

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析

高浩然^{1,2}, 周勇^{1,2*}, 刘甲康^{1,2}, 程晓明^{1,2}, 郭嵩^{1,2}, 江衍^{1,2}, 谭恒鑫^{1,2}

(1. 华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430000; 2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430000)

摘要:为探讨襄州区重金属空间格局时空变化及其来源变化,于2009年11月和2019年11月分别在襄州区耕地土壤采集395个和326个土壤样品,测得两年铬(Cr)、铅(Pb)、砷(As)、汞(Hg)和镉(Cd)含量,采用经验贝叶斯克里金法(EBK)得出两年5种土壤重金属含量空间格局情况及变化量分布情况,并利用地理探测器模型(GDM)计算19种环境因子和5种重金属含量 q 解释力并比较两年变化情况。结果表明,与2009年相比,2019年襄州区Cr、Pb、Hg和As这4种土壤重金属含量整体趋于降低,Cd整体含量增加;2019年襄州区土壤重金属含量空间分异情况较2009年趋于复杂,Pb、Hg和Cd在南部、Hg在中部市区及周边地区也表现为含量增加;各元素向北及西北部地区表现为含量降低。2019年自然因子和污染企业距离对5种土壤重金属含量单因子解释力均有所下降,且单因子主控下对其含量的影响力显著性降低,而人类活动因子尤其是居民点用地距离、道路距离、污染企业用地和环境因子对土壤重金属元素的叠加影响力增强。说明2019年土壤重金属来源变化由以结构性因素为主要影响因素趋于复杂,污染企业的排放对重金属元素影响力降低,而人类活动对重金属含量影响增加。

关键词:土壤重金属;经验贝叶斯插值;地理探测器;时空变化;襄州区

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2022)11-5180-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202202068

Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model

GAO Hao-ran^{1,2}, ZHOU Yong^{1,2*}, LIU Jia-kang^{1,2}, CHENG Xiao-ming^{1,2}, GUO Song^{1,2}, JIANG Yan^{1,2}, TAN Heng-xin^{1,2}

(1. Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430000, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430000, China)

Abstract: In order to explore the spatial and temporal changes in spatial patterns and source changes in heavy metals in Xiangzhou District, 395 and 326 soil samples were collected from cultivated soil in Xiangzhou District in November 2009 and November 2019, respectively. The contents of Cr, Pb, As, Hg, and Cd during these two years were measured. The spatial pattern and variation distribution of five types of heavy metals during these two years were obtained by using the empirical Bayesian Kriging (EBK) method. The effect (q -statistic) of 19 environmental factors and 5 types of heavy metals was calculated by using the geographical detector model (GDM), and the changes over the two years were compared. The results showed that compared with that in 2009, the heavy metal contents of Cr, Pb, Hg, and As in Xiangzhou District were decreased as a whole in 2019, whereas the Cd content increased overall. The spatial differentiation of heavy metals in the soil in Xiangzhou District in 2019 was more complicated than that in 2009. Pb, Hg, and Cd in the south and Hg in the central urban area and surrounding areas also increased. The content of each element decreased to the north and northwest. Compared with that in 2009, the explanatory power of natural factors and the distance between pollution enterprises on the single factor of the five soil heavy metal contents in 2019 decreased, and the influence on the contents under the control of single factors decreased significantly. The superposition influence of human activity factors increased, especially the distance between residential land, road, and land for pollution enterprises and environmental factors on soil heavy metal elements. These results indicated that the changes in soil heavy metal sources in 2019 tended to be complex, with structural factors as the main influencing factor. The influence of the emission of polluting enterprises on heavy metal elements decreased, whereas the influence of human activities on heavy metal content increased.

Key words: soil heavy metals; empirical Bayesian interpolation; geographical detector; spatio-temporal change; Xiangzhou District

土壤作为人类赖以生存的自然环境和农业生产必不可少的重要资源,耕地是粮食生产最重要的物质基础,是不可复制农业自然资源^[1]。随着城市化和工业化进程的发展,以及不断增长的人口数量对粮食产量需求的日益增加,工业“三废排放”及农药和化肥的盲目施用,导致我国土壤存在不同程度的污染,尤其是表层耕地土壤污染情况日益严重^[2~4]。重金属作为土壤首要污染物^[5,6],不仅会降低土壤生产力导致土壤质量下降^[7],不同重金属的水溶

性、不稳定性及其他化学特性对粮食作物和人体同样存在重大潜在风险^[8],并且会进一步造成土壤水及地下水^[9]乃至整个生态环境污染。土壤重金属在空间上存在很强的异质性,其影响因素及重金属来源也复杂多样^[10]。目前,土壤重金属污染源解析方

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-03-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171061)

作者简介: 高浩然(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为农田土壤污染管控与防治, E-mail: ghr_9393@mails.ccnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yzhou@mail.ccnu.edu.cn

法包括以逐步回归分析、Pearson 相关性分析、主成分分析和聚类分析等的多元统计学方法和地统计学结合方法^[11~14]; 地理加权回归(GWR)模型、随机森林模型(RF)、多元受体模型-非负约束因子分析(FA-NNC)和贝叶斯最大熵模型等机器学习方法和模型^[15~18], 相关研究还运用 RF 模型和 GWR 模型对区域土壤重金属含量及分布进行空间预测分析^[19~21]. 对现有研究梳理发现, 土壤重金属源主要以自然环境源(土壤类型^[22]、成土母质^[23]、海拔高度^[24]等)和人类活动源(土地利用方式^[12,25]、工业排放^[26,27]、交通活动^[28]等)为主, 其中, 自然环境源主要决定了在不受人类干扰条件下土壤所积累的重金属含量的自然背景值, 这也是影响土壤重金属空间异质性的基础关键因素, 而往往人类活动可能会造成一种或多种土壤重金属积累值突变或出现异于背景值的时空变异特征.

在上述对土壤重金属来源分析的研究中, 对某种重金属其来源进行了充分讨论, 但大多围绕单一来源进行识别, 且对来源因子贡献度量化和影响因子之间的交互作用对土壤重金属来源影响的研究也相对较少. 地理探测器(GDM)模型提供了一组用来揭示某种变量其背后驱动力的统计学方法^[29], 其优势在于它不仅可以通过单因子模型来计算某单一变量对研究对象的解释力强度, 还可以通过交互因子模型计算不同变量对研究对象的交互作用解释力强度, 具体原理见文献[29]. 目前, 地理探测器多和地理信息技术、主成分分析、地统计学和地理加权回归等方法相结合, 在空间相关性方面研究广泛, 并且逐渐开始在土壤重金属来源分析及空间预测方面应用^[30~32]. 经验贝叶斯克里金法(EBK)是一种高级地统计插值方法, 区别于普通克里金(OK)等方法, 通过既有点位进行插值预测, EBK 法则通过估计半变异函数作为未知区域半变异函数进行插值预测^[33], 和传统空间插值预测不同的是, EBK 法是通过半变异函数的基础预测计算, 得出拟合度, 对于不连续和空间突变数据的预测方面稳定性较高, 尤其在重金属空间格局变异及预测方面有较好的适用性及较高的预测精度^[34~36].

基于此, 选择当前国内外重点关注的镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)和铬(Cr)这 5 种主要土壤重金属元素为研究对象, 以湖北省襄阳市襄州区为研究区, 选择自然环境和人类活动两大类来源, 并划分为土壤属性[成土母质(X1)、土壤类型(X2)、土壤 pH(X3)、土壤有机质(X4)]、地形因子[高程(X5)、坡度(X6)、坡向(X7)、地表起伏度(X8)]、气候因子[平均气温(X9)、平均降水量(X10)]、农

业生产[归一化植被指数(X11)、耕地类型(X12)]和社会经济[人口密度(X13)、GDP(X14)、河流水库距离(X15)、工矿距离(X16)、居民点距离(X17)、公路距离(X18)、污染企业(X19)]这 5 类因子属性共 19 种影响因子, 利用“经验贝叶斯克里金(EBK)”插值和“地理探测器模型(GDM)”对比 2009 年和 2019 年襄州区 5 种耕地土壤重金属元素含量空间格局和重金属来源, 并对 10 a 尺度下空间格局变化和来源变化进行分析讨论. 掌握襄州区土壤重金属空间格局和 10 a 间空间变化情况, 通过定量分析识别 5 种土壤重金属来源及变化, 以期为进一步研究土壤重金属时空变异和驱动机制、耕地土壤污染管控和粮食安全等方面工作提供重要基础理论和实践工作经验.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

襄州区隶属于湖北省襄阳市, 居汉江中游. 东经 111°44'~112°23'、北纬 31°46'~32°28', 北与河南省接壤, 属亚热带半湿润地区, 年均降水量为 800 mm 左右, 平均气温为 15.6℃; 全区土地面积 2 306 km², 2019 年襄州区耕地面积 1 700.53 km², 其中水田 398.23 km²、旱地 1 289.64 km² 和水浇地 12.66 km². 全境地貌类型丰富, 北部以低山丘陵为主, 其他地区以汉江冲积平原为主, 境内河流总长度 1 098.1 km, 大中小型水库 192 座; 土壤类型以黄棕壤、水稻土和潮土为主. 襄州区是湖北省公路和铁路运输的重要交通枢纽节点, 福银、二广高速公路, 襄渝、焦柳和蒙华铁路, 汉十和郑渝高铁交汇于此, 经济发展水平较高, 居湖北省前列, 制造业类型丰富, 汽车及零部件、农产品加工和装备制造三大支柱产业接连跨越百亿元产值大关. 如表 1 所示, 根据环境保护部门所提供数据可知, 2009 年襄州区拥有如骆驼集团襄阳蓄电池有限公司和襄阳市特艺保温材料工程有限公司等 11 家潜在污染企业, 2019 年新增戴瑞米克襄阳电池隔膜有限公司、双沟碧清源污水处理有限公司等 7 家污染企业, 上述交通线网及潜在污染企业均可能对周边水体和土壤造成不同程度的污染, 进而造成周边农田耕层土壤重金属污染. 襄州区耕地类型分布及两年污染企业分布情况如图 1 所示.

1.2 土壤样品采集与化验

1.2.1 土壤样品外业采集

本研究数据来源于“襄州区耕地土壤环境质量类别划分项目”中 2009 年 11 月(秋收后)和 2019 年 11 月下旬, 以确保样点包含每种耕地类型, 并以

表 1 襄州区 2009 年和 2019 年潜在污染企业统计
Table 1 Statistics of potential polluting enterprises
in Xiangzhou District in 2009 and 2019

年份	企业名称
2009	襄阳金力环保工程有限公司
	东风襄阳旅行车有限公司
	湖北恒延铝业有限公司
	骆驼集团襄阳蓄电池有限公司
	湖北佳通钢帘线有限公司
	襄阳市特艺保温材料工程有限公司
	湖北襄诚鞋业有限公司
	襄阳鲁花浓香花生油有限公司
	武钢集团襄阳重型装备材料有限公司
	襄阳普士利工程器材有限公司
2019	中车洛阳机车有限公司襄阳分公司
	襄阳金力环保工程有限公司
	东风襄阳旅行车有限公司
	湖北恒延铝业有限公司
	骆驼集团襄阳蓄电池有限公司
	湖北佳通钢帘线有限公司
	襄阳市特艺保温材料工程有限公司
	湖北襄诚鞋业有限公司
	襄阳鲁花浓香花生油有限公司
	武钢集团襄阳重型装备材料有限公司
	襄阳普士利工程器材有限公司
	中车洛阳机车有限公司襄阳分公司
	湖北嘉福达节能科技公司
	襄阳美利信科技有限责任公司
	湖北新日电动车有限公司
	襄阳九洲汽车有限公司
	襄阳市襄州区双沟碧清源污水处理有限公司
	正大食品(襄阳)有限公司
	戴瑞米克襄阳电池隔膜有限公司

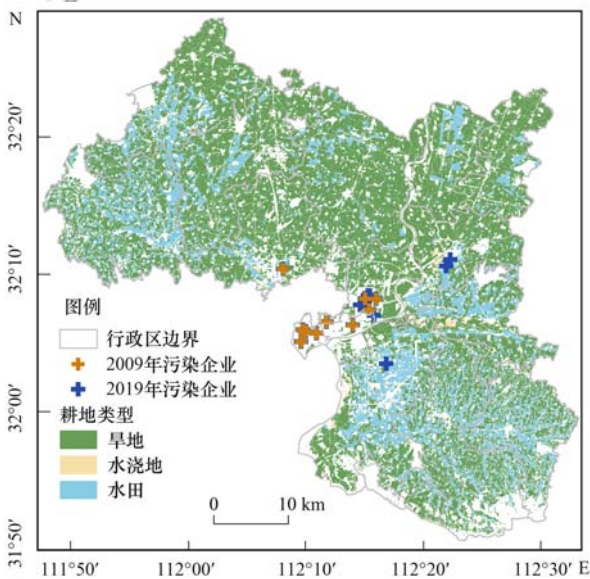


图 1 襄州区耕地类型及污染企业分布示意
Fig. 1 Cultivated land type and polluting enterprises
spatial distribution of Xiangzhou District

可能为潜在污染情况较严重地区为重点区域,采集耕层土壤(0~20 cm 深度)并获取的耕地土壤重金

属含量实测数据,以三调耕地图斑为基础,综合考虑自然因素及工矿用地、交通线网和居民点等土地利用实际情况,并结合两期耕地利用情况及污染区域比重的空间变化,分别获得了 395 个(2009 年)和 326 个(2019 年)样点,在外业采样过程中,记录各采样点经纬度,利用 ArcGIS 软件生成采样点分布如图 2 所示.并记录耕地类型和土壤类型等因子信息.

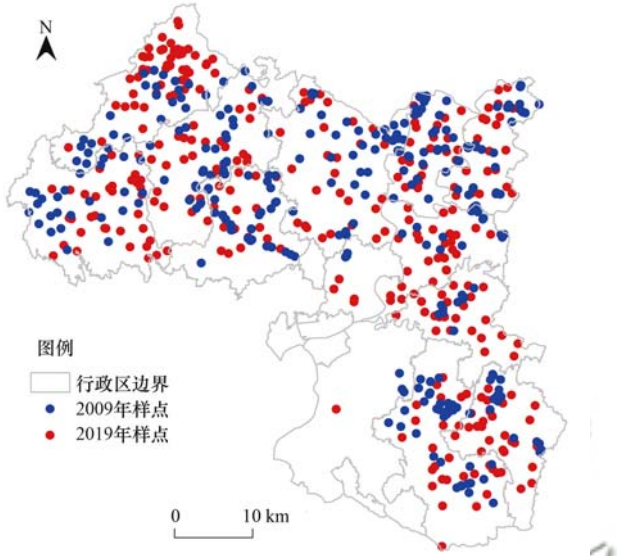


图 2 襄州区两年土壤采样点分布
Fig. 2 Distribution of soil sampling sites
in Xiangzhou District for two years

1.2.2 土壤样品室内化验

将外业采集到的土壤样品的总质量进行记录,经过风干、除杂、研磨过筛时不能和其它样品同时进行,使样品编码保持一致;样品保存过程中防止阳光直射、交叉污染和虫害等问题造成土壤样品质量出现误差而导致最终测定结果不准确的情况;采用油浴加热 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 重铬酸钾-硫酸溶液的氧化容量法测定土壤有机质含量^[37];采用电位法测定土壤 pH^[38];采用四酸法(HCl-HNO₃-HF-HClO)对土壤样品进行消解^[39]后待测重金属含量,其中 Cd 采用石墨炉原子吸收法测定;Cr 采用火焰原子吸收法测定;Hg、Pb 和 As 采用原子荧光光谱法测定^[40].

1.3 经验贝叶斯克里金插值(EBK)

利用 ArcGIS10.2-Geostatistical Analyst 模块中 EBK 法对两期土壤重金属含量空间格局进行插值分析.

1.4 地理探测器模型

地理探测器(GDM)作为一种用于分析和探测空间分异性的工具,能够计算某因子对因变量空间分异的解释力和影响程度,从而揭示因变量呈现空间差异的因素^[29],其计算公式如下.

1.4.1 因子探测器

$$q = 1 - (N\sigma^2)^{-1} \cdot \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 = 1 - \frac{SSW}{SST}$$
$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N\sigma^2$$

式中, $h=1, \cdots, n$; L 为自变量 X 的层数; N_h 和 N 分别为 h 层和总区域样本单元数; σ_h^2 和 σ^2 为 h 层和该区域的方差; SSW 为各层空间方差之和, SST 为区域内 Y 的总方差。

1.4.2 交互因子探测器

交互作用探测器是探测影响因素之间是否具有相互作用,即变量 $X_1 \cap X_2$ 的共同作用对土壤重金属含量分布情况的交互作用是增强还是减弱或是相互独立. 其计算原理为:

计算变量 X_1 和 X_2 对土壤重金属含量的解释力 q 值: $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$; 再计算它们交互时的 q 值: $q(X_1 \cap X_2)$; 并对 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 与 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较, 其计算结果存在以下 5 种模式。

非线性协同: $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

相互独立: $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

双因子协同: $q(X_1 \cap X_2) > \text{MAX} [q(X_1), q(X_2)]$

单因子非线性拮抗: $\text{MAX} [q(X_1), q(X_2)] > q(X_1 \cap X_2) > \text{MIN} [q(X_1), q(X_2)]$

非线性拮抗: $\text{MIN} [q(X_1), q(X_2)] > q(X_1 \cap X_2)$

1.5 重金属污染源因子选择及获取方法

无人为干扰的自然地理条件下的土壤环境本身具有一定含量的重金属, 即土壤重金属背景含量^[3]. 自然因素, 如成土母质和气候等因素等对土壤重金属背景值含量影响较为显著^[41]. 耕地土壤重金属来源除自然因素外, 还需要考虑人为因素对其影响. 在现有研究的基础之上, 选择土壤属性(成土母质、土壤类型、土壤 pH 和土壤有机质)、地形因

子(高程、坡度、坡向和地表起伏度)、气候因子(平均气温、平均降水量)、农业生产(归一化植被指数、耕地类型)和社会经济(人口密度、GDP、河流水库距离、工矿距离、居民点距离、公路距离和重点污染企业)这 5 类因子属性共 19 种影响因子, 并将 19 种影响因子变量分别表示为 $X1 \sim X19$ 以便进行影响因素分析计算与结果表达. 土壤属性和农业生产数据来源于农业农村部耕地质量评价项目, 地形因子以地理空间数据云平台(www.gscloud.cn)所获得的高程数据为基础, 并通过 ArcGIS-栅格计算器计算后得出地形因子相关栅格图像; 气候因子、及人口密度和 GDP 数据通过中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)获得; 以襄州区二调和三调图斑——土地利用现状数量图层为基础, 使用“欧氏距离”分析工具获得两年河流水库、工矿用地、居民点、公路用地距离和重点污染企业距离。

2 结果与讨论

2.1 两年耕地土壤重金属含量基本统计特征分析

如表 2 所示, 与湖北省土壤元素背景值含量相比, 2009 年 5 种土壤重金属元素中, Pb、As 含量的平均值高于背景值, 其余 3 种元素含量低于背景值. 相比于 2009 年, 2019 年 Cr、Pb、As 和 Hg 含量总体平均值均有所降低, Cd 含量总体平均值略有升高, 2009 年 $\omega(\text{Hg})$ 最大值为 $1.560 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 超过湖北省背景值, 其变异系数 $> 100\%$ 属于强变异程度; 2019 年 Hg 变异系数降低至 93.74% , 属于高强度变异水平, 说明研究区 Hg 元素含量受到人为因素作用影响较强. 其他各元素变异情况属于弱-中等程度变异, 其中 Cr 和 Pb 两年均属于弱变异 ($C.V < 20\%$), As 和 Cd 两年均属于中等程度变异 ($20\% \leq C.V \leq 80\%$), Cr、Pb 和 Cd 这 3 种元素变异水平相较 2009 年均有所增强, As 在 2019 年变异水平降低。

表 2 襄州区两年土壤重金属含量基本统计特征

Table 2 Basic statistical characteristics of soil heavy metal content in two years in Xiangzhou District

变量	年份	最小值 /mg·kg ⁻¹	最大值 /mg·kg ⁻¹	平均值 /mg·kg ⁻¹	标准差 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%	背景值 /mg·kg ⁻¹	偏度	峰度	正态性
Cr	2009	55.400	103.000	83.646	8.023	9.59	86.00	-0.53	0.23	正态
	2019	52.900	96.700	75.213	8.907	11.84		0.08	-0.61	正态
Pb	2009	21.900	47.500	29.548	4.001	13.54	26.70	1.09	2.13	正态
	2019	20.100	47.100	28.387	3.943	13.89		1.05	2.18	正态
As	2009	5.760	21.500	12.984	2.929	22.56	12.30	-0.35	-0.54	正态
	2019	6.540	19.800	12.326	2.554	20.72		-0.21	-0.59	正态
Hg	2009	0.016	1.560	0.055	0.115	209.59	0.08	11.67	146.96	对数正态
	2019	0.016	0.500	0.052	0.048	93.74		6.13	47.42	对数正态
Cd	2009	0.053	0.360	0.134	0.028	21.50	0.17	2.16	13.90	对数正态
	2019	0.064	0.280	0.139	0.031	22.61		0.85	1.83	正态

2.2 土壤重金属空间格局预测插值结果分析

根据经验贝叶斯克里金 (EBK) 插值预测模型对襄州区 2009 年和 2019 年 5 种土壤重金属插值结果如图 3 所示。根据插值预测结果可知,2009 年襄州区土壤 $\omega(\text{Cr}) \geq 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分布面积较广,结合样点统计数据可知在襄州区北部存在极高值;仅在东北部和中部含量较低,存在极低值。Pb 含量在全

境范围内含量均较低,仅在北部和中部中心城区附近存在极高值,这可能是影响 Pb 平均值高于地区背景值的重点污染地区。As 总体水平较高,高值区面积分布较广,仅在东北部和中部地区存在极低值。Hg 水平全境较低,仅在东部和西北部存在两个极高值。 $\omega(\text{Cd})$ 在 $0.12 \sim 0.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 水平分布范围最广,仅有 10% 的样点值超过湖北省背景值。

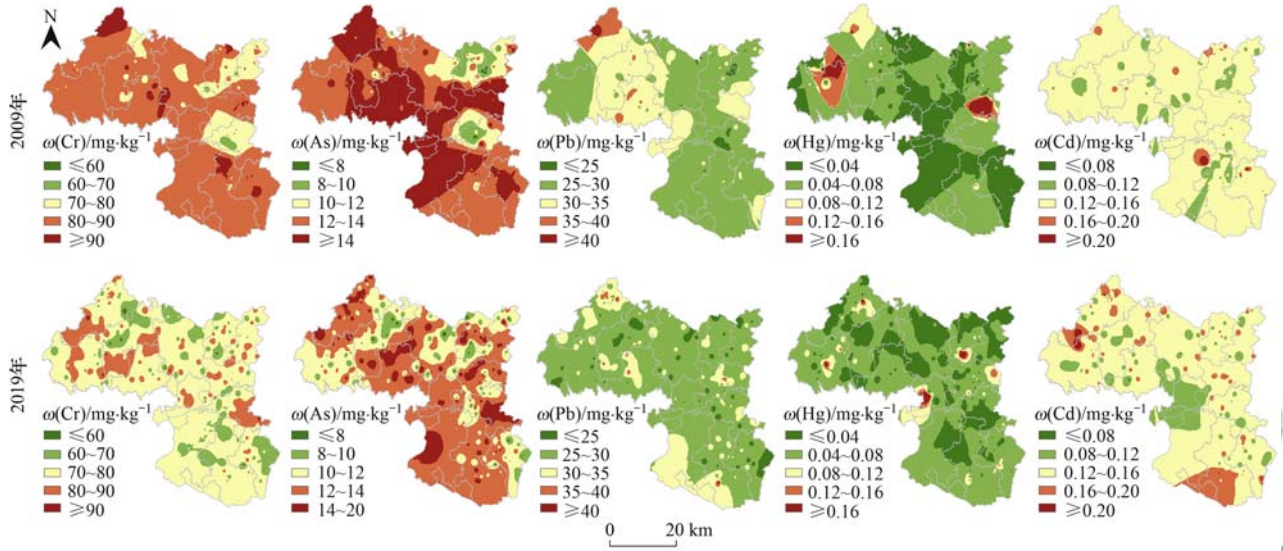


图3 襄州区两年土壤重金属含量空间分布 EBK 插值预测结果

Fig. 3 EBK interpolation results of soil heavy metal content and spatial distribution in two years in Xiangzhou District

相较于 2009 年,2019 年土壤 Cr、Pb、As 和 Hg 的平均值均有所降低,其中襄州区 Cr 在 2019 年空间异质性变强,相较于 2009 年,这一年高值区和低值区较为分散,2009 年高值区主要位于西北部 and 东部地区,且 Cr、As 和 Hg 这 3 种元素含量高值区范围变小,总体含量水平有所下降,其中 $\omega(\text{As})$ 以 $12 \sim 14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 水平为主,但低值区分布范围较 2009 年较广,其中西北部、中部和东南部地区均存在含量小于 $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的地区;2019 年 $\omega(\text{Hg})$ 极高值较 2009 年下降 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,2019 年高值区仅位于中部中心城区和北部区域,极高值面积明显降低,含量位于 $0.04 \sim 0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的地区面积扩大; $\omega(\text{Pb})$ 高值区格局较 2009 年分布面积降低,仅在北部和南部

极少数地区存在含量大于 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区域,且这一年总体含量水平也略有下降。2019 年 Cd 空间异质性变强,高值区范围有所增加,且较 2009 年高值区出现变化,位于西北部地区,而中部中心城区含量水平出现明显降低。

为了进一步比较襄州区 2019 年 5 种土壤重金属元素含量的空间格局较 2009 年的变化情况,研究将在 EBK 插值结果的基础上,采用 ArcGIS10.2-栅格计算工具,分别计算 5 种土壤重金属含量 10 a 间的绝对变化量,表示两期 5 种土壤重金属含量的空间变化情况,其中负值表示含量降低,正值表示增加。2009~2019 年 5 种重金属元素含量变化量空间分布情况如图 4 所示。其中 Cr 大部分地区变化情况

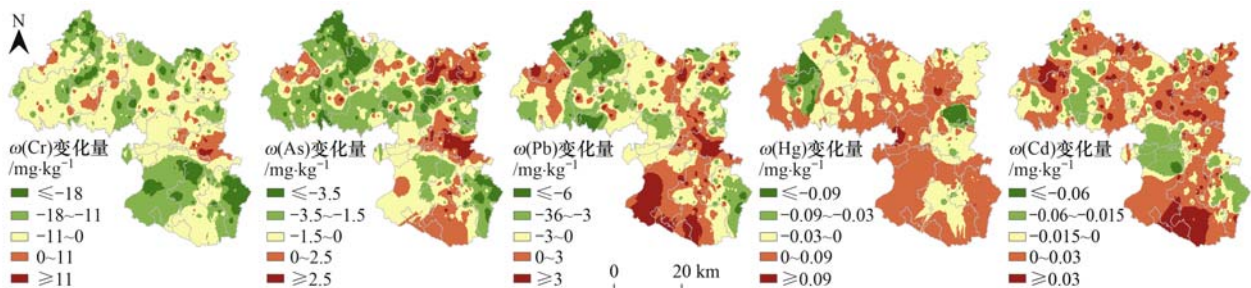


图4 襄州区土壤重金属含量变化空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of soil heavy metal variation in Xiangzhou District

表现为含量降低,在东部和东北部分地区含量增加情况较为集中,表明这些地区可能存在 Cr 元素在 10 a 间有累积过程,Pb 和 As 变化情况较为一致,出现含量明显升高的地区主要集中在整个东部,具体为东北部和东南部较为明显,西部也有少量地区存在含量增加的情况,而在北部一些地区含量下降程度较高,说明 Pb 和 As 可能存在同源累积的情况;Hg 和 Cd 的变化量主要表现在全境范围内以含量增加为主,其中 Hg 主要表现在中心城区及周边地区含量增加情况较为明显,这可能与 2019 年新增污染企业对土壤重金属含量积累影响有关,而 Cd 含量在中部中心城区附近表现为降低,在南部和北部大部分地区表现为含量增加的情况. 根据各土壤重金属含量 10 a 间变化分布情况可知,襄州区土壤重金属含量在 10 a 间总体变化情况以向东、东北、向南和向中心城区累积,向北和西北地区降低的趋势.

2.3 土壤重金属污染源及变化分析

2.3.1 因子探测器结果

利用 GDM 模型中因子探测器(factor detector)分别计算了 2009 年和 2019 年 5 种土壤重金属元素与 19 种环境变量($X_1 \sim X_{19}$)之间的相关性 q 解释力, q 解释力值表示各环境因子对土壤重金属含量的影响强度,进而可根据 q 值大小判断土壤重金属来源于途径的重要性程度. 在进行 GDM 模型计算之前,需要对变量进行标准化处理,具体处理方法为对数值型变量以减少变量取值个数,实现样本量的缩减为原则. 采用自然断点法进行离散化处理,每种指标分为 7 个数值区间,对无法进行定量计算的描述性变量(耕地类型、土壤类型和成土母质等)进行分类标准化处理,每种指标分为 7 个类别并以数值形式表示. 其两年计算统计结果表 3 所示.

表 3 两年地理探测器-因子探测器模型输入结果¹⁾

Table 3 Input results of geodetector factor-detector model for two years																				
元素	年份	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19
Cr	2009	0.023	0.055	0.009	0.023	0.068	0.013	0.014	0.087	0.007	0.099	0.037	0.003	0.013	0.001	0.02	0.023	0.027	0.024	0.029
	2019	0.001	0.001	0.019	0.027	0.008	0.015	0.037	0.017	0.013	0.013	0.021	0.001	0.009	0.02	0.026	0.012	0.058	0.022	0.006
Pb	2009	0.09	0.086	0.009	0.05	0.157	0.004	0.039	0.067	0.099	0.092	0.059	0.017	0.014	0.005	0.043	0.135	0.049	0.036	0.067
	2019	0.002	0.006	0.029	0.091	0.01	0.029	0.019	0.042	0.015	0.013	0.12	0.006	0.009	0.009	0.011	0.017	0.019	0.019	0.013
As	2009	0.216	0.245	0.068	0.049	0.377	0.003	0.038	0.083	0.065	0.128	0.095	0.007	0.022	0.008	0.075	0.08	0.042	0.028	0.137
	2019	0.000	0.002	0.016	0.045	0.012	0.004	0.021	0.021	0.01	0.007	0.06	0.003	0.004	0.013	0.02	0.005	0.033	0.021	0.011
Hg	2009	0.004	0.005	0.01	0.009	0.005	0.006	0.027	0.006	0.003	0.000	0.003	0.437	0.032	0.031	0.012	0.016	0.005	0.011	0.011
	2019	0.009	0.016	0.012	0.026	0.012	0.005	0.02	0.006	0.016	0.016	0.039	0.000	0.011	0.013	0.024	0.018	0.026	0.013	0.033
Cd	2009	0.006	0.027	0.035	0.045	0.003	0.01	0.034	0.002	0.013	0.024	0.009	0.002	0.014	0.012	0.017	0.023	0.01	0.027	0.026
	2019	0.006	0.007	0.049	0.037	0.023	0.019	0.028	0.046	0.006	0.003	0.032	0.008	0.012	0.015	0.01	0.007	0.073	0.019	0.024

1) 数据的显著性($P < 0.05$),表示影响因素对重金属含量影响力存在显著性

由表 3 可知,2009 年影响 Cr 的主要因子为成土母质、土壤类型、高程、平均降水量和地表起伏度,其中平均降水量对 Cr 含量 q 解释力最高,并结合变异系数情况 Cr 来源于成土母质和原始土壤类型的积累并受自然因素中高程和降水量因素影响较强; 2019 年土壤有机质、土壤 pH、坡向和平均气温等自然环境因素对 Cr 含量影响因素解释力增强,河流水库距离和居民点用地距离对其解释力在 2019 年明显升高,而工矿距离对 Cr 影响力下降. 孔晨晨等^[36]对北京怀柔土壤 Cr 影响因素研究得出,土壤 pH 值会影响土壤对 Cr 的吸附和迁移,对土壤 Cr 含量造成一定的影响,但这种影响需要分别讨论自然环境与人类活动影响. 襄州区人口密度和工业化水平平均较高,因此,考虑 2019 年由于人类活动增强对土壤 Cr 积累的影响较为显著,而工业污染排放对 Cr 积累的情况得到了一定改善.

2009 年影响 Pb 的主要因子为成土母质、土壤

类型、高程、平均气温和平均降水量等自然环境因素,和工矿用地距离与重点污染企业距离等社会经济因素; 2019 年土壤 pH 和有机质对 Pb 影响解释力增加,李艳玲等^[26]研究得出 Cd 和 Pb 污染主要来源于冶炼厂排放,根据襄州区污染企业统计结果,并结合单因子探测器结果,考虑受多种人类活动模式共同影响.

2009 年成土母质、土壤类型和平均降水量等自然环境因素对 As 影响力显著,重点污染企业对 As 影响也较强,2019 年自然环境因素对 As 影响程度明显降低,而社会经济因子等人类活动对 As 的影响程度也未见明显提升,结合变异系数情况分析表明,2009 年土壤 As 积累主要受环境因子影响,汪花等^[42]对喀斯特地区农业土壤 As 的研究结论得出,As 空间变异以结构性变异为主,并得出 As 主要受成土母质、土壤类型、气候条件和坡度的影响显著,这与本研究对土壤 As 在 2009 年影响因素来源

分析结果较为一致,因此考虑 2019 年土壤 As 含量来源存在变化,应当考虑人类活动尤其是农业活动,如耕作制度和耕作方式对 As 积累变化的影响。

2009 年土壤 Hg 含量与耕地类型存在极强相关性,与人口密度和 GDP 含量也存在一定的相关性,其含量和来源受人类活动影响强度较大,2019 年 Hg 元素含量来源解释力变化主要表现在社会因子如居民点用地距离和重点污染企业距离,以及 NDVI 的解释力比重上升。陈秋禹等^[43]对农业活动对土壤 Hg 变化影响发现,人为耕作活动对土壤 Hg 扰动较为强烈,这与 2009 年襄州区 Hg 来源分析结果较为一致,而在 2019 年考虑土壤 Hg 的积累主要来自于污染企业的排放随灌溉水流入到农田土壤中富集所造成。李雨等^[31]研究得出 Hg 含量较高的区域为湘江边上和东部工业发达区,因此,结合研究结果可知,襄州区 Hg 含量受人类活动影响相较 2009 年变强。

2009 年土壤 Cd 含量与 19 种环境因子相关性均较弱,仅和土壤有机质、土壤 pH 存在相对显著的相关性,考虑其含量和空间分布格局不受单一因素影响。地表起伏度对 Cd 含量 q 解释力比重增加,坡向对 Cd 的 q 解释力值降低,但在 2019 年其影响力比重增加,且居民点距离、污染企业用地距离的 q 解释力比重也有所增加,说明较 2009 年,Cd 受到人类活动影响强度增加。

2.3.2 交互因子探测器结果

根据因子探测器计算结果可知,影响襄州区土壤重金属来源的可能不是单一因子影响。在实际环境中单一因子或者单一性质的因素影响重金属的分布和变化无法全面解释土壤重金属来源情况^[31]。GDM 模型中交互因子探测器(interaction detector)相较于其他模型,其最大优势在于它可以计算出不同环境因子对土壤重金属空间变异情况的交互作用。

交互探测器结果如图 5 和图 6 所示,其中,横轴和纵轴均表示影响因子,其数值表示两种影响因子交互作用的 q 解释力大小,色带表示解释力程度,颜色越深表明 q 解释力越高。结果表明,19 种影响因子的交互作用对两年 5 种土壤重金属空间格局 q 解释力均高于单因子作用的 q 解释力。具体表现为 2009 年污染企业用地距离和土壤类型、高程、地表起伏度、平均降水量和河流水库距离对土壤 Cr 含量空间格局交互均较强,其中污染企业用地和工矿用地距离对土壤 Cr 的解释力最强;这与刘斌等^[16]对 Cr 主要来源于土壤母质等自然源结论一致,2019 年高程因子和各因子的交互影响对土壤 Cr 含量解

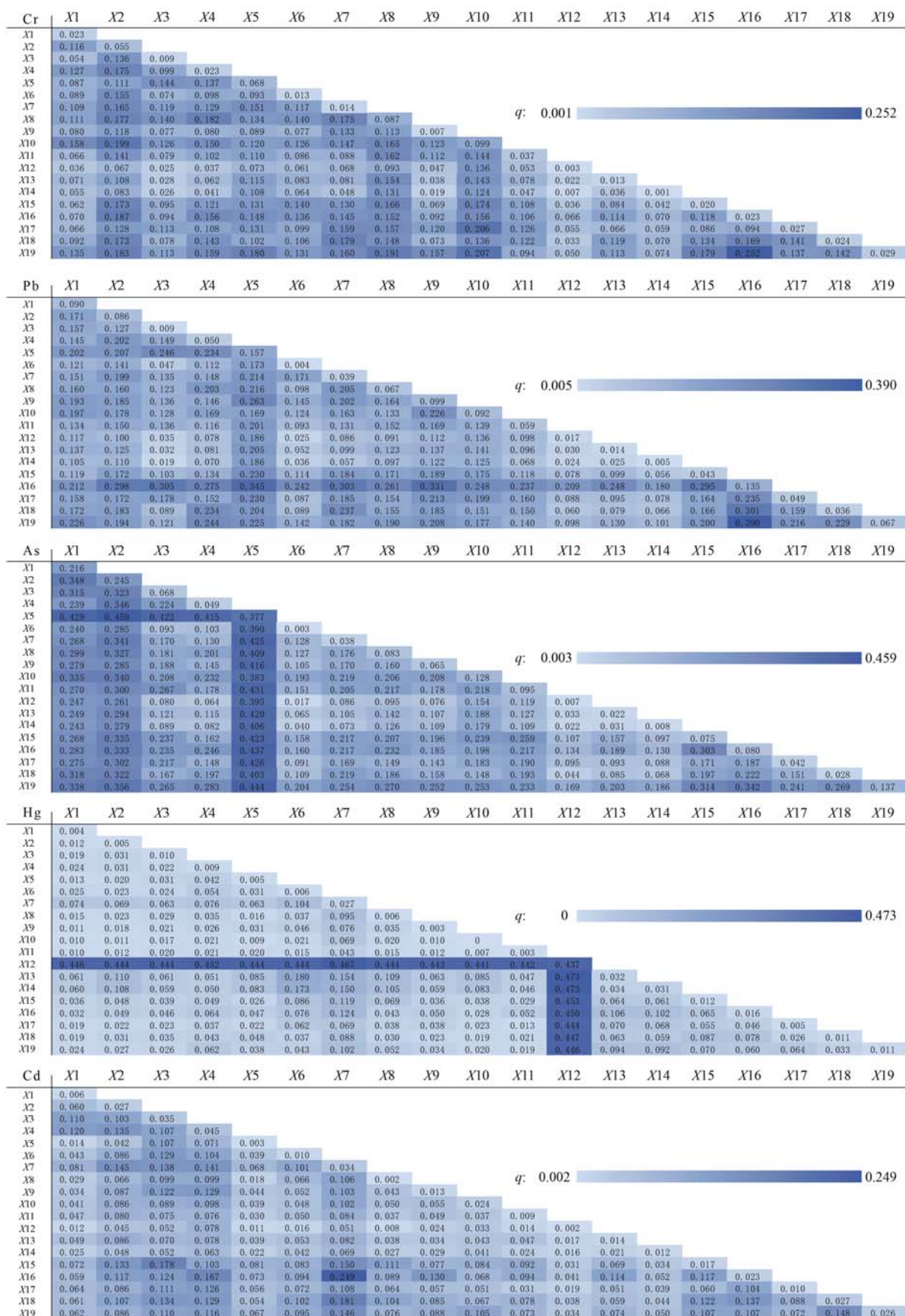
释力增强,其中居民点用地距离和高程因子对 Cr 交互作用最强,这与李雨等^[31]得出“高程对 Cr 的解释力明显大于其对 Pb、Cd、Hg 和 As 的解释力”这一结论较为一致,但考虑研究区属于汉江中游冲击平原为主,海拔高度区内差异不明显,因此高程因子对 Cr 含量的主导影响作用不够明显,而主要表现在高程因子对人类活动因子对 Cr 来源的变化的交互影响作用。

2009 年污染企业用地和工矿用地距离对 Pb 交互作用 q 解释力最强,其它因子交互作用表现为污染企业用地和工矿用地距离分别和其它因子的交互作用的解释力均较强;2019 年高程因子和居民点用地距离交互作用对 Pb 含量解释力最强,居民点距离和土壤 pH 以及工矿用地、居民点用地、河流水库用地和公路用地距离等人类活动因子间交互作用对 5 种土壤重金属元素空间格局影响也较强,污染企业用地距离和其它因子之间的交互作用力强度下降,表明尽管 2019 年新增的污染企业对土壤 Pb 含量的积累作用下降,其来源主要表现在人类活动对土壤 Pb 的影响。

2009 年自然环境因子交互作用对土壤 As 表现为高程因子和各因子交互作用远高于其他交互因子 q 解释力强度,其次为土壤类型、成土母质和污染企业用地和各因子之间的交互作用也均较强,说明 As 在土壤环境来源基础上,高程对其含量影响力最为显著,其次为污染企业用地距离;这与李雨等^[31]得出“高程对 Cr 的解释力明显大于其对 Pb、Cd、Hg 和 As 的解释力”这一结论不符,说明襄州区高程因子和其它因子之间的交互叠加影响力增加了高程因子对 As 累积影响力的表现,但在 2019 年高程因子对 As 含量的单因子主导作用力也明显减弱,说明 As 在 2019 年的来源情况较 2009 年趋于复杂化。

根据因子探测器结果和交互因子探测器结果共同分析可知,2009 年 Hg 含量受耕地类型显著影响,且耕地类型和人口密度和地形因子的交互作用 q 解释力最强,这与王信凯等^[44]对 Hg 的来源受农业活动和人类活动影响这一结论一致,但与受成土母质等影响结论不符;2019 年耕地类型因子对 Hg 含量的影响力下降,而居民点距离和道路用地和污染企业距离的交互作用力较强。

2009 年,Cd 含量受坡向和河流水库、工矿用地、道路用地和污染企业用地距离交互作用影响较为显著,且坡向和土壤有机质、成土母质等自然环境因子交互作用影响也较强,但 q 解释力不高;结合单因子探测器结果可知,Cd 含量受单一环境作用因子影响不明显,考虑存在其他对 Cd 含量及来源



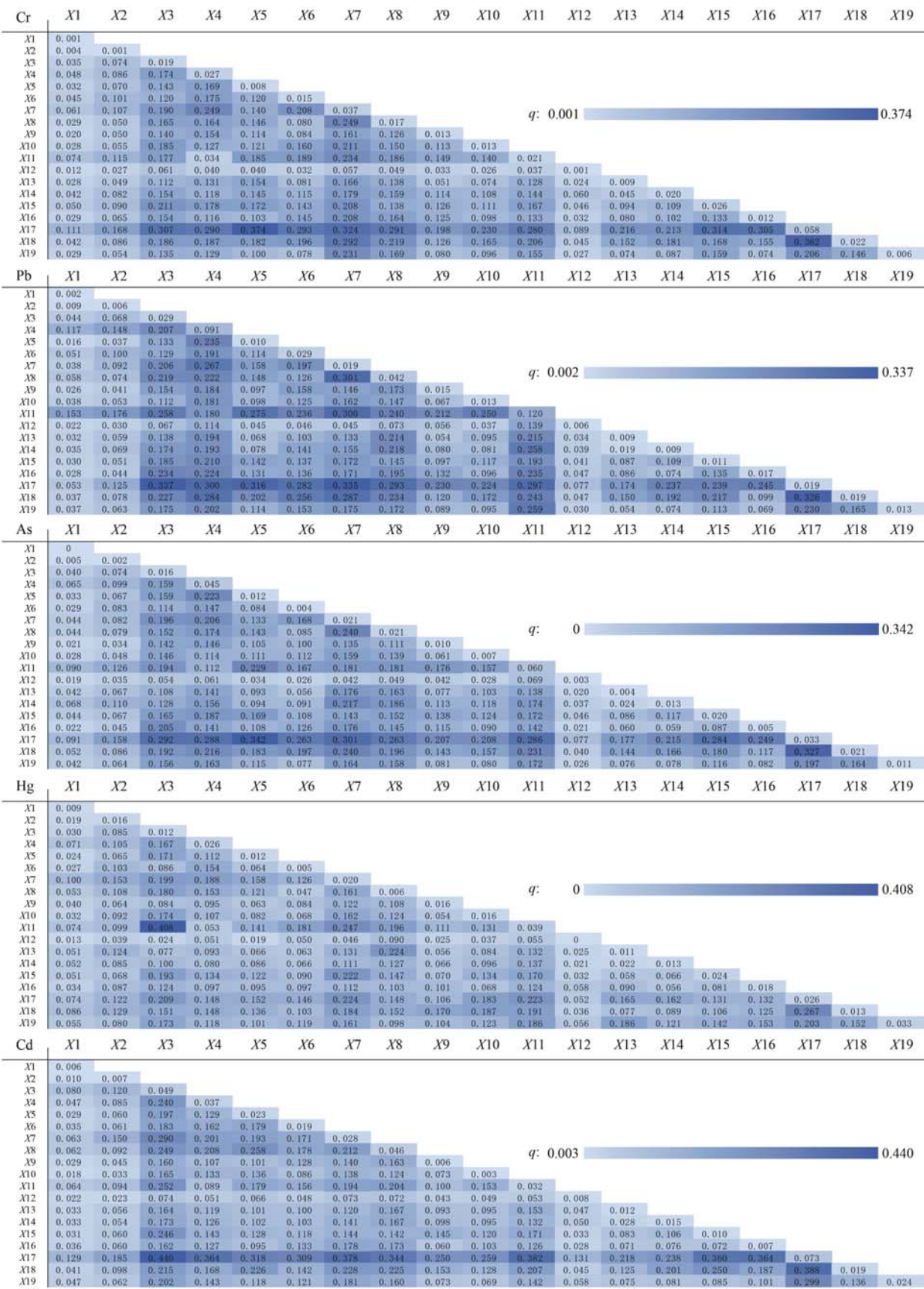


图 6 2019 年交互因子探测器输出结果

Fig. 6 Output results of interaction-detector in 2019

境因子进一步分析. 2019 年 Hg 和 Cd 含量较 2009 年有所降低, 可以说明尽管污染企业数量在 2019 年有所增加, 但其含量特征受我国环境治理和污染排

放管控工作的加强使得污染企业重金属排放含量降低, 2019 年土壤 Hg 与 Cd 来源主要还是受基础土壤环境的累积作用较明显, 但相较 2009 年, 其受人类

活动作用的影响增强. 李子杰等^[45]的研究发现 Cd 为某流域农田土壤中污染和生态风险等级最高的元素,就襄州区而言,2019 年 Cd 含量空间变异格局较 2009 年复杂,且大部分地区表现为含量增加,本研究就 GDM-因子探测器和交互因子探测器结果可知,Cd 来源受较多环境因子共同影响,因此在后续农业生产和农田污染管控等相关工作中需对其来源解析进一步深入研究.

3 结论

(1)2019 年襄州区 Cr、Pb、Hg 和 As 这 4 种土壤重金属含量平均值较 2009 年均有所降低,Cd 整体含量存在增加趋势. 插值结果得出 2019 年襄州区土壤重金属含量空间分异情况较 2009 年趋于复杂,具体变化情况为 Pb、Hg 和 Cd 在南部,Hg 在中部市区和周边地区也表现为含量增加;各元素向北和西北部地区表现为含量降低.

(2)2009 年高程因子对土壤 As 和 Pb 含量 q 解释力最高,平均降水量对 Cr 含量 q 解释力最高,耕地类型对 Hg 含量 q 解释力最高,各因子对 Cd 解释力均不强;2019 年居民点距离对 Cr 含量 q 解释力最高,NDVI 对土壤 Pb、As 和 Hg 含量 q 解释力最高,居民点距离对 Cd 含量 q 解释力最高,且相较于 2009 年,2019 年居民点距离对土壤重金属的主导影响因子的 q 解释力显著性较低.

(3)2019 年 Cr、Pb、As 和 Cd 受人类活动强度与其他环境因子的交互作用力较 2009 年有所增强,表明人类活动因子尤其是居民点用地距离与环境因子对土壤重金属元素的叠加影响力增强,2019 年土壤有机质与 NDVI 交互作用力最强,相比于 2009 年耕地类型因子影响力下降,而居民点距离与道路用地、污染企业距离的交互作用力增强;对 Hg 含量而言,2019 主要受基础土壤环境的累积作用较明显,但相较 2009 年,其受人类活动作用的影响增强.

参考文献:

- [1] 聂英. 中国粮食安全的耕地贡献分析[J]. 经济学家, 2015, (1): 83-93.
- [2] Chen R S, De Sherbinin A, Ye C, *et al.* China's soil pollution: farms on the frontline[J]. *Science*, 2014, **344**(6185), doi: 10.1126/science.344.6185.691-a.
- [3] 齐杏杏, 高秉博, 潘瑜春, 等. 基于地理探测器的土壤重金属污染影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(11): 2476-2486.
Qi X X, Gao B B, Pan Y C, *et al.* Influence factor analysis of heavy metal pollution in large-scale soil based on the geographical detector[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(11): 2476-2486.
- [4] Qu M K, Chen J, Huang B, *et al.* Exploring the spatially varying relationships between cadmium accumulations and the main influential factors in the rice-wheat rotation system in a large-scale area[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **736**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139565.
- [5] 陈印军, 方琳娜, 杨俊彦. 我国农田土壤污染状况及防治对策[J]. 中国农业资源与区划, 2014, **35**(4): 1-5, 19.
Chen Y J, Fang L N, Yang J Y. The cropland pollution in China: status and countermeasures [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, **35**(4): 1-5, 19.
- [6] 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.
Lyu 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.
- [7] Yang J, Huang Z C, Chen T B, *et al.* Predicting the probability distribution of Pb-increased lands in sewage-irrigated region: a case study in Beijing, China[J]. *Geoderma*, 2008, **147**(3-4): 192-196.
- [8] Qiao P W, Yang S C, Lei M, *et al.* Quantitative analysis of the factors influencing spatial distribution of soil heavy metals based on geographical detector[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **664**: 392-413.
- [9] 钱建平, 李伟, 张力, 等. 地下水中重金属污染源及研究方法综述[J]. 地球与环境, 2018, **46**(6): 613-620.
Qian J P, Li W, Zhang L, *et al.* Source and research status of heavy metal pollution in groundwater: a review [J]. *Earth and Environment*, 2018, **46**(6): 613-620.
- [10] 刘旭, 王训, 王定勇. 亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素: 以云南哀牢山为例[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3507-3517.
Liu X, Wang X, Wang D Y. Spatial distribution trends and influencing factors of typical heavy metals in subtropical alpine forest soils: a case study from Ailao Mountain in Yunnan Province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3507-3517.
- [11] Liu Y, Ma Z W, Lv J S, *et al.* Identifying sources and hazardous risks of heavy metals in topsoils of rapidly urbanizing East China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, **26**(6): 735-749.
- [12] 邱孟龙, 李芳柏, 王琦, 等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(2): 298-305.
Qiu M L, Li F B, Wang Q, *et al.* Spatio-temporal variation and source changes of heavy metals in cultivated soils in industrial developed urban areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(2): 298-305.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Chen H Y, Teng Y G, Li J, *et al.* Source apportionment of trace metals in river sediments: a comparison of three methods[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **211**: 28-37.
- [16] 刘斌, 郭星, 朱宇恩. 基于随机森林模型的土壤重金属源解析——以晋中盆地为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**

- (1): 106-111.
- Liu B, Guo X, Zhu Y E. Analysis of soil heavy metal sources in Jinzhong Basin based on random forest model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, **33**(1): 106-111.
- [17] 张新胜. 基于 Moran's I 和 GWR 模型的土壤重金属空间分布及其影响因素分析[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- Zhang X S. Spatial distribution and influencing factors of soil heavy metals based on Moran's I and geographically weighted regression[D]. Kaifeng: Henan University, 2018.
- [18] 费徐峰, 任周桥, 楼昭涵, 等. 基于贝叶斯最大熵和辅助信息的土壤重金属含量空间预测[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2019, **45**(4): 452-459.
- Fei X F, Ren Z Q, Lou Z H, *et al.* Prediction of soil heavy metal content under spatial scale based on Bayesian maximum entropy and auxiliary information [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2019, **45**(4): 452-459.
- [19] 王春帅, 姚立伟, 刘弋琤, 等. GWR 模型下农用地土壤镍空间分布预测[J]. *遥感信息*, 2021, **36**(1): 43-49.
- Wang C S, Yao L W, Liu Y H, *et al.* Prediction of soil nickel spatial distribution in agricultural soil under GWR model[J]. *Remote Sensing Information*, 2021, **36**(1): 43-49.
- [20] Wang H Z, Yilihamu Q, Yuan M N, *et al.* Prediction models of soil heavy metal (loid) s concentration for agricultural land in Dongli: a comparison of regression and random forest [J]. *Ecological Indicators*, 2020, **119**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106801.
- [21] Zhou W, Yang H, Xie L J, *et al.* Hyperspectral inversion of soil heavy metals in Three-River Source Region based on random forest model [J]. *CATENA*, 2021, **202**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105222.
- [22] Fritsch C, Graudoux P, Cœurdassier M, *et al.* Spatial distribution of metals in smelter-impacted soils of woody habitats: influence of landscape and soil properties, and risk for wildlife [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(2): 141-155.
- [23] 刘静, 黄标, 孙维伙, 等. 经济发达区不同土壤利用方式下重金属的时空分布及预测[J]. *土壤*, 2011, **43**(2): 210-215.
- Liu J, Huang B, Sun W X, *et al.* Spatial-temporal distribution and prediction of heavy metals under different soil use patterns in an economically developed area[J]. *Soils*, 2011, **43**(2): 210-215.
- [24] Ding Q, Cheng G, Wang Y, *et al.* Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 577-585.
- [25] Li X W, Xie Y F, Wang J F, *et al.* Influence of planting patterns on fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **458-460**: 63-69.
- [26] 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 等. 工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- Li Y L, Lu Y F, Chen W P, *et al.* Spatial-temporal variation and source change of heavy metals in the cropland soil in the industrial city[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1432-1439.
- [27] Huang B, Wang M, Yan L X, *et al.* Accumulation, transfer, and environmental risk of soil mercury in a rapidly industrializing region of the Yangtze River delta, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, **11**(4): 607-618.
- [28] Rastmanesh F, Mousavi M, Zarasvandi A, *et al.* Investigation of elemental enrichment and ecological risk assessment of surface soils in two industrial port cities, southwest Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(20), doi: 10.1007/s12665-017-7046-2.
- [29] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [30] Yang Y, Yang X, He M J, *et al.* Beyond mere pollution source identification: determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis [J]. *CATENA*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.catena.2019.104297.
- [31] 李雨, 韩平, 任东, 等. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析[J]. *中国农业科学*, 2017, **50**(21): 4138-4148.
- Li Y, Han P, Ren D, *et al.* Influence factor analysis of farmland soil heavy metal based on the geographical detector[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, **50**(21): 4138-4148.
- [32] Shi T Z, Hu Z W, Shi Z, *et al.* Geo-detection of factors controlling spatial patterns of heavy metals in urban topsoil using multi-source data[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **643**: 451-459.
- [33] 王强, 张莉莉, 马友华, 等. 微地形土壤养分空间变异特征及养分管理研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2016, **43**(6): 932-938.
- Wang Q, Zhang L L, Ma Y H, *et al.* Spatial variability of soil nutrients and nutrient management in micro-topography [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2016, **43**(6): 932-938.
- [34] 陈海生, 金玮佳. 基于经验贝叶斯克里金的微尺度植烟田土壤有机质空间变异性[J]. *西南农业学报*, 2020, **33**(2): 363-368.
- Chen H S, Jin W J. Study on spatial variability of soil organic matter in tobacco planting fields on micro sampling scale based on EBK [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **33**(2): 363-368.
- [35] 王彬. 涪江流域土壤重金属空间变异及分布预测[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
- Wang B. Spatial variation and distribution prediction of soil heavy metals in Fujiang River[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [36] 孔晨晨, 刘慧琳, 聂超甲, 等. 北京平原区土壤 Cr 空间分布及影响因素研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, **35**(3): 229-236.
- Kong C C, Liu H L, Nie C J, *et al.* Spatial distribution and influencing factors of Cr in soils of Beijing plain, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(3): 229-236.
- [37] Kong X B, Zhang F R, Wei Q, *et al.* Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of North China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, **88**(1-2): 85-94.
- [38] 高飞, 李昌伟, 于跃跃, 等. 改进电位法测定土壤 pH 方法的探讨[J]. *中国农技推广*, 2014, **30**(7): 41-43.
- [39] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3532-3539.
- Wang M E, Peng C, Chen W P. Impacts of industrial zone in arid area in Ningxia Province on the accumulation of heavy metals in agricultural soils[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9):

- 3532-3539.
- [40] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- [41] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, *et al.* Study on the background contents on 61 elements of soils in China[J]. Environmental Science, 1991, **12**(4): 12-19.
- [42] 汪花, 刘秀明, 刘方, 等. 喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2895-2903.
Wang H, Liu X M, Liu F, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of as at a small scale in agricultural soils of the karst region[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2895-2903.
- [43] 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 等. 三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2456-2463.
Chen Q Y, Sun S, Yin D L, *et al.* Effects of agricultural activities on soil mercury changes in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges reservoir[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2456-2463.
- [44] 王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2021, **58**(1): 82-91.
Wang X K, Zhang Y X, Huang B, *et al.* Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River delta, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(1): 82-91.
- [45] 李子杰, 孟源思, 郑梦蕾, 等. 某流域农田土壤-水稻系统重金属空间变异特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(5): 957-968.
Li Z J, Meng Y S, Zheng M L, *et al.* Spatial variability and ecological health risk assessment of heavy metals in farmland soil-rice system in a watershed of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, **40**(5): 957-968.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)