

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 ..... 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 ..... 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 ..... 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 ..... 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 传输特征分析 ..... 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 ..... 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP ..... 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 ..... 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O<sub>3</sub> 生成敏感性控制策略解析 ..... 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 ..... 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 ..... 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 ..... 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 ..... 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 ..... 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 ..... 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 ..... 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 ..... 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 ..... 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 ..... 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 ..... 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 ..... 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 ..... 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 ..... 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 ..... 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 ..... 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 ..... 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd<sup>2+</sup> 吸附机制 ..... 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 ..... 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 ..... 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 ..... 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 ..... 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 ..... 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 ..... 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 ..... 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 ..... 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 ..... 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 ..... 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 ..... 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 ..... 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 ..... 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 ..... 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH<sub>4</sub> 产生潜力与产生途径 ..... 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 ..... 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 ..... 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 ..... 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 ..... 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 ..... 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

# 燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价

李强<sup>1</sup>, 姚万程<sup>1,2</sup>, 赵龙<sup>3</sup>, 张朝<sup>4</sup>, 张恩月<sup>2</sup>, 苏迎庆<sup>2</sup>, 刘庚<sup>2\*</sup>

(1. 太原师范学院地理科学学院, 晋中 030619; 2. 太原师范学院汾河流域科学发展研究中心, 晋中 030619; 3. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 4. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012)

**摘要:** 为揭示黄土高原燃煤工业区不同土地利用方式下土壤 Hg 污染特征及空间变异程度, 以山西省忻州市西部 7 县为研究区域, 采用地累积指数、潜在生态风险指数、健康风险模型和地理探测器等对该区域不同土地利用类型中的 Hg 含量进行污染及健康风险评价。结果表明, 耕地、草地、林地和居住用地中  $\omega(\text{Hg})$  均值分别为 0.48、0.34、0.58 和 0.52  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 耕地、草地、林地和居住用地中 Hg 平均值分别为背景值的 16、11.33、19.33 和 17.33 倍, 变异系数大小为: 居住用地 > 耕地 > 草地 > 林地。地累积指数与潜在生态风险指数评价结果表明, 研究区整体受 Hg 污染生态风险程度较为严重, 局部区域存在极强污染。健康风险评价结果表明研究区 Hg 对儿童和成人均不存在非致癌健康风险。因子探测结果表明耕地 Hg 的空间变异性主要受工农业生产影响, 草地 Hg 主要受土壤有机质和 pH 值影响, 林地 Hg 主要受土壤盐分的影响, 居住用地 Hg 主要受土壤盐分和有机质的影响。Hg 含量空间分布格局总体上表现为中部向南北两侧递增趋势, 污染严重区域主要受煤炭开采及工业生产等人类扰动因素影响。

**关键词:** 燃煤工业区; 土壤污染评价; 空间变异; 汞污染; 环境风险

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3781-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109061

## Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area

LI Qiang<sup>1</sup>, YAO Wan-cheng<sup>1,2</sup>, ZHAO Long<sup>3</sup>, ZHANG Chao<sup>4</sup>, ZHANG En-yue<sup>2</sup>, SU Ying-qing<sup>2</sup>, LIU Geng<sup>2\*</sup>

(1. College of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China; 2. Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Technical Centre for Ecology and Environment of Soil, Agriculture and Rural Areas, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The geo-accumulation index, potential ecological risk index, health risk model, and geographical detector were used to evaluate the soil mercury (Hg) concentrations and assess the health risks for various land use types to reveal the characteristics and spatial variability of soil Hg pollution under different land uses in the coal-fired industrial area of the Loess Plateau. The study area included seven counties in the western part of Xinzhou City, Shanxi province. The results showed that the average  $\omega(\text{Hg})$  in the agricultural land, grass land, wood land, and residential land were 0.48, 0.34, 0.58, and 0.52  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, which were 16.00, 11.33, 19.33, and 17.33 times higher than the background value, respectively. The variation coefficients were ranked as residential land > agricultural land > grass land > wood land. The evaluation results of the geo-accumulation index and potential ecological risk index indicated a high ecological risk of Hg pollution in the entire study area with extreme pollution points in certain areas. The health risk assessment results indicated no non-carcinogenic health risks for children and adults in the study area from Hg. Additionally, the geographical detection results revealed that the spatial variability in Hg was mainly impacted by industrial and agricultural activities in agricultural land, by soil organic matter and pH value in grass land, by soil salinity in wood land, and by soil salinity and organic matter in residential land. The spatial distribution pattern of Hg concentrations peaked in both the northern and southern edges, with a decreasing trend towards the middle and the majorly polluted areas being caused by human activities such as coal mining and industrial production.

**Key words:** coal-fired industrial zone; soil pollution assessment; spatial variation; Hg pollution; environmental risk

黄土高原是我国具有经济和生态双重脆弱性的内陆欠发达地区<sup>[1]</sup>, 资源型城市数量众多<sup>[2]</sup>. 煤炭资源型城市分布有以煤炭采掘及选煤、洗煤等以煤炭资源为主的工业体系<sup>[3,4]</sup>, 兼有燃煤电厂、水泥厂和煤化工等燃煤企业的分布<sup>[5]</sup>. 在煤炭开采及矿石冶炼过程中, 部分 Hg 元素会伴随尾矿废渣、冶炼废水和废气等通过大气降尘和地表径流等途径进入土壤<sup>[6-8]</sup>. Hg 在土壤环境中具有毒害作用强、累积性显著和生物富集性明显等特点<sup>[9]</sup>, 进入土壤中的 Hg 会通过吸附、沉淀和络合等环境过程形成不同的赋

存形态<sup>[10]</sup>, 通过各层级食物链富集进入生物体内<sup>[11]</sup>, 对人类健康存在潜在危害, 被列为优先控制的环境污染物。

针对土壤重金属污染风险评价, 现有研究大多集中在中小尺度下的矿山及周边区<sup>[12,13]</sup>、城市表层土壤<sup>[14]</sup>、污灌区<sup>[15]</sup>、有色金属冶炼区<sup>[16]</sup>和河流底

收稿日期: 2021-09-08; 修订日期: 2021-11-17

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41401236); 山西省高等学校优秀成果(科学技术)培育项目(2020KJ024)

作者简介: 李强(1983~), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染评价与修复, E-mail: tysylq@163.com

\* 通信作者, E-mail: lugeng9696@126.com

泥<sup>[17]</sup>等具有明确污染来源和单一土地利用类型的区域,而对于黄土高原生态敏感脆弱区的土壤重金属污染研究较少.尤其对于该区域土壤重金属汞(Hg)污染缺乏系统化评价研究.另外,人类活动引起的土地利用方式的变化对土壤中重金属元素的赋存特征具有一定的影响,不同土地利用类型中土壤重金属具有较强的空间分异性特征,基于土壤理化性质、土壤养分和土壤基质等多源环境因子可以评估不同土地利用类型下土壤重金属污染的污染分布和空间变异特征<sup>[18-20]</sup>.

鉴于目前针对黄土高原生态敏感脆弱区尚未开展不同土地利用类型下土壤 Hg 污染评价的系统研究,本文以地处黄土高原中北部的山西省忻州市西部 7 县为研究区域,该区域是山西省重要的煤炭生产和能源重化工中心,区域内燃煤企业众多,具有大分散和小聚集的分布特征,多年来的工业生产活动对区域内不同土地利用类型下的土壤产生了不同程度的 Hg 污染.本文拟开展该区域不同土地利用类型下土壤 Hg 污染评价研究,揭示土壤 Hg 污染特征、风险程度、空间分布规律和影响因素,以期为该区域以及黄土高原类似区域土壤 Hg 污染风险管控和修复治理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原中北部,地处我国晋陕蒙著名的“煤三角”地带,辖偏关、神池、河曲、五寨、保德、岢岚和宁武等 7 县,面积为 10 815 km<sup>2</sup>. 境内煤炭资源丰富,赋存条件优越,依托丰富的资源优势,形成煤炭开采、燃煤电力和煤化工等重要的支柱产业,煤炭工业集中分布在河曲-偏关-神池和岢岚-宁武的交汇地区.区域内整体地势东南向西倾斜,高程介于 780 ~ 2 783 m,地貌以黄土丘陵为主,属温带大陆性季风气候,年均气温 4.3 ~ 8.8℃,年降水量 345 ~ 770 mm.

### 1.2 样品采集与化验分析

选取燃煤工业区周边耕地、草地、林地和居住地这 4 种土地利用类型,结合研究区本底特征,综合考量土地利用、地块面积和地形地势等情况,采用梅花法布设采样点位,共采集 111 个土壤样品,其中耕地 44 个、草地 39 个、林地 21 个和居住地 7 个,样点分布如图 1.

采用五点法取样,在每个分点上,使用便携式原状不锈钢取土钻采集 1 个样品(0 ~ 20 cm),然后将各分点样品等重量混匀后用四分法弃取,保留 1 kg 风干土壤的土样.全汞采用日立 Za-3000 型仪器,按

照《土壤和沉积物 总汞的测定 催化热解-冷原子吸收分光光度法》(HJ 923)进行测定,检出限为 0.2 μg·kg<sup>-1</sup><sup>[21]</sup>;锰元素采用火焰原子吸收分光光度法进行测定,具体方法参照 BS 7755-3.13-1998(英国标准学会).

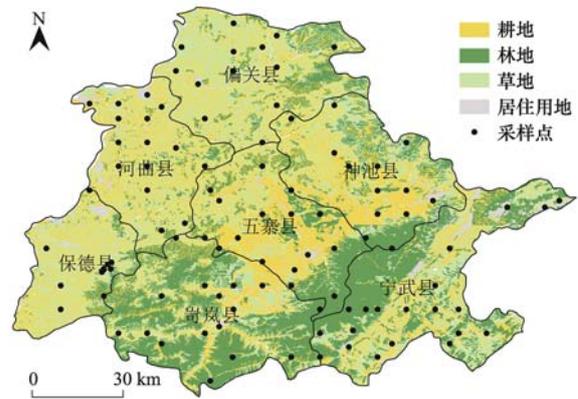


图 1 研究区采样示意

Fig. 1 Sampling sites of study area

### 1.3 数据处理及评价方法

采用多元统计分析、地累积指数和潜在生态风险指数对研究区 Hg 污染现状进行分析,采用健康风险模型进行人体健康风险表征,采用地理探测器进行因子探测和交互探测分析,采用富集因子分析、普通克里金插值对 Hg 进行空间分布分析.利用 SPSS 22.0 进行数据统计和分析,利用 Arcgis 10.2 进行制图.

#### 1.3.1 地累积指数

地累积指数法主要用于研究环境中重金属污染程度的定量指标<sup>[22]</sup>,其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 (C_i / K \cdot B_i) \quad (1)$$

式中,  $I_{geo}$  为地累积指数,  $C_i$  为各重金属元素在土壤中的含量,  $B_i$  为土壤中该元素的地球化学背景值<sup>[23]</sup>,  $K$  为成岩作用引起的背景值变动系数(一般  $K = 1.5$ ). 当  $I_{geo} \leq 0$  时,无污染;  $0 < I_{geo} \leq 1$  时,无-中度污染;  $1 < I_{geo} \leq 2$  时,中度污染;  $2 < I_{geo} \leq 3$  时,中-强度污染;  $3 < I_{geo} \leq 4$  时,强度污染;  $4 < I_{geo} \leq 5$  时,强-极强污染;  $I_{geo} > 5$  时,极强污染.

#### 1.3.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是国际上分析土壤重金属生态风险的重要方法之一,能够结合环境化学、生物毒理学和生态学等多学科进行污染程度的量化,以定量的方法划分出重金属潜在危害的程度<sup>[24]</sup>. 单种重金属的潜在生态危害系数计算公式如下:

$$E_i^i = T_i^i \times C_i^i = T_i^i \times C_i^i / S_i^i \quad (2)$$

式中,  $E_i^i$  为重金属  $i$  的潜在生态危害系数,  $T_i^i$  为重金属  $i$  毒性响应系数, Hg 的毒性系数为 40,  $C_i^i$  和  $S_i^i$  分别为重金属  $i$  的实测浓度和评价参比值. 当  $E_i^i <$

40 时,生态风险程度为低风险;  $40 \leq E_r^i < 80$  时,中度风险;  $80 \leq E_r^i < 160$  时,较重风险;  $160 \leq E_r^i < 320$  时,重度风险;  $E_r^i \geq 320$  时,严重风险。

### 1.3.3 健康风险表征

重金属的人体健康风险主要受污染物毒理特性和人体暴露途径等主要因素影响<sup>[25]</sup>,参照 USEPA 提出的土壤健康风险模型,结合剂量-反应关系和不同暴露途径对研究区附近的人群进行人体健康风险评价,评价主要分为暴露剂量计算和健康风险表征两个部分<sup>[26]</sup>。暴露量及健康风险表征计算公式如下:

$$ADD_{ing} = C_i \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$ADD_{inh} = C_i \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (4)$$

$$ADD_{idrem} = C_i \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$HQ = ADD/RfD \quad (6)$$

式中,  $ADD_{ing}$ 、 $ADD_{inh}$  和  $ADD_{idrem}$  分别为手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触摄入重金属  $i$  的日均暴露剂量,  $C_i$  为土壤中重金属  $i$  含量。HQ 为某种重金属在某一途径的非致癌健康风险指数, ADD 为某种重金属在此途径下的非致癌风险量, RfD 为某种重金属在该途径下的非致癌日均摄入量。公式中参数的具体说明见文献<sup>[10]</sup>。

### 1.3.4 地理探测器

地理探测器是基于空间分异理论探究变量的驱动力以及影响因子的交互作用和空间关联的一种统计学方法,目前已广泛应用于人体健康和环境污染等领域<sup>[27]</sup>。本文利用其因子探测和交互作用探测两个模块进行分析。

因子探测的计算公式如下:

$$q = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \right) \quad (7)$$

式中,  $L$  为因子  $X$  的分层;  $N_i$  和  $N$  分别为层  $i$  和土壤点位总数;  $\sigma_i^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $i$  和土壤 Hg 含量的方差。解释力  $q$  介于  $[0, 1]$ ;  $q$  值越大,表明因子  $X$  对土壤 Hg 含量的解释力越强。

交互作用探测器是探测双因子交互作用对土壤 Hg 含量的解释力<sup>[28]</sup>。类型有, ①双因子增强:  $Q(XA \cap XB) > \max[Q(XA), Q(XB)]$ ; ②非线性增强:  $Q(XA \cap XB) > Q(XA) + Q(XB)$ ; ③相互独立:  $Q(XA \cap XB) = Q(XA) + Q(XB)$ ; ④非线性减弱:  $Q(XA \cap XB) < \min[Q(XA), Q(XB)]$ ; ⑤单因子非线性减弱:  $\min[Q(XA), Q(XB)] < Q(XA \cap XB) < \max$

$[Q(XA), Q(XB)]$ 。

使用 GeoDetecto 前需对研究区进行格点化处理,划分  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  的格网,取格网中心点,用中心点对影响因子进行离散化处理。然后将所有格点所在位置的自变量及因变量提取作为输入数据,其次对输入数据进行重分类处理,将连续变量转化为类别变量。本文对 10 项影响因子  $X$  ( $X_1$  为高程,  $X_2$  为坡度,  $X_3$  为 NDVI,  $X_4$  为人口密度,  $X_5$  为人均 GDP,  $X_6$  为人均工业总产值,  $X_7$  为人均农业总产值,  $X_8$  土壤盐分,  $X_9$  为土壤有机质,  $X_{10}$  为土壤 pH 值)进行预处理,将影响因子  $X$  划分为 5 层。其中,  $q$  值为影响因子  $X$  对 Hg 含量变化的解释力,  $q$  值介于  $[0, 1]$ ,  $q$  值越接近于 1,表示影响因子  $X$  的解释力越强。

### 1.3.5 富集因子分析

富集因子是评价人类活动对土壤中重金属富集程度影响的有效方法<sup>[29]</sup>,参比元素应依据研究区实际情况进行选取,因 Mn 在当地含量较高且与 Hg 没有协同或拮抗作用<sup>[30]</sup>,因此本文采用 Mn 作为参比元素,富集因子计算公式如下:

$$EF = (C_{Hg}/C_{ref})_{\text{实测}} / (B_{Hg}/B_{ref})_{\text{背景}} \quad (8)$$

式中,EF 为富集因子;  $C_{Hg}$  为 Hg 元素的实测含量,  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $C_{ref}$  为参比元素 Mn 的实测含量;  $B_{Hg}$  为 Hg 元素的背景浓度;  $B_{ref}$  为参比元素 Mn 的背景浓度。运用 Sutherland<sup>[31]</sup> 提出的分类方法,进行污染程度的等级划分。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤 Hg 含量描述性统计分析

研究区 Hg 含量的统计分析如表 1 所示。耕地、草地、林地和居住用地中  $\omega(\text{Hg})$  范围分别为 0.09 ~ 2.43、0.03 ~ 2.15、0.03 ~ 1.48 和 0.14 ~ 2.03  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均值分别为 0.48、0.34、0.58 和 0.52  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Hg 含量的变异系数大小为:居住用地 > 耕地 > 草地 > 林地,其中居住用地、耕地和草地中的 Hg 含量变异系数相近且均表现为强变异性,林地中 Hg 含量变异系数表现为中等变异性,表明研究区 Hg 离散程度较高,可能受污染源分布和释放强度等人为扰动因素的影响。Hg 在农用地和建设用地上土壤污染风险筛选值分别为 3.4  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 8  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[32,33]</sup>,耕地、草地、林地和居住用地中 Hg 超标率均为 0,山西省土壤 Hg 背景值为 0.03  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[23]</sup>,耕地、草地、林地和居住用地的 Hg 均值分别为背景值的 16、11.33、19.33 和 17.33 倍,表明研究区 Hg 存在一定程度的富集。林地的  $\omega(\text{Hg})$  最大值 (1.48  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 低于耕地 (2.43

mg·kg<sup>-1</sup>)和草地(2.15 mg·kg<sup>-1</sup>),其均值高于耕地和草地,表明林地 Hg 含量富集较为明显. 与其他 3 种土地利用方式相比,居住用地 Hg 的变异系数最大,表明居住用地部分区域存在 Hg 高度集聚的现

象,可能是受到强烈的人为干扰因素的影响. 与同类型研究区域相比,本研究区 Hg 含量平均值要高于广东省揭阳市、山东省莱芜市和北京市顺义区等地区,表明研究区 Hg 含量均值处于较高水平.

表 1 土壤表层 Hg 含量的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of Hg concentrations in the soil surface layer

功能分区	最小值/mg·kg <sup>-1</sup>	最大值/mg·kg <sup>-1</sup>	均值/mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数/%	标准差	文献
耕地	0.09	2.43	0.48	117	0.56	
草地	0.03	2.15	0.34	104	0.36	
林地	0.03	1.48	0.58	64	0.37	本研究
居住用地	0.14	2.03	0.52	121	0.63	
研究区整体	0.03	2.43	0.45	105	0.48	
揭阳市			0.079			[29]
莱芜市			0.075			[24]
北京市顺义区			0.073			[22]

### 2.2 土壤 Hg 地累积指数表征

地累积指数评价结果见图 2,耕地、草地、林地和居住用地 Hg 地累积指数的变化范围分别为 1 ~ 5.75、0.42 ~ 5.58、-0.58 ~ 5.04 和 1.64 ~ 5.50,耕地和草地地累积指数最小值分别为 1 和 0.42,污染程度呈现为无-中度污染,可能是受到农业生产活动的影响,魏洪斌等<sup>[34]</sup>对长江三角洲典型县域耕地土壤重金属研究发现,农业生产过程中施用含 Hg 农药和不合理地施用化肥会造成耕地 Hg 污染;林地最小值为 -0.58,污染程度呈现为无污染,表明林地少数样点接近于当地土壤环境背景值或受到人类活动影响较低,居住用地地累积指数最小值为 1.64,污染程度表现为中度污染,可能是受到基础设施的建设或用地类型转变过程中土壤污染的影响. 4 种土地利用类型中度污染及以上样点占比分别为

97.73%、92.31%、95.24%和 100%,强度污染以上样点占比分别为 18.18%、7.69%、38.10%和 14.29%,表明研究区 Hg 污染风险程度较为严重. 4 种土地利用类型污染程度主要表现为中度-强度污染和强度污染,均有少数样点处于极强污染的水平.

### 2.3 土壤 Hg 生态及健康风险评价

$E_r^i$  评价结果见图 3,耕地、草地、林地和居住用地 Hg 的  $E_r^i$  变化范围分别为 120 ~ 3 240、80 ~ 2 866.67、40 ~ 1 973.33 和 186.67 ~ 2 706.67,均值分别为 641.21、471.23、766.98 和 697.14,4 种土地利用类型  $E_r^i$  平均值均超过严重风险阈值,除少数林地样点处于低生态风险外,其余 3 种土地利用类型均处于中度生态风险以上,且重度生态风险及以上的样点占比分别为 95.45%、84.62%、90.48%和 100%,表明研究区潜在生态风险程度很高. 耕地、草地和居住用地中极少数样点潜在生态风险远高于严重生态风险阈值,表明局部地区可能受到重点污染企业的生产排废和交通运输影响,杨安等<sup>[35]</sup>的研

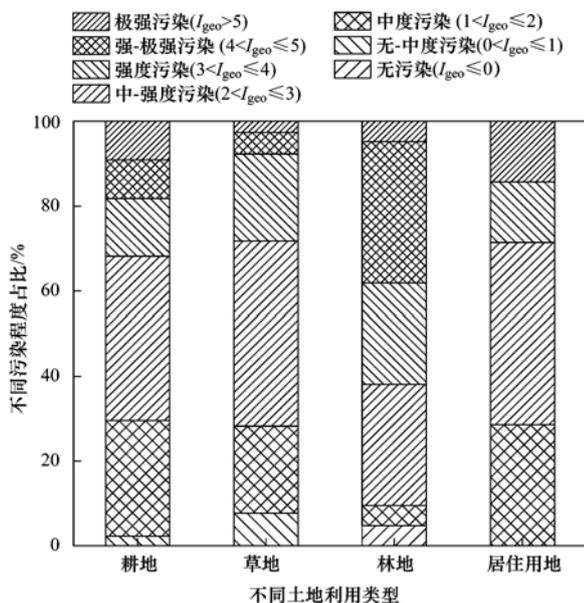


图 2 地累积指数结果

Fig. 2 Cumulative index results

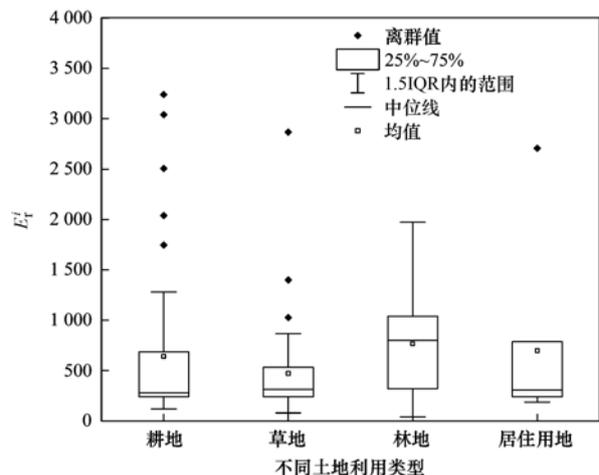


图 3 潜在生态危害指数结果

Fig. 3 Results of potential ecological hazard index

究发现 Hg 的严重污染可能是受到交通运输的影响. 研究区所处区域以能源重化工产业为主要经济产业, 煤炭开采和燃煤电力的输送过程中, 大量含有 Hg 的污染物进入土壤介质中, 使得该区域潜在生态风险很高, 后续应当进行生态修复及环境保护.

HQ 结果如表 2 所示, 参照公式(3)~(6)得出不同土地利用方式下 3 种暴露途径的非致癌风险指数, 儿童在不同分区中手-口、呼吸和皮肤接触这 3 种途径下非致癌风险指数分布范围分别为  $1.9 \times 10^{-2} \sim 9.7 \times 10^{-2}$ 、 $3.8 \times 10^{-7} \sim 2.7 \times 10^{-6}$  和  $2.1 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ , 经手-口摄入途径对非致癌总风险的贡献率远高于呼吸摄入和皮肤接触, 手-口途径

是儿童非致癌风险的最主要途径; 成人在不同土地利用方式下手-口、呼吸和皮肤接触这 3 种途径下非致癌风险指数分布范围分别为  $1.9 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^{-2}$ 、 $2.1 \times 10^{-7} \sim 1.5 \times 10^{-6}$  和  $1.3 \times 10^{-4} \sim 9.3 \times 10^{-4}$ , 与儿童一致, 手-口途径也是成人非致癌风险的最主要途径. 对比不同土地利用方式下 Hg 元素对儿童和成人人体健康非致癌总风险评价指数(手-口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸摄入), 不同分区中 3 种暴露途径的非致癌风险指数均 < 1, 表明研究区 Hg 对儿童和成人均不存在非致癌健康风险, 但儿童的非致癌总风险评价指数的平均值及最大值均高于成人, 应当对其进行进一步的管控和防治.

表 2 非致癌健康风险指数

Table 2 Non-carcinogenic health risk index

分区	项目	HQ <sub>ing</sub>		HQ <sub>inh</sub>		HQ <sub>drem</sub>		HQ	
		儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人
耕地	最大值	$9.7 \times 10^{-2}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$9.3 \times 10^{-4}$	$9.9 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-2}$
	平均值	$1.9 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-3}$	$5.3 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-4}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$
草地	最大值	$8.6 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$	$2.4 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$8.2 \times 10^{-4}$	$8.7 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-2}$
	平均值	$1.4 \times 10^{-2}$	$1.9 \times 10^{-3}$	$3.8 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-3}$
林地	最大值	$5.9 \times 10^{-2}$	$8.3 \times 10^{-3}$	$1.6 \times 10^{-6}$	$8.9 \times 10^{-7}$	$9.2 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$5.9 \times 10^{-2}$	$8.9 \times 10^{-3}$
	平均值	$2.3 \times 10^{-2}$	$3.2 \times 10^{-3}$	$6.4 \times 10^{-7}$	$3.5 \times 10^{-7}$	$3.6 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-4}$	$2.3 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-3}$
居住用地	最大值	$8.2 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-3}$	$7.7 \times 10^{-4}$	$8.3 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-2}$
	平均值	$2.1 \times 10^{-2}$	$2.9 \times 10^{-3}$	$5.8 \times 10^{-7}$	$3.1 \times 10^{-7}$	$3.2 \times 10^{-4}$	$2.0 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-3}$

## 2.4 不同环境因子对土壤 Hg 的影响

基于地理探测器的研究区土壤 Hg 的因子探测结果见图 4, 因子探测结果显示人均工业总产值和人均农业总产值对耕地 Hg 含量的空间分异影响较为明显,  $q$  值分别为 0.188 和 0.187, 其次为坡度(0.157); 土壤有机质对草地 Hg 含量的空间分异影响最大,  $q$  值为 0.196, 其次为土壤 pH 值(0.134)和高程(0.126); 土壤盐分对林地 Hg 含量的空间分异影响最大,  $q$  值为 0.322, 其次为人口密度

(0.269)和人均 GDP(0.269); 土壤盐分和土壤有机质对居住用地 Hg 含量的空间分异影响较为明显,  $q$  值分别为 0.627 和 0.626, 其次为人口密度(0.415).

利用交互探测器探测主导影响因子对不同功能分区的 Hg 含量的交互作用, 结果如表 3 所示. 交互探测的结果表明各影响因子之间以非线性增强为主, 双因子增强为辅, 不存在减弱或独立的作用类型. 交互探测结果表明研究区土壤 Hg 的累积受多种因素复合影响, 不同因子的复合交互作用对 Hg 的累积和转化起着重要作用, 使得 Hg 呈现出不同的空间分布特征. 综合因子探测和交互探测结果, 发现耕地 Hg 含量的空间变异性主要受到工业生产和农业生产的影响, 工业生产过程中废弃物的排放、尾矿矿渣的堆积、化石燃料的不完全燃烧和汽车尾气排放以及农业生产中采用污水灌溉、地膜覆盖和化肥施用等均会加重周边耕地中 Hg 的富集; 草地 Hg 含量主要受到土壤有机质和 pH 值的影响, 土壤中的有机质可以通过对 Hg 的吸附和络合作用来控制 Hg 的分布, 且有机质含量高的土壤更易于吸附和富集 Hg, 土壤 pH 值的变化会影响土壤颗粒物表面的吸附量, 同时也会改变 Hg 的存在形态, 研究区地处黄土高原, pH 范围为 7.46 ~

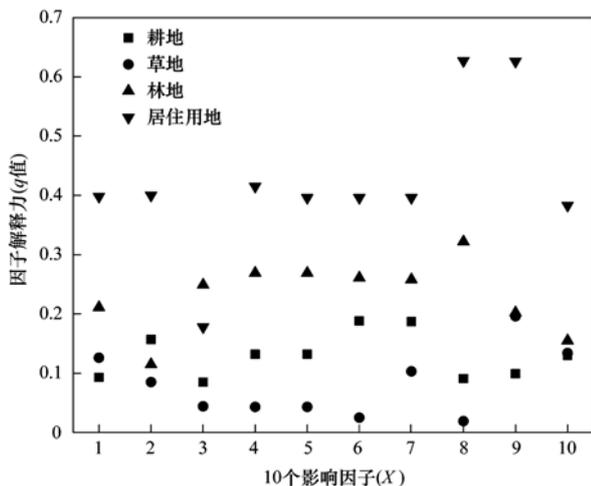


图 4 因子探测结果

Fig. 4 Factor detection results

8.98,属于弱碱性或者碱性土壤,故草地 Hg 含量受到 pH 的影响低于土壤有机质;林地 Hg 含量主要受到土壤盐分的影响,土壤盐分由随机性变异控制,土壤中的 N 和 P 元素在微生物的作用下易产生还原反应,与土壤中的 Hg 发生络合作用形成

Hg 配合物,使得林地 Hg 的含量富集较为明显;居住用地 Hg 含量分布主要受到土壤盐分和土壤有机质的影响,生活污水和含 Hg 工业废水的排放使得该类型土壤的理化性质及赋存状态发生改变,土壤 Hg 更易于富集.

表 3 交互作用探测结果

Table 3 Interaction detection results

分区	$XA \cap XB$	$XA + XB$	结果	类型
耕地	$X6 \cap X7(0.189)$	$X6 + X7 = 0.375$	$C > \text{Max}(X6, X7)$	双因子增强
	$X6 \cap X2(0.491)$	$X6 + X2 = 0.345$	$C > X6 + X2$	非线性增强
草地	$X9 \cap X10(0.606)$	$X9 + X10 = 0.330$	$C > X9 + X10$	非线性增强
	$X9 \cap X1(0.366)$	$X9 + X1 = 0.322$	$C > X9 + X1$	非线性增强
林地	$X8 \cap X4(0.652)$	$X8 + X4 = 0.591$	$C > X8 + X4$	非线性增强
	$X8 \cap X5(0.652)$	$X8 + X5 = 0.591$	$C > X8 + X5$	非线性增强
居住用地	$X8 \cap X9(0.629)$	$X8 + X9 = 1.253$	$C > \text{Max}(X8, X9)$	双因子增强
	$X8 \cap X4(1)$	$X8 + X4 = 1.042$	$C > \text{Max}(X8, X4)$	双因子增强

1) C 表示  $XA \cap XB$  的值

### 2.5 富集因子及空间分布特征分析

以山西省土壤 Hg 背景值为参比值,以 Mn 为参比元素,对所有表层土壤样品 Hg 的 EF 进行计算,结果见图 5. 研究区  $\omega(\text{Mn})$  背景均值为  $577.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,相关变幅为  $458 \sim 793 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 研究区土壤 Hg 的 EF 均值为 14.37,相关变幅为  $0 \sim 82.06$ ,其污染程度主要以显著污染和强烈污染为主,占比分别为 64.86% 和 9.9%,极强污染占比为 7.2%. 研究区极强污染呈现出重点污染源分布特征,主要分布在河曲、偏关和神池的少数地区;强烈污染主要分布在河曲县的北部和东部区域、偏关县的西部和南部、神池县西部和东北区域、岢岚县的东南地区及宁武县的南部地区.

的工业企业;五寨县北部分布有大量的五金制造和塑胶制造等产业;宁武西南部同偏关县南部相似,分布有大量的煤炭采掘及深加工企业. 低值区则集中分布于人类活动较少的地区或以轻纺工业为主的区域.

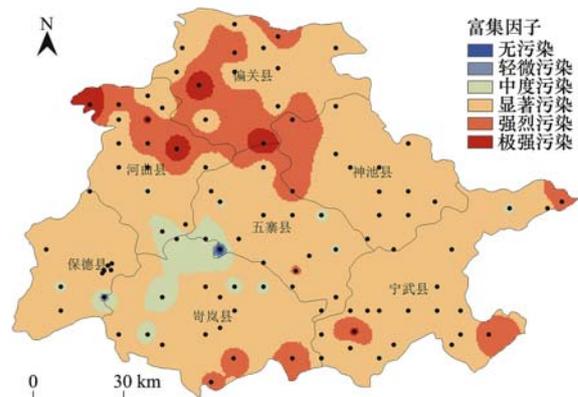


图 5 研究区土壤 Hg 污染程度

Fig. 5 Soil Hg pollution in the study area

对空间变量连续插值可以更直观查看分布特征,经 K-S 检验发现 Hg 含量符合对数正态分布,将其数据进行对数转化后进行普通克里金插值,将插值后的栅格图根据对数转换的逆变换公式回推,将插值结果转换到原始数据,结果如图 6,研究区 Hg 含量空间分布格局总体上表现为中部向南北两侧递增的趋势. 根据对地理位置及研究区范围内的重点企业进行分析,北部高值区及次高值区集中分布在河曲县、偏关县、五寨县和神池县的交汇地带,南部高值区集中分布在宁武县与岢岚县的交汇地区,低值区集中分布在研究区的西南部. 高值区主要分布在人类活动强烈的工矿区域及三废集中排放的区域,如偏关县南部分布有大规模的露天煤炭开采、采煤洗煤和煤化工企业,排放在环境中的 Hg 可以通过有机高分子形成配合物或螯合物,吸附在黏土矿物表面,经不同方式污染周边土壤;河曲县的北部集中了该地区的发电和水泥制造等污染较为严重

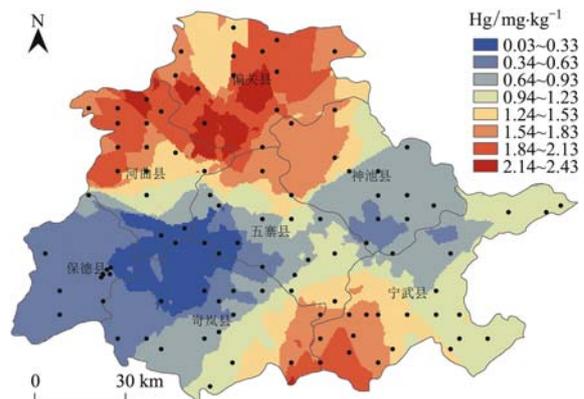


图 6 表层土壤 Hg 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of Hg in the soil surface layer

### 3 结论

(1) 研究区耕地、草地、林地和居住用地  $\omega(\text{Hg})$  范围分别为 0.09 ~ 2.43、0.03 ~ 2.15、0.03 ~ 1.48 和 0.14 ~ 2.03  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 变异系数大小为: 居住用地 > 耕地 > 草地 > 林地; 风险评价结果显示研究区属于受 Hg 污染较重或潜在生态危害风险较高的地区, 局部区域呈现为严重污染; 健康风险表征结果显示 Hg 对儿童和成人均不存在非致癌健康风险, 儿童的非致癌总风险评价指数的平均值及最大值均高于成人。

(2) 因子探测及交互作用探测结果显示: 耕地 Hg 含量的空间变异性主要受到工业生产和农业生产的影响; 草地 Hg 含量主要受到土壤有机质和 pH 值的影响; 林地 Hg 含量主要受到土壤盐分的影响; 居住用地 Hg 含量主要受到土壤盐分和有机质的影响, 各影响因子之间以非线性增强为主, 双因子增强为辅, 不存在减弱或独立的作用类型。

(3) 富集因子及空间分布特征结果显示: Hg 含量空间分布格局总体上表现为中部向南北两侧递增的趋势; 土壤 Hg 高值区主要受煤炭开采及工业生产等人类扰动因素所致。

#### 参考文献:

- [1] Song Y Y, Xue D Q, Dai L H, *et al.* Land cover change and eco-environmental quality response of different geomorphic units on the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Land*, 2020, **12**(1): 29-43.
- [2] 王佳宁, 薛东前, 马蓓蓓, 等. 黄土高原地区矿产资源型城市脆弱性及其人口响应[J]. *干旱区地理*, 2020, **43**(6): 1679-1690.  
Wang J N, Xue D Q, MA B B, *et al.* Vulnerability and population response of mineral resource-based cities in the Loess Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2020, **43**(6): 1679-1690.
- [3] 李德山, 赵颖文, 李琳璞. 煤炭资源型城市环境效率及其环境生产率变动分析——基于山西省 11 个地级市面板数据[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(3): 618-633.  
Li D S, Zhao Y W, Li L Y. Change of environmental efficiency and environmental productivity of coal cities: based on panel data of 11 cities in Shanxi Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(3): 618-633.
- [4] 唐倩, 王金满, 荆肇睿. 煤炭资源型城市生态脆弱性研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, **36**(7): 825-832.  
Tang Q, Wang J M, Jing Z R. Ecological vulnerability of mining resource-based cities: a review[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, **36**(7): 825-832.
- [5] 曹雪莹, 张莎娜, 谭长银, 等. 中南大型有色金属冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征研究[J]. *土壤*, 2015, **47**(1): 94-99.  
Cao X Y, Zhang S N, Tan C Y, *et al.* Heavy metal contamination characteristics in soils around a nonferrous metal smelter in central Southern China[J]. *Soils*, 2015, **47**(1): 94-99.
- [6] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2020, **47**(6): 1625-1636.  
Bao L R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 2020, **47**(6): 1625-1636.
- [7] 邓海, 王锐, 严明书, 等. 矿区周边农田土壤重金属污染风险评价[J]. *环境化学*, 2021, **40**(4): 1127-1137.  
Deng H, Wang R, Yan M S, *et al.* Risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil around mining area[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(4): 1127-1137.
- [8] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 3018-3027.  
Wang R, Deng H, Jia Z M, *et al.* Spatial distribution characteristics, pollution, and ecological risk assessment of soil heavy metals around mercury mining areas[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 3018-3027.
- [9] Wang Z J, Zhang G, Chen X B, *et al.* Measurement and scaling of mercury on soil and air in a historical artisanal gold mining area in Northeastern China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, **29**(2): 245-257.
- [10] 林苒, 梁文静, 焦旸, 等. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2021, **48**(3): 749-763.  
Lin J, Liang W J, Jiao Y, *et al.* Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 2021, **48**(3): 749-763.
- [11] Zhao R, Guan Q Y, Luo H P, *et al.* Fuzzy synthetic evaluation and health risk assessment quantification of heavy metals in Zhangye agricultural soil from the perspective of sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134126.
- [12] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 淮东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1938-1945.  
Liu W, Yang J J, Wang J, *et al.* Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of east Junggar Basin in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1938-1945.
- [13] 周勤利, 王学东, 李志涛, 等. 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, **36**(4): 513-521.  
Zhou Q L, Wang X D, Li Z T, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan county of Ningxia, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, **36**(4): 513-521.
- [14] 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 等. 南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 909-916.  
Chen J L, Li R Y, Xie X J, *et al.* Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in greenbelt soils of Nanjing City[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 909-916.
- [15] 石占飞, 王力. 神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(6): 1150-1158.  
Shi Z F, Wang L. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(6): 1150-1158.
- [16] 刘智峰, 呼世斌, 宋凤敏, 等. 陕西某铅锌冶炼区土壤重金

- 属污染特征与形态分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(4): 818-826.
- Liu Z F, Hu S B, Song F M, *et al.* Pollution characteristics and speciation analysis of heavy metals in soils around a lead-zinc smelter area in Shaanxi Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(4): 818-826.
- [17] 傅鹏, 王飞, 马秀平, 等. 沁河沉积物重金属垂直分布特征与风险评价[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(2): 305-312.
- Fu P, Wang F, Ma X P, *et al.* Vertical distribution of heavy metals in sediments of Qinhe River and its risk assessment[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, **19**(2): 305-312.
- [18] 赵斌, 朱四喜, 李相兴, 等. 贵州草海不同土地利用方式表层土壤重金属污染现状评估[J]. 环境化学, 2018, **37**(10): 2219-2229.
- Zhao B, Zhu S X, Li X X, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in the surface soils of different land use patterns in Caohai, Guizhou [J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(10): 2219-2229.
- [19] 李清良, 吴倩, 高进波, 等. 基于小流域尺度的土壤重金属分布与土地利用相关性研究——以厦门市坂头水库流域为例[J]. 生态学报, 2015, **35**(16): 5486-5494.
- Li Q L, Wu Q, Gao J B, *et al.* Distribution of heavy metals in topsoils affected by land use patterns at a small watershed scale: a case study in the Bantou Reservoir watershed in Xiamen, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(16): 5486-5494.
- [20] 易昊旻, 周生路, 吴绍华, 等. 基于正态模糊数的区域土壤重金属污染综合评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(4): 1127-1134.
- Yi H M, Zhou S L, Wu S H, *et al.* An integrated assessment for regional heavy metal contamination in soil based on normal fuzzy number[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(4): 1127-1134.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 韩平, 王纪华, 冯晓元, 等. 北京顺义区土壤重金属污染生态风险评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(1): 103-109.
- Han P, Wang J H, Feng X Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals in soils in Shunyi, Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, **34**(1): 103-109.
- [23] 国家环境保护局, 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.
- [24] 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.
- [25] 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 等. 保定地区PM<sub>2.5</sub>中重金属元素的污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 38-44.
- Lei W K, Li X R, Zhang L, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> collected in Baoding[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 38-44.
- [26] 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.
- [27] 陈艺, 蔡海生, 曾君乔, 等. 袁州区表层土壤重金属污染特征及潜在生态风险来源的地理探测[J]. 环境化学, 2021, **40**(4): 1112-1126.
- Chen Y, Cai H S, Zeng J Q, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in surface soil and geographical detection of potential ecological risk sources in Yuanzhou District [J]. Environmental Chemistry, 2021, **40**(4): 1112-1126.
- [28] 郝建秀, 任珺, 陶玲, 等. 黄河底泥重金属空间分异影响因素与源解析研究[J]. 安全与环境学报, 2022, **22**(2): 1084-1093.
- Hao J X, Ren J, Tao L, *et al.* Research on influence factors and source apportionment of spatial differentiation of heavy metals in Yellow River sediment[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, **22**(2): 1084-1093.
- [29] 张鸣, 温汉辉, 蔡立梅, 等. 韩江三角洲典型地区表层土壤汞的分布特征[J]. 环境化学, 2020, **39**(7): 1860-1871.
- Zhang M, Wen H H, Cai L M, *et al.* Distribution characteristics of surface soil mercury in typical area of the Hanjiang Delta, Guangdong, China [J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(7): 1860-1871.
- [30] 范晓婷, 蒋艳雪, 崔斌, 等. 富集因子法中参比元素的选取方法——以元江底泥中重金属污染评价为例[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(10): 3795-3803.
- Fan X T, Jiang Y X, Cui B, *et al.* Selection of a reference element for enrichment factor: a case study on the pollution evaluation of heavy metals in the sediment of Yuan River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(10): 3795-3803.
- [31] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, **39**(6): 611-627.
- [32] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [33] GB 36600-2018, 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [34] 魏洪斌, 罗明, 吴克宁, 等. 长江三角洲典型县域耕地土壤重金属污染生态风险评估[J]. 农业机械学报, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
- Wei H B, Luo M, Wu K N, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metal pollution in cultivated soil at typical county level in Yangtze River Delta [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, **52**(11): 200-209, 332.
- [35] 杨安, 邢文聪, 王小霞, 等. 西藏中部河流、湖泊表层沉积物及其周边土壤重金属来源解析及风险评价[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(10): 4557-4567.
- Yang A, Xing W C, Wang X X, *et al.* Source and risk assessment of heavy metals in surface sediments of rivers, lakes and their surrounding soils in central Tibet [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(10): 4557-4567.

## CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China .....	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method .....	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Xiamen Port .....	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM <sub>2.5</sub> Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter .....	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan .....	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area .....	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 .....	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain .....	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze .....	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors .....	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region .....	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake .....	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake .....	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River .....	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff .....	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems .....	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin .....	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water .....	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing .....	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition .....	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment .....	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> .....	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors .....	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater .....	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge .....	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 .....	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years .....	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt .....	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area .....	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area .....	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China .....	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility .....	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan .....	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems .....	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas .....	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas .....	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils .....	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)