and Zhejiang Provinces[J]. Geographical Research, 2016, 35(3): 525-533.
- [11] 骆永明,滕应. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策

- 略[J]. 中国科学院院刊, 2018, **33**(2): 145-152.
- Luo Y M, Teng Y. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, **33**(2): 145-152.
- [8] 王锐, 张风雷, 徐姝姝, 等. 土壤重金属污染风险筛选值划分方法: 以 Cd 为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5082-5089.
- Wang R, Zhang F L, Xu S S, *et al.* Method of dividing the value of soil heavy metal pollution risk screening: using Cd as an example[J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5082-5089.
- [9] 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 等. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 916-926.
- Yin Y M, Zhao W T, Huang T, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an e-waste dismantling area [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 916-926.
- [10] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5073-5081.
- [11] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 基于受体模型和地统计学相结合的土壤镉污染源解析[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 854-860.
- Qu M K, Li W D, Zhang C R, *et al.* Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(5): 854-860.
- [12] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农田土壤和蔬菜重金属的含量特征分析[J]. 地理学报, 2008, **63**(9): 994-1003.
- Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, *et al.* Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong Province, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(9): 994-1003.
- [13] 舒心, 李艳, 李锋, 等. 土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2471-2482.
- Shu X, Li Y, Li F, *et al.* Impacts of land use and landscape patterns on heavy metal accumulation in soil[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2471-2482.
- [14] 朱坦, 吴琳, 毕晓辉, 等. 大气颗粒物源解析受体模型优化技术研究[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 865-870.
- Zhu T, Wu L, Bi X H, *et al.* Improving receptor models for ambient air particulate matter source apportionment[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(7): 865-870.
- [15] 吕建树, 何华春. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2853-2864.
- Lü J S, He H C. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in the soils of the Jiangsu Coast [J]. Environmental Science, 2018, **39**(6): 2853-2864.
- [16] 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, Lü 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.
- [17] 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报, 2012, **67**(7): 971-984.
- Lü J S, Zhang Z L, Liu Y, *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, **67**(7): 971-984.
- [18] 宋怡, 卢新卫, 周潇, 等. 邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3130-3135.
- Song Y, Lu X W, Zhou X, *et al.* Source identification and pollution characteristics of heavy metals in suspended particles of urban road dust from Xingtai City [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3130-3135.
- [19] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. 地理学报, 2011, **66**(9): 1281-1288.
- Chen X D, Lu X W, Zhao C F, *et al.* The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior area of the second ring road, Xi'an [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, **66**(9): 1281-1288.
- [20] 陈秀端, 卢新卫. 基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- Chen X D, Lu X W. Source apportionment of soil heavy metals in city residential areas based on the receptor model and geostatistics[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2513-2521.
- [21] 董騷睿, 胡文友, 黄标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属污染源解析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- Dong L R, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2103-2111.
- [22] Wu J, Li J, Teng Y G, *et al.* A partition computing-based positive matrix factorization (PC-PMF) approach for the source apportionment of agricultural soil heavy metal contents and associated health risks [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121766.
- [23] Bzdusek P A, Christensen E R, Li A, *et al.* Source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet, Chicago: application of factor analysis with nonnegative constraints [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(1): 97-103.
- [24] 刘春慧, 田福林, 陈景文, 等. 正定矩阵因子分解和非负约束因子分析用于大辽河沉积物中多环芳烃源解析的比较研究[J]. 科学通报, 2009, **54**(24): 3817-3822.
- Liu C H, Tian F L, Chen J W, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Daliao River, China: positive matrix factorization and factor analysis with non-negative constraints [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, **54**(24): 3817-3822.
- [25] 田福林. 受体模型应用于典型环境介质中多环芳烃、二噁英和多氯联苯的来源解析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- Tian F L. Source apportionment of persistent toxic substances in typical environmental media by receptor modeling: polycyclic aromatic hydrocarbons, dioxins and polychlorinated biphenyls [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [26] 匡荟芬, 胡春华, 吴根林, 等. 结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖水期表层沉积物重金属源解析[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 964-976.
- Kuang H F, Hu C H, Wu G L, *et al.* Combination of PCA and

- PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(4): 964-976.
- [27] Wang Y M, Zhang L X, Wang J N, *et al.* Identifying quantitative sources and spatial distributions of potentially toxic elements in soils by using three receptor models and sequential indicator simulation [J]. *Chemosphere*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125266.
- [28] Lv J S, Wang Y M. PMF receptor models and sequential Gaussian simulation to determine the quantitative sources and hazardous areas of potentially toxic elements in soils [J]. *Geoderma*, 2019, **353**: 347-358.
- [29] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 934-944.
- Li F, Liu S Y, Li Y, *et al.* Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 934-944.
- [30] Deutsch C V, Journel A G. *GSLIB: geostatistical software library and user's guide* (2nd ed.) [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [31] Alary C, Demougeot-Renard H. Factorial Kriging analysis as a tool for explaining the complex spatial distribution of metals in sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(2): 593-599.
- [32] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 387-397.
- [33] Switzer P, Green A. Min/max autocorrelation factors for multivariate spatial imagery: dept. of statistics [M]. Palo Alto: Stanford University, 1984.
- [34] 付克昌, 袁世辉, 蒋世奇, 等. 基于 MAF 的传感器故障检测与诊断[J]. *化工学报*, 2015, **66**(5): 1831-1837.
- Fu K C, Yuan S H, Jiang S Q, *et al.* Sensor fault detection and diagnosis using MAF [J]. *CIESC Journal*, 2015, **66**(5): 1831-1837.
- [35] 临淄区人民政府. 临淄年鉴 [EB/OL]. <http://www.linzi.gov.cn/col/col13604/index.html>, 2020-03-13.
- [36] 吕昌平. 临淄区成品油交易现状及探索市场发展调查报告 [A]. 见: 中国财政学会. 中国财政学会 2015 年年会暨第二十次全国财政理论讨论会交流材料汇编之三 [C]. 北京: 中国财政学会, 2015. 443-445.
- [37] U. S. Environmental Protection Agency. EPA positive matrix factorization 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2014.
- [38] Hu Y N, He K L, Sun Z H, *et al.* Quantitative source apportionment of heavy metal (loid)s in the agricultural soils of an industrializing region and associated model uncertainty [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **391**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122244.
- [39] Ozeki T, Koide K, Kimoto T. Evaluation of sources of acidity in rainwater using a constrained oblique rotational factor analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(6): 1638-1645.
- [40] 刘春国, 高松峰, 卢晓峰. 最大自相关因子方法及其在遥感影像分析中的应用进展 [J]. *河南理工大学学报 (自然科学版)*, 2012, **31**(1): 66-71.
- Liu C G, Gao S F, Lu X F. Progress in the application of max autocorrelation factor method to remotely sensing imagery analysis [J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2012, **31**(1): 66-71.
- [41] 刘春菊, 刘春玲, 李召. 基于 MAF-ICA 的工业过程故障诊断 [J]. *仪表技术与传感器*, 2017, (1): 177-180, 183.
- Liu C J, Liu C L, Li Z. Fault detection based on industrial process of MAF-ICA [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017, (1): 177-180, 183.
- [42] Wackernagel H. *Multivariate geostatistics* [M]. Berlin: Springer Verlag, 2003.
- [43] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for environmental scientists* (2nd Ed.) [M]. Chichester: Wiley, 2007.
- [44] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [45] Müller H W, Schaighofer B, Kalman W. Heavy metal contents in river sediments [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1994, **72**(1): 191-203.
- [46] 王关玉, 潘懋, 刘锡大, 等. 山东省土壤中元素含量与母质的关系 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 1992, **28**(4): 475-485.
- Wang G Y, Pan M, Liu X D, *et al.* On the relationship between the concentrations of elements in soil and the types of soil-forming parent material in Shandong Province, China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1992, **28**(4): 475-485.
- [47] 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- Bai Y R, Zhang X, Zhao Y P, *et al.* Spatial distribution characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Chinese wolfberry land based on GIS and the receptor model [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2885-2894.
- [48] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 437-444.
- Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 437-444.
- [49] Lv J S. Multivariate receptor models and robust geostatistics to estimate source apportionment of heavy metals in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 72-38.
- [50] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River draining of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [51] 淄博市统计局. 淄博市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [52] Lv J S, Liu Y. An integrated approach to identify quantitative sources and hazardous areas of heavy metals in soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 19-28.
- [53] Wu J, Lu J, Li L M, *et al.* Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 234-242.
- [54] Nanos N, Rodríguez Martín J A. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: spatial variability in the Duero river basin (Spain) [J]. *Geoderma*, 2012, **189-190**: 554-562.
- [55] Xiao R, Guo D, Ali A, *et al.* Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: a case study in Hanzhong, Shaanxi, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **248**: 349-357.

- [56] Chen T, Liu X M, Zhu M Z, *et al.* Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(1): 67-78.
- [57] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(2): 466-480.
Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(2): 466-480.
- [58] 陈景春, 易廷辉, 陈丽. 重庆市市售化肥重金属含量调查分析[J]. *湖南农业科学*, 2017, (6): 41-44.
Chen J C, Yi T H, Chen L. Investigation of heavy metal concentrations of commercial fertilizers in Chongqing [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2017, (6): 41-44.
- [59] 谢景欢, 袁巧霞, 陈钢, 等. 施用沼渣的温室土壤氮累积及重金属污染状况研究[J]. *中国沼气*, 2010, **28**(6): 16-19.
- Xie J H, Yuan Q X, Chen G, *et al.* Effect of biogas residue application on nitrogen accumulation and heavy metal pollution in greenhouse soil [J]. *China Biogas*, 2010, **28**(6): 16-19.
- [60] 山东省土壤肥料总站. 山东耕地[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [61] 陈锋. 松花江流域水环境中多环芳烃的源解析方法与应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
Chen F. Study on the methods of source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons and the application in Songhua River [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [62] Zhao Y C, Xu X H, Huang B, *et al.* Using robust kriging and sequential Gaussian simulation to delineate the copper- and lead-contaminated areas of a rapidly industrialized city in Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Geology*, 2007, **52**(7): 1423-1433.



CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)