

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)
全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析	任晓松, 李昭睿 (1243)
京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式	田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)
太原市“十四五”规划大气污染防治政策的 CO ₂ 协同效益评估	肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)
湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同	李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)
“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径	张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)
郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益	邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)
长江中游城市群城市化对 PM _{2.5} 浓度的多尺度驱动机制	张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)
天山北坡城市群 PM _{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析	王相男, 张喆, 刘方青 (1315)
天津市 PM _{2.5} 碳组分空间差异性来源解析	武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)
贵阳市花溪城区大气 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的变化特征及来源解析	桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)
新乡市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析	刘恒嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)
2017~2018 年冬季菏泽大气 PM _{2.5} 中金属元素特征及健康风险评估	杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)
北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析	潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)
南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析	罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)
苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化	吴也正, 张鑫, 顾钧, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)
长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源	卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张森霖, 黄张根 (1402)
基于 PCA-APCS-MLR 模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析	崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)
重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价	张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)
长江流域微塑料污染特征及生态风险评估	李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)
宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算	丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)
汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估	赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)
宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价	高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)
浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价	钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)
鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析	马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)
杭州湾南岸 20 a 水质净化功能变化及预测	王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)
不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例	代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)
长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素	刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)
富营养化湖泊藻华降解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应	张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛杰 (1539)
紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平	林涛, 苑宇杰 (1553)
再生水消毒副产物的检测、生成与控制	廖雨枫, 王正, 潘旸, 李爱民 (1561)
3 种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性	何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)
基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析	傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)
基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析	赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)
定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPP _{GS} 变化的影响	徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志成, 郭振东 (1615)
基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响	李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)
连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响	鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)
4 种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响	丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)
不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系	邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)
黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征	王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)
覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响	宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)
秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响	胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)
耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响	陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)
基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测	王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)
广西贺州市典型矿区周边耕层土壤 Cd 通量特征	杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娥, 蔡贺清 (1739)
基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估	杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)
湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价	肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)
典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估	沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)
省级尺度土壤 As 迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例	董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)
谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应	易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)
EDDS 对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响	刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)
叶面调理剂对复合污染农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 累积的阻控效应	肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)
民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征	李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制	李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)
养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险	白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)
玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征	高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)
不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应	闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

基于信息扩散模型的沣东新城区土壤重金属潜在生态风险评估

杨楠楠¹, 韩玲^{1,2*}, 刘明¹

(1. 长安大学土地工程学院, 西安 710064; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710075)

摘要: 我国目前大规模的新区建设导致严峻的区域土壤重金属污染形势。以沣东新城为研究靶区, 进行重金属含量特征描述性统计及克里金插值分析, 进一步结合潜在生态风险指数与信息扩散理论, 构建基于风险评估的信息扩散模型, 探讨了Pb、Cu、Cd和Hg的污染程度、污染风险及风险发生概率。结果表明, 研究区内4种土壤重金属的含量均值远超土壤重金属背景值, 分别是背景值的1.943(Pb)、1.419(Cu)、3.074(Cd)和3.567(Hg)倍, 且重金属分布受人为干扰较大呈强变异性($CV>65\%$)。其中, Pb和Cu污染分布主要受到工业生产与建设用地开发的影响, 工业活动、农业活动及交通运输是主要的Cd污染源, 而工业建设是造成Hg污染的主要因素。重金属潜在生态风险指数平均值分别为9.716(Pb)、7.095(Cu)、92.292(Cd)和142.469(Hg), 区域综合潜在生态风险指数(RI)均值为251.573, 表明区域整体处于较高的潜在生态风险状态。区域Pb和Cu整体处于轻度潜在生态风险, 而Cd和Hg以中风险与较高风险为主, 表明Cd和Hg是区域重金属污染的主导因素。信息扩散潜在生态风险模型评估结果显示, 区域综合潜在生态风险各等级的概率排序为: 较高(38.98%)>中度(38.55%)>高(5.89%)>轻微(5.15%)>极高(3.56%), Cd、Hg元素各潜在生态风险等级的超越概率远大于Pb和Cu, Hg元素各污染等级的超越概率分别为轻微(94.89%)、中度(66.85%)、较高(23.62%)、高(3.9%)和极高(2%), 其中仅轻微等级的超越概率小于Cd。潜在生态风险等级的污染概率预测误差均小于5%, 体现了基于风险评估的信息扩散模型的可靠性。研究结果可为样本受限地区的土壤重金属潜在生态风险监测与管控提供技术借鉴与支持。

关键词: 土壤重金属; 污染评价; 潜在生态风险; 信息扩散; 概率预测

中图分类号: X53; X825 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1749-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304033

Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model

YANG Nan-nan¹, HAN Ling^{1,2*}, LIU Ming¹

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Rehabilitation, Xi'an 710075, China)

Abstract: The large-scale construction of new districts has led to severe soil heavy metal pollution. Therefore, taking Fengdong New District as the target research area, the descriptive statistics of heavy metal content characteristics and Kriging interpolation analysis have been conducted, and the potential ecological risk index and information diffusion theory were further combined to create an information diffusion model based on risk assessment. Finally, the pollution degree, ecological risk, and risk occurrence probability of Pb, Cu, Cd, and Hg were discussed. The findings revealed that the average concentrations of the four heavy metals far exceeded the background value of soil heavy metals by a factor of 1.943 (Pb), 1.419 (Cu), 3.074 (Cd), and 3.567 (Hg), respectively. Moreover, the distribution of soil heavy metals showed strong variability ($CV>65\%$) owing to human interference. The distribution of Pb and Cu pollution were predominantly influenced by industrial production and land development for construction purposes, whereas industrial activities, agricultural practices, and transportation served as the primary sources of Cd contamination. On the other hand, industrial construction emerged as the major factor contributing to Hg pollution. The average values of individual potential ecological risk index for heavy metals of 9.716 (Pb), 7.095 (Cu), 92.292 (Cd), and 142.469 (Hg), coupled with the regional comprehensive potential ecological risk index (RI) average of 251.573, signified that the region was overall characterized by a relatively high potential ecological risk status. The overall potential ecological risk for Pb and Cu in the region were mild, whereas Cd and Hg posed moderate to high risks, indicating that Cd and Hg were the dominant driving factors behind regional heavy metal pollution. The evaluation results of the information diffusion model based on the potential ecological risk indicated that the probability ranking of different levels of comprehensive potential ecological risk was as follows: slightly high (38.98%) > moderate (38.55%) > high (5.89%) > slight (5.15%) > extremely high (3.56%). The exceeding probabilities of potential ecological risk levels for Cd and Hg were significantly higher than those for Pb and Cu. The exceeding probability of different pollution levels of Hg were slight (94.89%), moderate (66.85%), slightly high (23.62%), high (3.9%), and extremely high (2%), of which only the surpassing probability of the slight level was lower than that of Cd. The prediction error of pollution probability of each potential ecological risk level was less than 5%, demonstrating the reliability of the information diffusion model based on the risk assessment. This research will provide technical reference and support for the monitoring and management of potential ecological risks from soil heavy metals in limited sample data regions.

Key words: soil heavy metals; pollution evaluation; potential ecological risk; information diffusion; probability prediction

近年来, 世界各国高度重视基于风险的土壤环境管理模式, 积极开展土壤污染生态风险评估工作,

收稿日期: 2023-04-04; 修订日期: 2023-05-24

基金项目: 陕西省重点研发项目(2022ZDLSF07-05); 中央高校基本科研业务费专项(300102352901)

作者简介: 杨楠楠(1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染风险评价与监测, E-mail: 2021035005@chd.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hanling@chd.edu.cn

为保障人类健康安全和维护生态系统稳定性发挥了重要作用^[1]。然而城市化的不断扩张和工业化的快速推进,工业“三废”、交通尾气和生活废弃物等导致大量重金属元素直接或间接进入土壤,引发城市土壤环境负面效应,已严重危及生态安全^[2~4]。因此,越来越多的学者针对城镇区域展开土壤重金污染特征及其风险评价的研究工作^[5~7],但现有研究很少有学者针对污染概率进行探讨。

合理选择空间插值方式对掌握土壤重金属污染空间分布特征与变异规律具有重要作用,但目前尚未发现完全适用的空间插值法。比较土壤重金属空间分析的相关文献发现,基于地统计学的克里金插值方法能量化采样点之间的空间自相关性,且具有无偏性^[8],因而在土壤环境风险空间分析方面应用最为广泛^[9~12]。指数评价法、风险评估法和毒理学评价法是重金属污染评价的主要方式^[13],其中指数评价法运用最为广泛^[14~16]。此外主成分分析法、灰色聚类法、层次分析法和健康风险评价等评价模型也经常用于区域土壤重金属污染评价^[17~19]。由于土壤具有不均匀性和空间异质性等特点,采用传统的重金属污染评价方法,取样点评价结果不能代表区域土壤重金属污染状况,更不能预测污染发生的概率分布。鉴于土壤重金属污染机制的模糊复杂性,将传统指数法和模型法结合使用,能够实现土壤重金属污染的综合评估,对于土壤重金属污染监测具有重要意义^[20~22]。基于模糊数学的信息扩散理论通过对样本进行集值化模糊处理,可提高样本总体分布精度,以弥补观测样本信息的不足,因而可用于探讨土壤重金属污染风险程度及风险概率分布规律^[23]。已有学者采用信息扩散方法进行农业灾害、森林病虫害、气象灾害和洪水风险的监测评估^[24~26],目前基于信息扩散思想的土壤重金属风险概率评估,逐渐成为重金属污染评价的热点研究方向,如赵华荣等^[23, 27]对广东大宝山矿区和广西内苗溪沉积物,以及曾庆兰等^[28]对刺梨基地沿路土壤重金属的污染评价,但这些研究并未进行概率评估误差分析,且现有研究鲜见涉及城市土壤重金属污染评估。

综合上述分析,本文以沣东新城区为研究对象,进行重金属含量特征分析,基于潜在生态风险指数评估土壤重金属污染生态风险,进一步基于信息扩散理论和潜在生态风险指数,综合土壤重金属含量分布,构建沣东新城区土壤重金属污染风险评估的信息扩散模型,探索重金属污染生态风险发生的概率分布,以期为沣东新城区土壤重金属环境风险监测与管控提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沣东新城是陕西省西咸新区的下辖开发区与核心区,北邻渭河,西接沣河;南与西安高新区毗邻、北与西安经济开发区相接,独特的地理位置使其成为“现代化大西安新中心”的核心区。新城总人口 45 万,规划面积 159.36 km²,旨在打造合理的“三生”空间格局,建设国际化主城功能新区和生态田园新城。该区域地势平坦,平均海拔 388 m,地貌单元由南向北依次为冲积平原、河流阶地和黄土台塬^[29]。沣河横贯全城,另有新河、沙河在此区域内纵横交汇。年平均降水量约 600~700 mm,年平均气温 13.4℃,植被类型以落叶阔叶林为主^[30],土壤类型主要为湿陷性黄土和壤土,适合多种作物生长,因此该区域具有悠久的农业种植历史^[31]。结合沣东新城区土地利用类型可知(图 1),该地区土地利用模式复杂,以耕地、建筑和裸地/稀疏植被为主要类型,且该区域作为连接城乡的过渡区,人口密集,工业和交通运输业发达,但整体环境保护水平不高。随着西咸一体化进程的快速推进,研究区部分农村地区已被拆除,部分耕地被废弃,加之城市边际位置工业的发展,造成区域土壤环境污染和破坏,重金属严重超标,具有发展中城市边缘地区的典型特征。

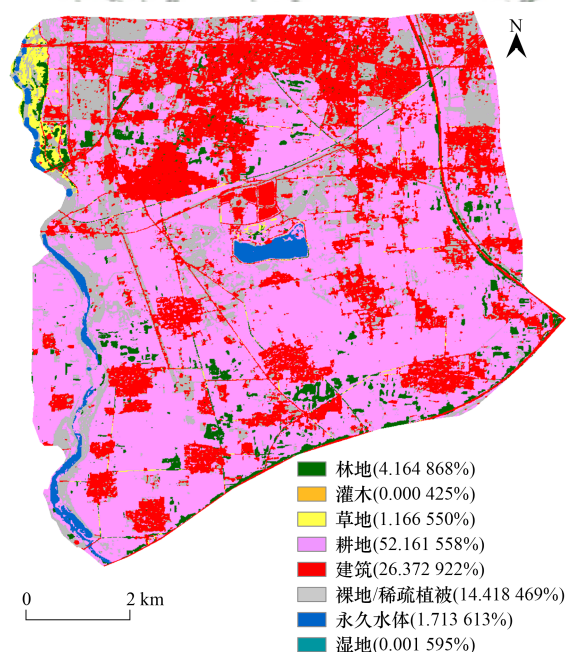


图 1 沣东新城区土地利用类型

Fig. 1 Types of land use in Fengdong New District

1.2 样本采集与处理

在查阅当地土壤相关资料和前期踏勘的基础上,为避免人为主观意识对采样结果的影响,本研究

采用 $800\text{ m} \times 800\text{ m}$ 等距规则格网法进行系统布点, 于 2020 年 6 月采用五点取样法, 共收集了 500 份土壤样本(图 2)。每个采样点在 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的双对角线顶点及中心采集 5 个深度约为 20 cm 的表层土壤样品, 混合后粗筛去除草根石砾等杂质, 取均匀混合的土壤约 1 kg , 装入编号的样本布袋运回实验室。采样的同时进行中心点 GPS 定位, 并记录周围环境。实地调查证明, 该区域内人口分布密集, 且具有工业和农业密集性。土壤样品经自然风干研磨后, 过 0.15 mm 的尼龙筛, 保存在编号的保鲜袋, 送至西安市有色金属西北矿产地质测试中心进行重金属 Pb、Cu、Cd 和 Hg 元素含量的测定。该机构依据硅酸盐岩石化学分析方法(GB/T 14506.30-2010), 采用电感耦合等离子体质谱仪 7700X 测定 Pb、Cu 和 Cd 元素含量, Hg 含量则根据区域地球化学样品分析方法(DZ/T 0279.17-2016)

在原子荧光光谱仪 AFS2202E 上进行检测。样品测定均由空白样和加标回收样控制质量, 4 种元素的检出限均小于 $0.05\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GSS-28 质量控制标准下的加标回收率为 $75\% \sim 120\%$ 。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 重金属含量特征分析

首先于 SPSS 26.0 中进行区域土壤重金属含量描述性特征统计, 采用 3σ 准则识别异常数据, 基于下载的谷歌 level_19 0.25 m 基础影像数据、土地利用类型图及采样记录信息表, 对异常数据进行复核。进一步, 为揭示重金属之间的依存与互斥关系, 基于 R 语言进行重金属及 DEM 数据的皮尔逊相关分析, 探索土壤重金属相似同源性规律^[32]。基于 ArcGIS 进行重金属含量空间插值分析, 并结合土地利用分类图探讨重金属污染分布特征。

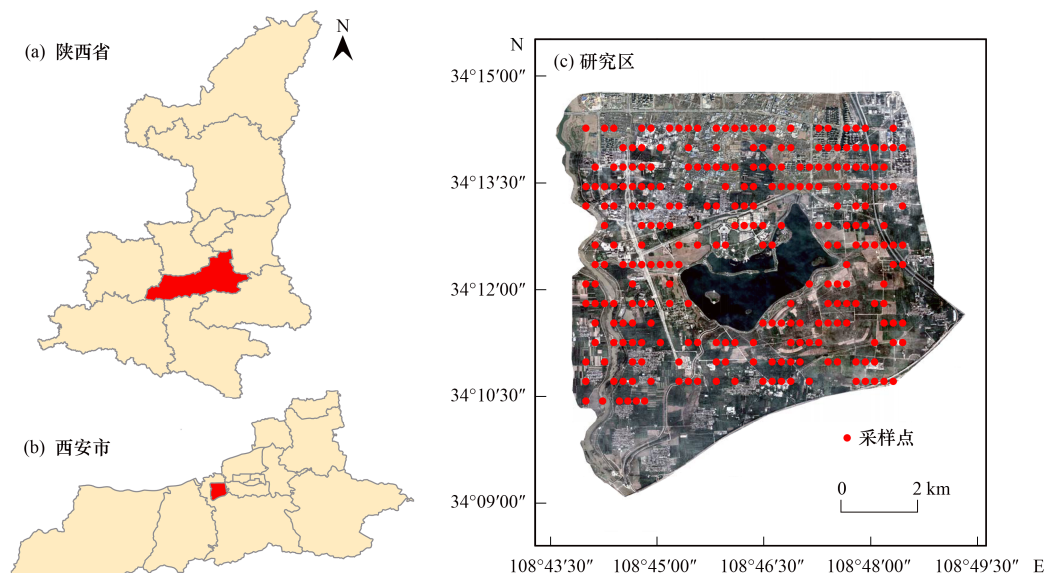


图 2 研究区采样点分布示意

Fig. 2 Distribution of sampling sites in study areas

1.3.2 潜在生态风险评价

依据 Hakanson^[33] 沉积学原理, 综合考虑重金属属性及毒性, 结合土壤背景值评估重金属土壤环境综合效应。计算重金属单项潜在生态风险指数(E_r^i) [公式(2)]和重金属综合生态危害指数(RI) [公式(3)], 并参照潜在生态风险指标评价标准(表 1), 进行重金属污染综合评估。各重金属毒性响应系数为: Pb = 5、Cu = 5、Cd = 30 和 Hg = 40, 因此根据 Hakanson 对 E_r^i 的定义, 这里 E_r^i 的第一级界限值仍为 40。值得指出的是, 由于本研究的参评污染物为 Pb、Cu、Cd 和 Hg 这 4 类, 与 Hakanson 提出的 RI 分级标准参评物有出入, 因此本研究参照马建华等^[34,35] 提出的规范性的 RI 分级调整方案进行了标准调整。具体调整思路是: 首先根据 Hakanson 单位毒性系数 RI(150/

$133 = 1.13$), 计算本研究所有参评污染物毒性响应系数总值 $[(5+5+30+40) \times 1.13 = 90.4]$, 其次取十位整数 90 作为 RI 基础界限值, 最后取基础界限值的 2^n 倍 ($n = 0, 1, 2, 3$) 作为 RI 分级界限值^[34~36], 确定潜在生态风险指标评价标准。

$$C_t^i = \frac{C_i}{Q_i} \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_t^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^k E_r^i = \sum_{i=1}^k T_r^i \times \frac{C_i}{Q_i} \quad (3)$$

式中, C_i 为重金属元素实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 重金属元素参比值 Q_i 取陕西省土壤重金属背景值; C_t^i 为某项重金属元素污染指数; E_r^i 为单项重金属潜在生态风险指数; k 为研究的重金属元素项数。

表1 潜在生态风险评价分级标准

Table 1 Classification criteria for potential ecological risk assessment

风险评价指标		风险等级
$E_r^i < 40$	$RI < 90$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	$90 \leq RI < 180$	中度
$80 \leq E_r^i < 160$	$180 \leq RI < 360$	较高
$160 \leq E_r^i < 320$	$360 \leq RI < 720$	高
$E_r^i \geq 320$	$RI \geq 720$	极高

1.3.3 风险信息扩散评估模型

受限于采样数量和土壤的非匀质性,大多数情况下不能对区域的环境状况进行“以偏概全”的解释.信息扩散通过对样本进行集值化模糊处理,以弥补整体信息资料不足的局限,提高总体分布精度,因而可用于评估小样本地区土壤重金属污染发生概率,探讨土壤重金属污染风险评估的不确定性及其分布规律^[23].

通常将样本集合 $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$ 中的观测样本 $X_i = \{x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ri}, \dots, x_{mi}\}$ 按正态分布公式(4)扩散到指标论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 中:

$$f_i(u_j) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_{ir} - u_j)^2}{2h^2}\right] \quad (4)$$

式中, $f_i(u_j)$ 为正态分布信息扩散函数; x_{ir} 为样本点 i 上重金属类别为 r 的观测信息; h 为信息扩散系数,又称经验窗宽.因观测样本总数 m 不同, h 取值不同[公式(5)]:

$$h = \begin{cases} 0.8146(b-a), & m=5, \\ 0.5690(b-a), & m=6, \\ 0.4560(b-a), & m=7, \\ 0.3860(b-a), & m=8, \\ 0.3362(b-a), & m=9, \\ 0.2986(b-a), & m=10, \\ 2.6851\frac{(b-a)}{n-1}, & m \geq 11. \end{cases} \quad (5)$$

式中, $a = \min(x_{ir})$, $b = \max(x_{ir})$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$; n 为离散总数.观测样本 x_{ir} 的正态扩散信息和如公式(6)所示:

$$C_i = \sum_{j=1}^n f_i(u_j), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

式中, C_i 为观测样本 X_i 的正态扩散信息和.则样本 X_i 的归一化信息分布函数 $S_{X_i}(u_j)$ 如公式(7)所示:

$$S_{X_i}(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{C_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

假设:

$$\begin{cases} q(u_j) = \sum_{i=1}^m S_{X_i}(u_j), & j = 1, 2, \dots, n \\ Q = \sum_{j=1}^n q(u_j) \end{cases} \quad (8)$$

则:

$$p(u_j) = \frac{q(u_j)}{Q} \quad (9)$$

$$p(u \geq u_j) = \sum_{v=j}^n p(u_v), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

式中, $q(u_j)$ 为观测值为 u_j 的样本点数; Q 为各 u_j 点上样本点数的总和; $p(u_j)$ 为样本点落在 u_j 处的频率值,为概率的估计值; $p(u \geq u_j)$ 为超越 u_j 的概率值,即超越概率.

潜在生态风险综合考虑了土壤重金属背景值、重金属污染参评种类、重金属毒理性和水体对重金属污染的敏感性等因素,评价结果具有客观科学性,且该方法得到广泛应用^[37-39].潜在生态风险指数最小值为0,而具有开放的上限值,因此可以根据实际计算值却不局限于分级标准限定值,进行不同程度潜在生态风险探讨.本研究中选取区域采样点的潜在生态危险指数作为观测值样本的集合,结合实算值及其分级标准确定论域(U),基于 Matlab 语言实现信息扩散风险评估模型程序,计算并探讨不同程度潜在生态风险的概率及超越概率.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量分布特征

2.1.1 重金属含量描述性统计

结合高分辨率遥感影像、土地利用(图1)与采样调查记录进行异常值复核,发现 Pb 和 Cu 元素异常值点分别分布于北部的彩钢制品厂以及南部的晶硅材料公司等企业附近, Cd 和 Hg 元素异常值均位于房地产建设开发区及公路沿岸,考虑彩钢制品以及新兴材料的生产原辅材料与制备过程,以及土地开发和建设和交通运输等外源污染因素与途径,认为相应区域重金属异常符合客观事实,因此予以保留.对土壤样品中 Pb、Cu、Cd 和 Hg 这4种重金属进行描述性统计分析,结果如表2所示.可以发现研究区内4种土壤重金属的含量均值是陕西省 A 层土壤重金属背景值的 1.4~3.5 倍,500 个土壤样品中4种土壤重金属的含量超过土壤背景值的比率均大于 90%,表明沣东新区已经遭受严重的 Pb、Cu、Cd 和 Hg 污染.区域内土壤 pH>7.5,根据生态环境部颁布的 GB 36600-2018(建设用地)和 GB 15618-2018(农用地)土壤污染风险管控标准^[40],进行区域农用地、建设用地土壤污染风险管控标准值的超标率计算,发现 Cu、Cd 和 Hg 最高含量未超出建设用地筛选值与管制值, Pb 和 Hg 最高含量未达到农用地管制值,4种元素的含量最高值均达到了农用地土壤污染风险筛选值,但整体仅有 6.8% 的样本重金属含量超出土壤重金属污染风

险筛选及管制值,因而需重点关注超标点位附近的土壤污染管控. 偏度为零的重金属元素数值呈正态分布,且峰度越接近3,数据越接近完全正态分布,峰度越大,说明数据相较于均值越集中^[41, 42]. 由表2中重金属的峰度和偏度可知,4种重金属的数据分布均呈现极强的右偏现象,且数据分布均较为集中,结合区域踏勘,推测是由于人为活动造成重金属富集作

用的结果. 根据各重金属含量范围可知,区域各元素含量变化较大,进一步分析表征人为干扰程度的变异系数可知,重金属元素均呈现强变异性($CV>65\%$)^[43],该现象与偏度、峰度的特征探讨结果一致,表明区域重金属含量分布受人为影响较大^[44]. K-S正态检验的结果 P_{K-S} 均为0,进一步验证样本土壤重金属数据受外界因素干扰呈非正态.

表2 实测土壤重金属含量描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of measured soil heavy metal content

项目	Pb	Cu	Cd	Hg
最小值~最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.800~830.000	12.800~475.700	0.068~4.190	0.013~3.507
均值±标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	41.585±40.806	30.367±20.905	0.289±0.330	0.107±0.238
变异系数	0.981	0.688	1.14	2.225
偏度	15.054	19.494	7.104	10.918
峰度	281.921	414.756	64.286	137.589
背景值超标率/%	95.800	95.400	98.600	91.200
农用地筛选值超标率/%	1.765	0.200	5.600	0.800
农用地管制值超标率/%	0.000	/ ¹⁾	0.200	0.000
建设用地筛选值/管制值超标率/%	0.200	0.000	0.000	0.000
陕西省A层土壤元素背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	21.4	21.4	0.094	0.030
建设用地土壤污染风险筛选值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	400	2 000	20	8
建设用地土壤污染风险管制值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	800	8 000	47	33
农用地($\text{pH}>7.5$)土壤污染风险筛选值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	170	100	0.6	1
农用地($\text{pH}>7.5$)土壤污染风险管制值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	1 000	/	4	6

1)“/”表示无该管制值

2.1.2 重金属含量空间分布

土壤重金属相关性分析显示,重金属之间的相关性普遍偏低且为正相关(0.024~0.163),其中Hg与其他元素并未达到显著相关水平,Cd与Pb和Cu分别达到了0.05和0.01显著相关水平,但相关系数较小分别为0.127和0.163,而Pb与Cu并未达到显著相关水平,表明区域内仅Cd元素与Pb、Cu的分布存在着微弱的相似同源规律. 重金属与DEM相关分析显示,Cu和Cd的分布与DEM存在一定依赖关系,但总体依赖性不大,表现为0.183(Cu)和0.120(Cd)的显著相关性. 剔除 3σ 准则识别的重金属含量异常值,进而基于高斯型变差函数模型进行沔东新城区重金属含量克里金空间插值,得到4种土壤重金属含量的空间分布(图3). 这里剔除异常值以减少异常值对插值结果的影响,同时减轻平滑效应,而高斯型变差函数适合描述数据的大尺度变异性,且在控制平滑效应方面较为灵活,可以保留数据的细节特征. 插值结果显示,4种重金属的含量空间分布具有明显差异性,且分区轮廓清晰,整体低值区占比较大. Cu元素高值区分布相对最为集中,主要分布于研究区南部的普贤寺村与普贤水站,结合土地利用(图1)与采样点分布(图2),发现该区域为电子化工产业建设区,主要涉及水泥制管、新品硅生产等项目,所用到的原

材料包含铜铝导电体、铜铝管道材料和钢材等,因而推测工业区开发建设、电子化工生产、化工废弃物的填埋处理等是引入或产生外源污染物的主要途径,从而导致土壤中重金属Cu富集;Cd元素含量分布最为分散,高值区呈斑块状分布于高速公路G5与G3002汇交处的里宅村与袁骑寨的农田区域,且在研究区南部的建设用地,存在与Cu相似的高值分布区域. 结合图2发现,Pb含量高值区位于研究区西北部,镐京大道在此穿越,且该处位于彩钢厂附近,因而推测受交通运输与工业生产等外源污染途径影响;Hg含量高值区则主要分布于研究区的西部与南部,结合采样记录,这两处分别位于沔河东岸的鱼斗路附近,以及石匣口村与普贤水站衔接处,附近是商业聚集地,尚有土地正在开发建设,可推测Hg含量分布主要受工业建设影响. 结合变异系数可知该区域中Cd、Hg和Pb受人类干扰较大,其含量分布较为分散.

2.2 土壤重金属污染评价

2.2.1 潜在生态风险评价

根据公式(3)分别进行采样点位单项重金属数生态风险指数 $E_i^i(E_i^i\text{-Pb}、E_i^i\text{-Cu}、E_i^i\text{-Cd}和E_i^i\text{-Hg})$ 与重金属综合潜在生态风险指数RI计算,并根据表1进行污染等级划分与统计,结果表明 $E_i^i\text{-Pb}、E_i^i\text{-Cu}、$

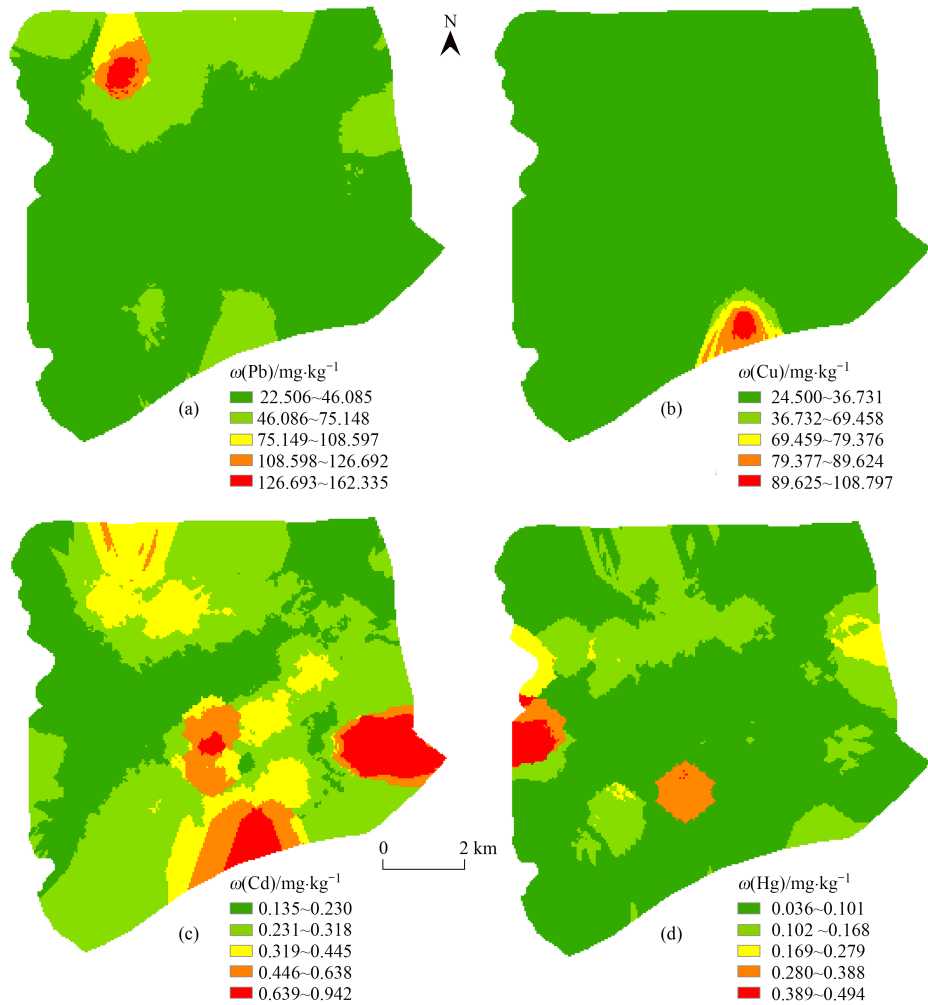


图3 沔东新城区土壤重金属含量分布 Kriging 插值结果

Fig. 3 Kriging interpolation results of soil heavy metal content distribution in Fengdong New District

E^i_{Cd} 和 E^i_{Hg} 的平均值分别为 9.716、7.095、92.292 和 142.469, 综合潜在生态风险指数 RI 均值为 251.573. 重金属潜在生态风险指数统计结果图 4(a) 所示, 各采样点 E^i_{Pb} 和 E^i_{Cu} 整体上小于 E^i_{Cd} 和 E^i_{Hg} , 表明区域土壤中重金属 Cd 和 Hg 污染较 Pb 和 Cu 严重, 存在较大潜在生态风险. 且 70.8% 样点的 E^i_{Pb} 大于 E^i_{Cu} , 67.4% 样点的 E^i_{Hg} 大于 E^i_{Cd} , 表明区域整体重金属污染程度为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu}$. 由图 4(b) 可知, 整体上沔东新城区 Pb 和 Cu 的潜在生态风险以轻度为主, 且轻度污染占比均达到 99% 以上, Cd 和 Hg 则以中风险与较高风险为主, 且 Cd 和 Hg 均存在极高潜在生态风险. 研究区 Pb 存在 1 处高潜在生态风险和 2 处中度潜在生态风险, 结合遥感影像与采样记录, 这 3 处均位于研究区最北部的工业区及居民厂棚附近. 区域内仅有一处样本点的 Cu 污染达到较高风险, 经查勘发现该点位于居民区垃圾堆放废弃地. Cd 极高潜在生态风险区主要分布于研究区东南部的废弃农村拆除地, 而 Hg 极高潜在生态风险区则分布在研究区西北部, 大多位于产业园区及居民点.

区域各采样点重金属综合潜在生态风险指数计算结果表明, 仅有 6% 的样本为轻微生态风险, 区域整体处于中度与较高潜在生态风险状态, 其风险等级占比分别为 40.6% 和 43.8%, 另外分别有 6.2% 和 3.6% 的样本点处于高和极高的潜在生态风险状态, 处于高度及以上风险强度的样本点主要分布在南部的工业密集地带、城区建筑开发区及农村废弃地. 通过分析重金属元素高值潜在生态风险区, 发现重金属富集与人类生产生活活动息息相关, 因此, 非常有必要针对区域重金属土壤环境进行生态风险监测与管控.

2.2.2 基于信息扩散模型的潜在生态风险评估

尽管 K-S 正态检验的结果指示沔东新城区土壤重金属样本数据呈非正态分布, 但是有研究表明, 虽然人类活动会改变土壤重金属分布状态, 但在母质类型与外界干扰相同的情况下, 重金属在土壤中的分布形态相同或相近^[45], 因而其扩散状态呈近似随机正态分布. 根据经典统计学中的中心极限定理, 认为当样本量足够多的情况下, 整体样本数据遵从正态分布^[46, 47], 因此在本研究中, 综合考虑样本数量及

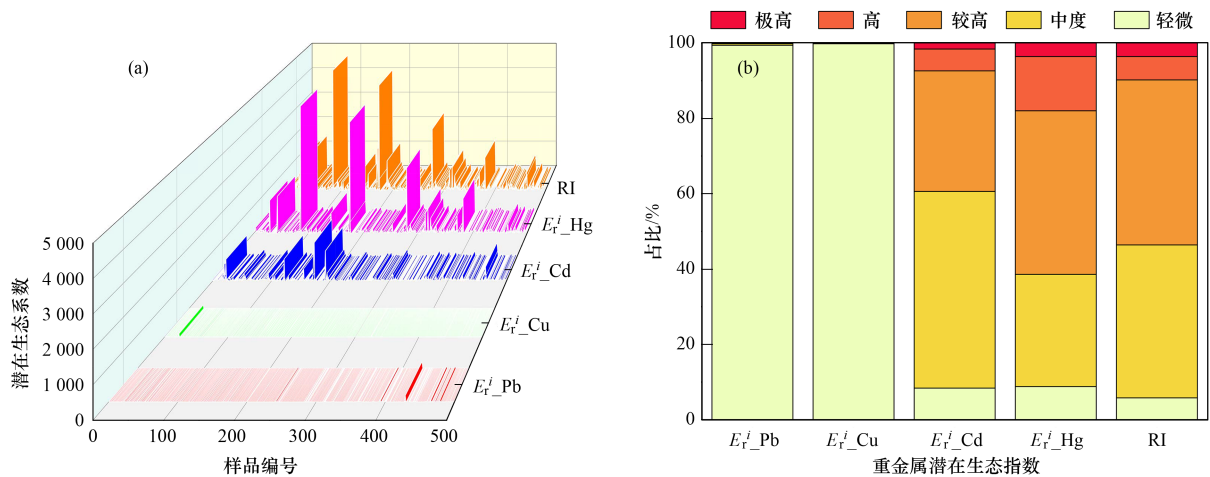


图4 沱东新城区土壤重金属潜在生态风险分析

Fig. 4 Analysis of potential ecological risk of soil heavy metals in Fengdong New District

采样范围,可以认为土壤重金属分布呈近似正态分布,可以基于正态扩散函数进行信息扩散.综上所述,基于上述潜在生态风险指数和信息扩散理论,构建沱东新城区土壤重金属污染的扩散信息模型.首先由公式(5)计算信息扩散系数(h),并根据重金属潜在生态指数数据特征与范围,考虑最值等客观因素,按一定的间隔确定论域(U)(表4),进而计算并绘制重金属污染概率(p)和污染发生的超越概率(P)(图5).从中可看出Pb、Cu、Cd和Hg分别在 $E_r^i_{Pb}=7$ 、 $E_r^i_{Cu}=7$ 、 $E_r^i_{Cd}=60$ 、 $E_r^i_{Hg}=70$ 和 $RI=150$ 附近时概率达到最大,概率最大值分别为 $p_{Pb}=13.285\%$ 、 $p_{Cu}=30.950\%$ 、 $p_{Cd}=25.484\%$ 、 $p_{Hg}=20.872\%$ 和 $p_{RI}=13.548\%$.Cd与Hg的概率曲线在40~160之间的分布较为集中,表明区域内Cd与Hg存在以中度和较高等级为主的潜在生态风险.超越概率表征了重金属超过某一污染程度(潜在生态风险指数)的概率,超越概率曲线越远离 y 轴,重金属相应污染水平的污染概率越小.由Pb和Cu超越概率曲线可知,区域内Pb和Cu大概率处于轻微潜在生态风险状态,处于中度及以上潜在生态风险状态的概率很低,而Cd与Hg的超越概率曲线主要位于潜在生态风险指数为360的左侧,表明Cd和Hg风险状态超过较高水平的概率较低,但区域内仍有一定的概率存在比较高水平更高的潜在生态风险.

表4 土壤重金属潜在生态风险指数信息扩散模型信息

Table 4 Diffusion model information of potential ecological risk index of soil heavy metals

指标	域值	信息扩散系数(h)	论域(U)	离散总数(n)
$E_r^i_{Pb}$	[3.925, 193.925]	9.626	[3,4,5,...,56,194]	54
$E_r^i_{Cu}$	[2.991, 111.145]	16.134	[2,3,4,...,20,112]	19
$E_r^i_{Cd}$	[21.702, 1 337.234]	147.181	[20,40,60,...,300,400,500,...,1 400]	25
$E_r^i_{Hg}$	[17.333, 4 676.000]	500.359	[10,30,50,...,400,500,600,...,1 400,2 400,4 000,4 700]	26
RI	[61.659, 4 785.352]	409.148	[60,90,120,...,570,670,770,...,1 770,2 500,4 200,4 800]	32

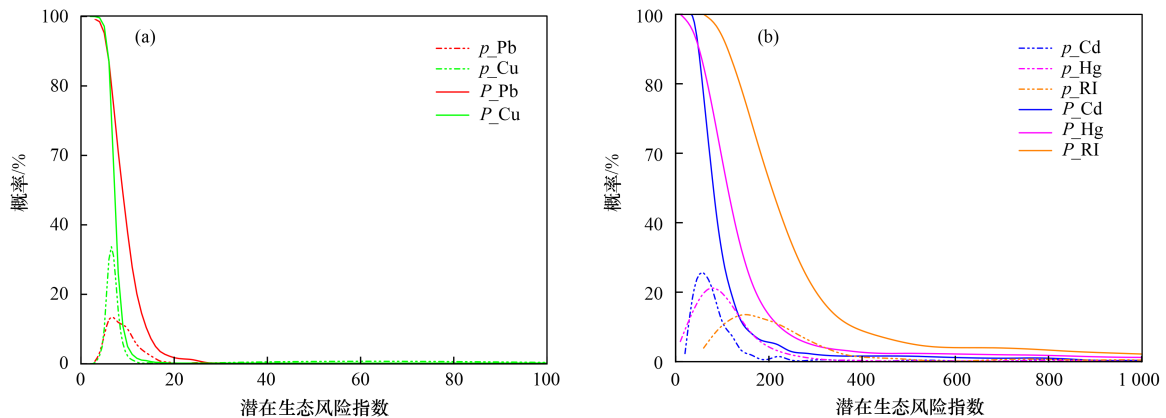


图5 沱东新城区土壤重金属污染分布概率

Fig. 5 Probability distribution of soil heavy metal pollution vicinity to Fengdong New District

表5为基于信息扩散模型计算的沱东新城区不同潜在生态风险程度下土壤受重金属污染的概率与超越概率,结果显示Cd和Hg元素各潜在生态风险等级的超越概率远大于Pb和Cu,因此可以认为区域内Cd和Hg潜在生态风险远大于Pb和Cu. Pb和Cu各污染等级发生的概率相差不大,且仅有不超过1%概率会发生轻微以上程度的潜在生态风险;Cd和Hg中度潜在生态风险等级的超越概率均大于51%,表明区域内土壤有超过51%的概率会出现超过中等水平的潜在生态风险. Hg元素各污染等级的超越概率分别为轻微(94.89%)、中度(66.85%)、较高(23.62%)、高(3.9%)和极高(2%),其中仅轻微等级的超越概率小于Cd,表明区域内Hg污染相对严重. 综合潜在生态指数的超越概率表明,区域内土壤有61.09%的概率

发生中度水平以上的重金属潜在生态风险,且发生较高潜在生态风险以上水平的概率为11.59%. 整体上各综合潜在生态风险等级的概率分布与Cd和Hg相似,且考虑Cd和Hg的毒性响应系数较大,表明Cd和Hg是导致区域综合生态风险较高的主导因素. 对比分析重金属各潜在生态风险等级的概率,结果表明土壤中Pb和Cu以轻微潜在生态风险为主,轻微等级的占比分别为Pb(99.4%)和Cu(99.8%),而Cd和Hg的潜在生态风险则以中度和较高为主,两个等级的总占比分别为Cd(82.7%)和Hg(77.84%). 研究区土壤重金属综合潜在生态风险各等级的概率排序为:较高(38.98%)>中度(38.55%)>高(5.89%)>轻微(5.15%)>极高(3.56%),表明研究区土壤整体处于中度和较高水平的重金属潜在生态风险.

表5 沱东新城区土壤重金属污染发生概率及超越概率¹⁾/%

Table 5 Probability and exceeding probability of soil heavy metal pollution vicinity to Fengdong New District/%

等级	Pb		Cu		Cd		Hg		RI	
	<i>p</i> _{Pb}	<i>P</i> _{Pb}	<i>p</i> _{Cu}	<i>P</i> _{Cu}	<i>p</i> _{Cd}	<i>P</i> _{Cd}	<i>p</i> _{Hg}	<i>P</i> _{Hg}	<i>p</i> _{RI}	<i>P</i> _{RI}
轻微	99.40	0.66	99.80	0.28	6.70	97.67	7.30	94.89	5.15	96.06
中度	0.4	0.56	0	0.24	51.30	51.05	31.36	66.85	38.55	61.09
较高	0	0.38	0.20	0.22	31.40	8.43	46.48	23.62	38.98	11.59
高	0.2	0.2	0	0	4.78	1.60	11.98	3.90	5.89	3.78
极高	0	0	0	0	1.60	0.73	3.90	2.00	3.56	1.43

1)*p*_{Pb}、*p*_{Cu}、*p*_{Cd}和*p*_{Hg}为4种重金属元素污染等级占比,即污染概率;*P*_{Pb}、*P*_{Cu}、*P*_{Cd}和*P*_{Hg}为4种重金属超过某一污染程度的概率,即超越概率

进行信息扩散模型预测概率与实际污染概率对比,如图6所示,其中概率误差的正负表征各等级预测概率的方向,为正即预测偏小,为负则预测概率偏大. 基于信息扩散的潜在生态风险等级概率评估结果显示,重金属各污染等级的概率评估误差均小于5%,Pb和Cu的各污染等级预测概率与实际均相符,仅较高综合潜在生态风险等级的预测概率误差较大,为4.82%,展现了该模型的良好评估性能及其基

于小样本的普适性.

3 讨论

进行土壤重金属污染科学评价,对于精确掌握土壤污染程度,及时实施风险管控具有重要意义. 本研究中Cd和Hg的潜在生态风险较大,表明区域土壤中Cd和Hg重金属含量整体较高,这也与重金属样品超标率Cd(98.6%)和Hg(91.2%),重金属均值超背景值倍数Cd(3.074)和Hg(3.567)数据相符,此外,也与重金属毒性响应系数较大(Cd = 30和Hg = 40)有关^[48, 49]. 重金属潜在生态风险指数评价与基于扩散信息的生态风险评估对比,风险等级概率误差均在5%以内,Pb和Cu各污染等级的概率误差均为0,比较Cd和Hg各污染等级的概率误差,结果表明除轻微潜在生态风险外,Hg其余各潜在生态风险等级的概率误差均大于Cd,且综合潜在生态风险指数的概率评估误差绝对值大小变化趋势与Hg一致,推测是由于Hg的毒性响应系数对潜在生态风险的贡献度比Cd大,因而是影响区域生态风险的主导因素.

基于信息扩散的潜在生态风险评估,提供了各潜在生态风险水平的概率及超越概率,实现了对污染概率分布规律的探讨,且根据经验窗宽选择公式

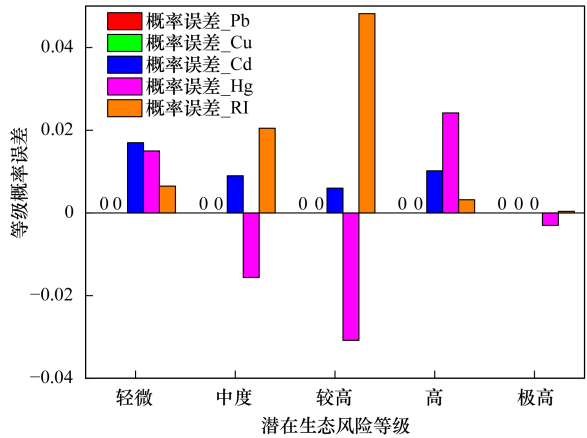


图6 信息扩散风险评估模型各等级的概率预测误差

Fig. 6 Probability prediction error for each pollution level of information diffusion risk assessment model

(5)可知,该模型评估方法理论上适用于样本受限区域的重金属污染风险评价,可用于绘制重金属污染分布曲线,计算任一风险水平的概率。但研究仍需要对扩散函数的选取、论域的确定以及最佳扩散基底样本的布局展开进一步的探讨。

4 结论

(1)沔东新城区各重金属元素土壤背景超标率均高于91%,且受人为因素影响严重,重金属数据分布呈现强变异性和非正态性。受工业生产及城市开发建设的影响,重金属空间分布差异显著,Pb和Cu高值区分别位于研究区南部和北部,Cd和Hg高值区分别位于研究区的东北部与西部,有6.8%的样本重金属含量超出土壤重金属污染风险筛选及管制值,因此需重点关注超标点位附近的土壤污染管控。

(2)潜在生态风险指数评价结果表明,区域内Pb和Cu主要处于轻微潜在生态风险状态,而Cd和Hg以中度、较高潜在生态风险为主,污染较为严重,是造成区域综合生态风险较大的主导因素。重金属综合潜在生态风险表明,区域整体处于中度(40.6%)和较高(43.8%)潜在生态风险状态,且重金属高和极高等级的潜在生态风险分布与人类生产生活息息相关。

(3)基于信息扩散的生态风险评估结果显示,Pb和Cu元素仅有不超过0.67%概率会发生轻微以上程度的潜在生态风险,且区域内土壤中Cd和Hg有超过51%的概率会出现超过中等水平的潜在生态风险,该结论与潜在生态风险指数评价结论一致,且模型的等级概率评估误差均小于5%,展现了良好的模型评估性能。

致谢:黄五超、黄勃学、胡慧娟、王海洋、崔禹、韩星和李慧慧等在采样方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Fei X F, Lou Z H, Xiao R, *et al.* Contamination assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soil through the synthesis of PMF and GeogDetector models[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **747**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141293.
- [2] 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.
- [3] 齐杳杳,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] 刘梦梅,王利军,王丽,等. 西安市不同功能区土壤重金属含量及生态健康风险评价[J]. *土壤通报*, 2018, **49**(1): 167-175.
- Liu M M, Wang L J, Wang L, *et al.* Concentration and ecological health risk assessment of heavy metals of soil in different functional areas in Xi'an, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, **49**(1): 167-175.
- [5] 蒋兴超,许静,李如意,等. 广东省汕头市土壤铬的空间分布特征、来源解析及影响因素研究[J]. *地学前缘*, 2023, **30**(2): 514-525.
- Jiang X C, Xu J, Li R Y, *et al.* Soil chromium in Shantou City, Guangdong Province: spatial distribution characteristics, source apportionment and influencing factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, **30**(2): 514-525.
- [6] 李晓曼,李青青,杨洁,等. 上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5687-5697.
- Li X M, Li Q Q, Yang J, *et al.* Compound pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soil and groundwater of typical industrial lands in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5687-5697.
- [7] 陈景辉,郭毅,杨博,等. 省会城市土壤重金属污染水平与健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(10): 2058-2069.
- Chen J H, Guo Y, Yang B, *et al.* Pollution level of heavy metals in soil and health risk assessment in provincial capital cities of China [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2022, **31**(10): 2058-2069.
- [8] 莫跃英,索惠英,焦树林,等. 喀斯特地区降水量空间插值方法对比——以贵州省为例[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(1): 164-170.
- Mo Y S, Suo H Y, Jiao S L, *et al.* Comparison of spatial interpolation methods of precipitation—a case of karst area in Guizhou province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(1): 164-170.
- [9] Yang Y, Wu J P, Christakos G. Prediction of soil heavy metal distribution using Spatiotemporal Kriging with trend model [J]. *Ecological Indicators*, 2015, **56**: 125-133.
- [10] Zhu X C, Cao L X, Liang Y. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals inside and outside a typical lead-zinc mine in southeastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(25): 26265-26275.
- [11] Qi Z, Gao X, Qi Y, *et al.* Spatial distribution of heavy metal contamination in mollisol dairy farm [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114621.
- [12] 肖艳桐,张瑞雪,吴攀. 土壤重金属分析常用空间插值法研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(3): 198-205.
- Xiao Y T, Zhang R X, Wu P. Review on common spatial interpolation methods for soil heavy metal analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(3): 198-205.
- [13] 胡永兴,宿虎,张斌,等. 土壤重金属污染及其评价方法概述[J]. *江苏农业科学*, 2020, **48**(17): 33-39.
- Hu Y X, Su H, Zhang B, *et al.* Soil heavy metal pollution and its evaluation methods: a review [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, **48**(17): 33-39.
- [14] Ganugapenta S, Nadimikeri J, Chinnapolla S R R B, *et al.* Assessment of heavy metal pollution from the sediment of Tupilipalem Coast, southeast coast of India [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2018, **33**(3): 294-302.
- [15] 王玉军,吴同亮,周东美,等. 农田土壤重金属污染评价研究

- 进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- Wang Y J, Wu T L, Zhou D M, *et al.* Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(12): 2365-2378.
- [16] 周旭, 吕建树. 山东省广饶县土壤重金属来源、分布及生态风险[J]. 地理研究, 2019, **38**(2): 414-426.
- Zhou X, Lv J S. Sources, distribution and ecological risk of soil heavy metals in Guangrao county, Shandong province [J]. *Geographical Research*, 2019, **38**(2): 414-426.
- [17] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 典型铅锌矿化区不同土地利用类型土壤重金属污染特征与评价[J]. 地球与环境, 2018, **46**(6): 561-570.
- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Characterization and assessment of the heavy metal pollution in soils of different land use patterns around a typical Lead-zinc mineralization area [J]. *Earth and Environment*, 2018, **46**(6): 561-570.
- [18] 刘佳伟, 杨明生. 鄱阳湖流域重金属污染评价与分析[J]. 环境污染与防治, 2022, **44**(1): 99-103.
- Liu J W, Yang M S. Assessment and analysis of heavy metal pollution in Poyang Lake Basin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2022, **44**(1): 99-103.
- [19] 路一帆, 陆胤, 蔡慧, 等. 铅蓄电池厂遗留场地重金属污染分析及健康风险评价[J]. 环境工程, 2022, **40**(1): 135-140, 189.
- Lu Y F, Lu Y, Cai H, *et al.* Pollution analysis and health risk assessment of heavy metals in field left by a lead-acid battery factory [J]. *Environmental Engineering*, 2022, **40**(1): 135-140, 189.
- [20] 张怡萍, 王哲, 张振龙, 等. 基于蒙特卡洛模拟的土壤健康风险评价——以攀枝花某矿区小流域为例[J]. 化工矿物与加工, 2022, **51**(12): 30-36, 45.
- Zhang Y P, Wang Z, Zhang Z L, *et al.* Soil health risk evaluation based on Monte Carlo simulation—a case study of the small watershed around a mine in Panzhihua [J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2022, **51**(12): 30-36, 45.
- [21] 熊燕. 土壤质量和土壤重金属污染评价方法综述[J]. 贵阳学院学报(自然科学版), 2021, **16**(3): 92-95.
- Xiong Y. Review of soil quality and heavy metal pollution assessment in soil [J]. *Journal of Guiyang College (Natural Sciences)*, 2021, **16**(3): 92-95.
- [22] 袁平旺, 王黎栋, 何培雍, 等. 粤北某离子吸附型稀土矿山土壤和地表水重金属分布及风险评价[J]. 中国环境监测, 2023, **39**(1): 146-158.
- Yuan P W, Wang L D, He P Y, *et al.* Distribution and risk assessment of heavy metals in soil and surface water of an ion-absorbed rare earth mine in northern Guangdong [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2023, **39**(1): 146-158.
- [23] 赵华荣, 王迪, 朱槟桐, 等. 基于信息扩散理论的广东大宝山地区土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 79-86.
- Zhao H R, Wang D, Zhu B T, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution of soil in the Dabaoshan mining area based on the information diffusion theory [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(1): 79-86.
- [24] Olya H G T, Alipour H. Risk assessment of precipitation and the tourism climate index [J]. *Tourism Management*, 2015, **50**: 73-80.
- [25] 吴柳萍, 纪志荣, 连素兰, 等. 福建省森林病虫害发生风险的概率分析[J]. 森林与环境学报, 2017, **37**(1): 95-101.
- Wu L P, Ji Z R, Lian S L, *et al.* Probability analysis of forest pests occurring risk in Fujian Province [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2017, **37**(1): 95-101.
- [26] 李孟刚, 周长生, 连连. 基于熵信息扩散理论的中国农业水旱灾害风险评估[J]. 自然资源学报, 2017, **32**(4): 620-631.
- Li M G, Zhou C S, Lian L. Agricultural flood and drought risk assessment in China based on entropy information diffusion theory [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(4): 620-631.
- [27] 赵华荣, 李梦豪, 姚越, 等. 广西内苗溪沉积物重金属污染及其生态风险评价[J]. 人民长江, 2023, **54**(2): 112-119.
- Zhao H R, Li M H, Yiao Y, *et al.* Heavy metal pollution in sediments of Neimiao Creek, Guangxi Autonomous Region and its ecological risk assessment [J]. *Yangtze River*, 2023, **54**(2): 112-119.
- [28] 曾庆兰, 吴迪, 普福敏, 等. 基于信息扩散的刺梨基地路边重金属污染评价[J]. 化学工程, 2023, **51**(2): 1-6.
- Zeng Q L, Wu D, Pu F M, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in roadside of Rosa roxburghii base based on information diffusion [J]. *Chemical Engineering (China)*, 2023, **51**(2): 1-6.
- [29] 严周欣荣, 李雷. 西咸新区第四系地质地层辨识研究[J]. 陕西地质, 2019, **37**(1): 63-66.
- Yanzhou X R, Li L. Strata identification of the quaternary system in Xixian New District [J]. *Geology of Shaanxi*, 2019, **37**(1): 63-66.
- [30] 武春林, 成欢, 王瑞廷, 等. 陕西省西咸新区窑店镇土地质量地球化学评价及合理开发建议[J]. 地质调查与研究, 2019, **42**(3): 225-234.
- Wu C L, Cheng H, Wang R T, *et al.* Geochemistry evaluation and rational development suggestion on the land quality of the Yaodian Town in Xi Xian New Area [J]. *North China Geology*, 2019, **42**(3): 225-234.
- [31] Hu H J, Han L, Li L Z, *et al.* Soil heavy metal pollution source analysis based on the land use type in Fengdong District of Xi'an, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, **193**(10): 643.
- [32] 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 等. 太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2143-2152.
- Huang H, Xu Z Q, Yan J X, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution and ecological risk evaluation of indoor dust from urban and rural areas in Taiyuan City during the heating season [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2143-2152.
- [33] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [34] 马建华, 王晓云, 侯千, 等. 某城市幼儿园地表灰尘重金属污染及潜在生态风险[J]. 地理研究, 2011, **30**(3): 486-495.
- Ma J H, Wang X F, Hou Q, *et al.* Pollution and potential ecological risk of heavy metals in surface dust on urban kindergartens [J]. *Geographical Research*, 2011, **30**(3): 486-495.
- [35] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(6): 1233-1241.
- [36] 王越, 莫莉, 余新晓, 等. 粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1636-1645.
- Wang Y, Mo L, Yu X X, *et al.* Enrichment characteristics,

- source apportionment, and risk assessment of heavy metals in the industrial and mining area of northern Guangdong Province [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1636-1645.
- [37] Liu J L, Yang T, Chen Q Y, *et al.* Distribution and potential ecological risk of heavy metals in the typical eco-units of Haihe River Basin [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, **10**(1): 103-113.
- [38] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- Fan M Y, Yang H, Huang X F, *et al.* Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2425-2436.
- [39] 陈怡先, 姜小三, 王勇, 等. 基于GIS矿区土壤重金属生态环境及人体健康评价[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1642-1652.
- Chen Y X, Jiang X S, Wang Y, *et al.* Assessment of ecological environment and human health of heavy metals in mining area based on GIS[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1642-1652.
- [40] 生态环境部. 关于发布《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》等两项国家环境质量的公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/201807/t20180703_629589.html, 2018-06-28.
- [41] Joanes D N, Gill C A. Comparing measures of sample skewness and kurtosis [J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, 1998, **47**(1): 183-189.
- [42] Westfall P H. Kurtosis as Peakedness, 1905-2014. *R. I. P.* [J]. *The American Statistician*, 2014, **68**(3): 191-195.
- [43] Zhang P Y, Qin C Z, Hong X, *et al.* Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1136-1147.
- [44] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于PMF模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- Chai L, Wang X, Ma L, *et al.* Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3919-3929.
- [45] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **127**(2): 239-248.
- [46] Lindeberg J W. Eine neue Herleitung des Exponentialgesetzes in der Wahrscheinlichkeitsrechnung [J]. *Mathematische Zeitschrift*, 1922, **15**(1): 211-225.
- [47] Gauss C F. *Theoria motus corporum coelestium in sectionibus conicis solem ambientium* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1809. 123-142.
- [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] 黄剑波, 姜登登, 温冰, 等. 基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2204-2214.
- Huang J B, Jiang D D, Wen B, *et al.* Contamination and probabilistic health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around a Lead-Zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2204-2214.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-rui (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-lie, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pe, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamy aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)