

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

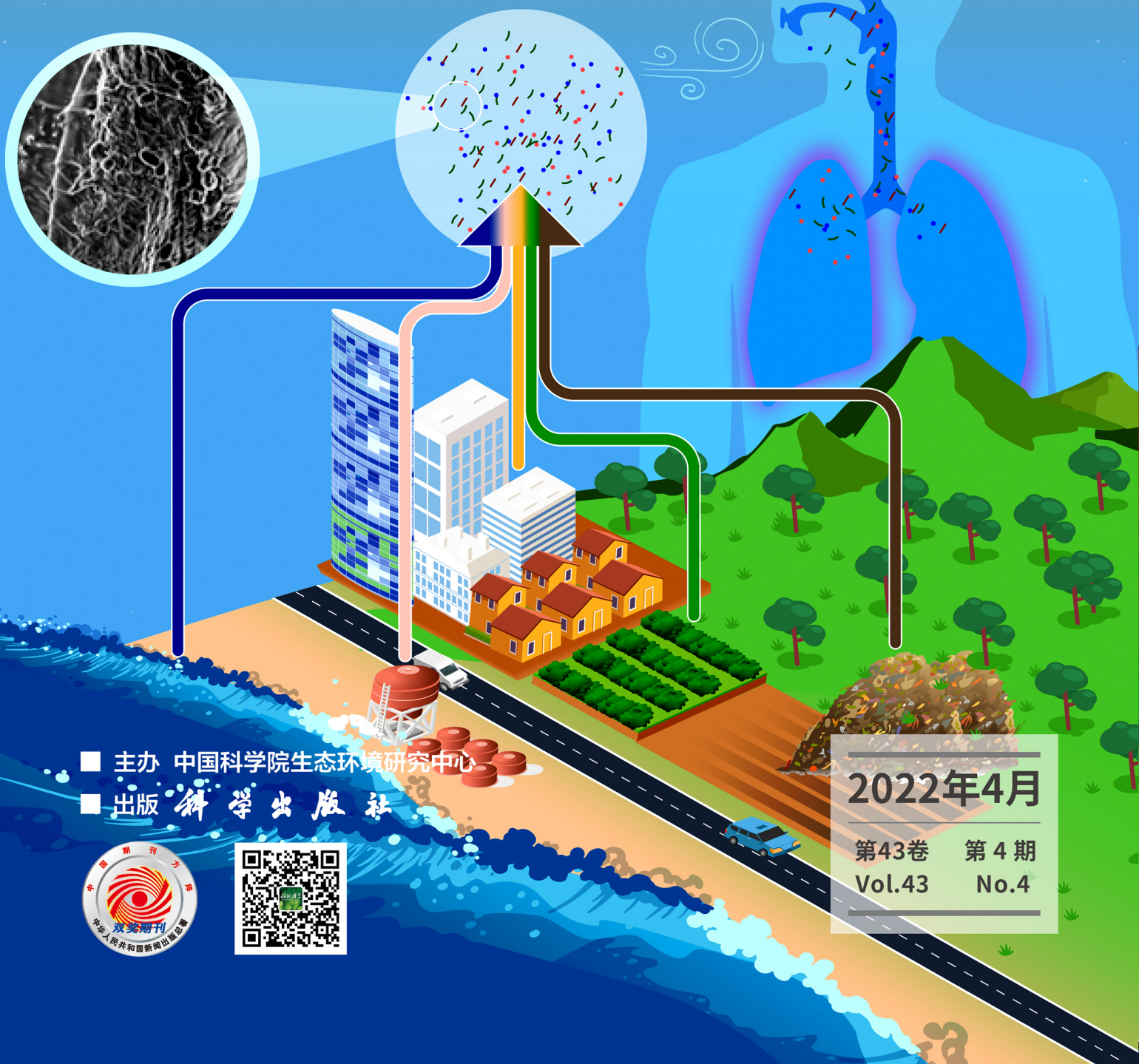
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价

王海洋¹, 韩玲^{1,2*}, 谢丹妮^{1,2}, 胡慧娟¹, 刘志恒³, 王祯¹

(1. 长安大学土地工程学院, 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710075; 3. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710064)

摘要: 为探索潼关矿区周边农田土壤重金属的空间分布及其生态风险, 于2020年9月采集了潼关矿区周边的地表土壤样本, 分析了样本中Pb、Cu、Cd、Hg、Cr、Ni、Zn和As这8种重金属元素的含量和分布特征, 利用内梅罗综合污染指数和潜在生态风险指数评价了土壤污染程度。结果表明, 该地区8种重金属元素的含量均超标, 超标率分别为97.91%、84.79%、100%、95.41%、96.87%、98.54%、91.45%和28.95%。8种重金属元素的变异系数大小为: Hg > Pb > Cu > Cd > Zn > As > Ni > Cr, 其中Hg、Pb、Cu、Cd和Zn的变异系数均大于1, 相关性分析表明这5种重金属相关性明显; 在空间分布上, 土壤重金属中Pb、Cd、Cu、Hg、Zn和As这6种元素呈斑块状分布, Cr和Ni呈片状分布, Hg、Cd、Pb、Cu和Zn这5种重金属元素的高值主要分布在研究区南部和中部; 内梅罗综合污染指数显示重度污染率达到87.91%, 中度污染率和轻度污染率分别为9.58%和2.5%, 因此整体处于重度污染。潜在生态风险指数显示Hg、Cd、Pb和Cu为主要风险元素, 总的潜在生态风险指数显示达到强污染的样点比率为97.08%, 其中极强、很强和强污染的样点占比分别为55.63%、27.08%和14.37%, 表明研究区潜在生态风险总体很强。综合两种污染评价方法可知潼关县矿区周边重金属污染严重, 主要造成污染的重金属为Hg、Cd和Pb。研究成果可为区域污染治理、土壤修复及生态保护提供数据支撑。建议未来应持续监测土壤重金属污染状态及其在不同介质中的形态转化。

关键词: 潼关矿区; 土壤重金属; 空间分布; 污染评价; 来源分析

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2104-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202106218

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment

WANG Hai-yang¹, HAN Ling^{1,2*}, XIE Dan-ni^{1,2}, HU Hui-juan¹, LIU Zhi-heng³, WANG Zhen¹

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710075, China; 3. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064)

Abstract: In order to explore the spatial distribution and ecological risk of heavy metals in farmland soil around Tongguan Mining area, surface soil samples from Tongguan Mining area were collected in September 2020, and the contents and distribution characteristics of eight heavy metals (Pb, Cu, Cd, Hg, Cr, Ni, Zn, and As) in the samples were analyzed. The Nemerow comprehensive pollution index and potential ecological risk index were used to evaluate soil pollution. The results showed that the contents of the eight types of heavy metal elements in this area exceeded the standard, and the exceeding rates were 97.91%, 84.79%, 100%, 95.41%, 96.87%, 98.54%, 91.45%, and 28.95%, respectively. The variation coefficients of the eight heavy metals were ranked as Hg > Pb > Cu > Cd > Zn > As > Ni > Cr. The variation coefficients of Hg, Pb, Cu, Cd, and Zn were all greater than 1. Correlation analysis showed that these five heavy metals were obviously correlated. In terms of spatial distribution, Pb, Cd, Cu, Hg, Zn, and As were distributed in patches, whereas Cr and Ni were distributed in flakes. The high values of Hg, Cd, Pb, Cu, and Zn were mainly distributed in the southern and central part of the study area. The comprehensive pollution of Nemerow showed that the severe pollution rate reached 87.91%, and the moderate pollution rate and the mild pollution rate were 9.58% and 2.5%, respectively; thus, the overall pollution was severe. The potential ecological risk index showed that Hg, Cd, Pb, and Cu were the main risk elements. The total potential ecological risk index showed that the proportion of samples with strong pollution was 97.08%, and the proportion of extremely strongly, very strongly, and strongly polluted samples were 55.63%, 27.08%, and 14.37%, respectively, indicating that the overall potential ecological risk in the study area was very strong. Combining the two pollution assessment methods, it can be seen that the heavy metal pollution around Tongguan mining area, primarily by Hg, Cd, and Pb, was serious. These results can provide data support for regional pollution control, soil remediation, and ecological protection. It is suggested that the state of soil heavy metal pollution and its transformation in various media should be monitored continuously in the future.

Key words: Tongguan mining area; soil heavy metal; spatial distribution; pollution assessment; source analysis

土壤是人类生存和发展最重要的生态系统之一, 同时也是人们进行农业生产活动的重要资源, 土壤安全是国家粮食安全和人类健康的根本保障^[1]。随着工业和城市化的快速发展, 土壤重金属污染已成为严重的环境问题^[2]。联合国环境规划署已将Pb、Cu、Cd、Hg、Cr、Ni、Zn和As这8种重金属列为优先控制污染物^[3]。国内外学者从不同土地利用类型^[4,5]和不同尺度^[6,7]针对土壤重金属的分布特征^[8,9]、风险评价^[10~12]和来源分析^[13,14]等方面开

展了研究。土壤中重金属累积主要是采矿业、工业和农业等人类活动的结果。其中, 采矿被认为是重金属污染的最重要因素之一^[15]。矿山开采及矿石冶炼过程中, 大量重金属会伴随尾矿渣、冶炼废水和废

收稿日期: 2021-06-27; 修订日期: 2021-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(4217011013); 中央高校基本科研业务费项目(300102351401)

作者简介: 王海洋(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤风险评价与污染防治, 3S集成与应用, E-mail: 457532761@qq.com

* 通信作者, E-mail: hanling@chd.edu.cn

气通过雨水淋溶渗透、污水灌溉以及大气降尘等方式进入土壤^[16]。然而,由于耕地稀缺,受重金属污染的土壤仍用于农业生产^[17]。

近年来,有研究表明采矿活动造成土壤重金属污染^[18],在世界许多地方,采矿活动产生的重金属引起了严重的环境问题,特别是它们污染了周边的农田^[19]。全球各地对采矿造成的重金属污染土壤的关注和研究日益增加。例如:Redwan 等^[20]的研究对埃及东部沙漠巴拉米亚金矿区的环境进行评价,发现该地区有 318 ~ 500 t 尾矿,这些尾矿由于侵蚀、风化和地表径流对周围环境构成严重的重金属污染。Akoto 等^[21]的研究对加纳矿区不同固体矿山废物的重金属进行分析,发现生态风险的程度随废物类型的不同而不同:尾矿 > 硫化物 > 氧化物。Yun 等^[22]的研究对韩国某废弃金矿附近的农田重金属进行研究,发现农田类型对土壤重金属的空间分布会产生影响。用来评价重金属污染状况的方法最常用的有单因子指数法、内梅罗综合污染指数法、富集因子法、潜在生态风险指数法和地累积指数法等^[23 ~ 25]。

潼关县位于黄河中游大拐弯处,在陕西省的最东部,有研究表明,黄河头道拐—潼关区间是黄河泥沙的主要来源区,2000 ~ 2017 年潼关站平均每年向黄河输送 2.02 亿 t 泥沙^[26]。同时潼关还是我国重要的金矿产地,工业储量超过了 100 t,是我国第二大

黄金产区。潼关矿区主要位于黄河沿岸以南,过去,由于矿业秩序混乱和乱采滥挖严重,矿区开采产生大量尾矿渣随意堆放,对生态环境造成严重污染^[27]。附近村民还采用小浮选、小氰化和小汞碾的“三小”提金法对尾矿渣进行二次提金,提金产生的废弃物直接倾倒加剧了矿区周边土壤的重金属污染程度^[28 ~ 30]。被污染的土壤可能会通过降水河流的方式排入黄河,对黄河生态环境造成危害。因此本文以潼关矿区周边土壤为研究对象,分析 Pb、Cu、Cd、Hg、Cr、Ni、Zn 和 As 这 8 种元素的含量和空间分布特征,探讨该地区重金属的污染来源,采用内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法对潼关矿区周边农田土壤重金属进行综合评价。通过对潼关矿区周边土壤环境质量的综合掌握,以期为黄河保护、区域污染治理、土壤修复和农产品安全及生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

为明确污染分布,本研究在采样前期运用系统布点法,利用地理信息系统技术和网格化方法使布样点均匀地分布在整個研究区。在采样过程中仔细考虑了可达性、安全性和研究区空间覆盖范围,并结合潼关矿区周边实际地形情况确定了 480 个采样点(图 1)。于 2020 年 9 月进行现场采样(天气晴朗的

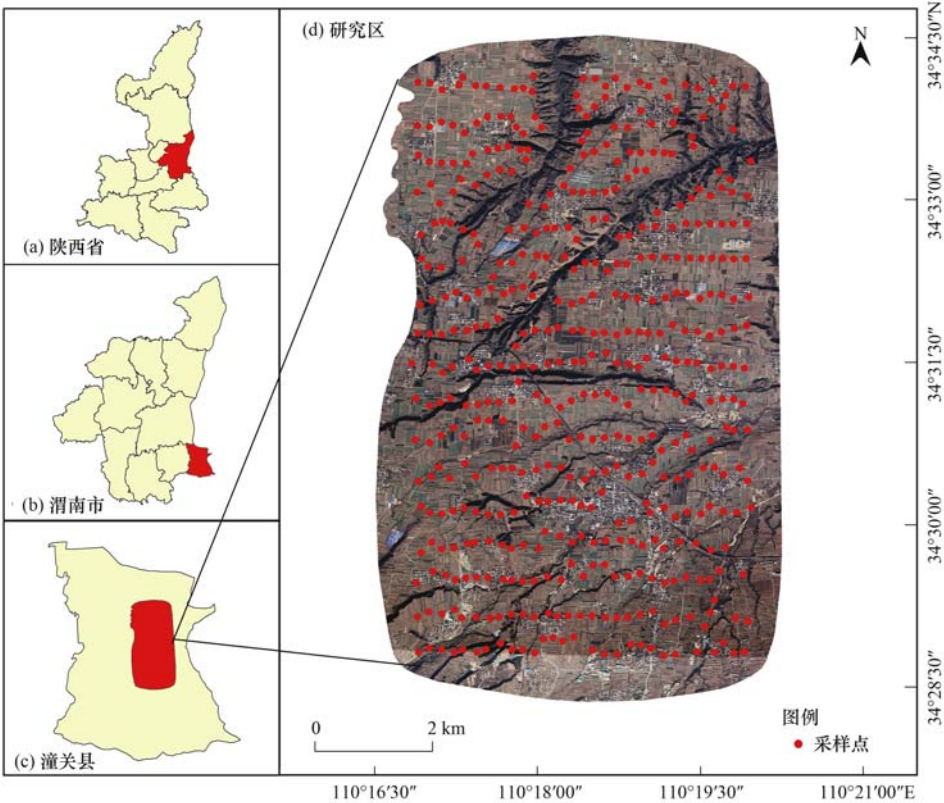


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in study areas

条件下),每个采样点在 2 m × 2 m 正方形方格的 4 个角及中心采集 5 个表层土壤样品. 每个样品都从 0 ~ 20 cm 厚的土层中收集,为最大化样品的代表性,将每个正方形中提取的 5 个样本现场混合成一个综合土壤样本,从样品中去除粗碎屑,每个综合样品的重量约 1 kg,用塑料棒压碎. 之后,样品用 1 mm 尼龙筛过滤,混合均匀,平放在塑料片上,进一步研磨,直到它们可以通过 0.15 mm 的尼龙筛,磨碎的样品密封在袋子里,带回实验室进行分析.

1.2 土壤样品测定

将过滤研磨好的土壤风干,在室温 25℃、相对湿度 50% 的条件下,对土壤中 8 种重金属元素含量进行测定. 其中 Pb、Cu、Cd、Cr、Ni 和 Zn 这 6 种重金属元素依据 GB/T 14506.30-2010 在电感耦合等离子体质谱仪 7700X 上进行测定. Hg 和 As 依据 DZ/T 0279.17-2016 在原子荧光光谱仪 AFS2202E 上进行检测^[31].

1.3 重金属污染评价

为确定矿区周边土壤重金属污染程度,分别采用内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法进行污染评价.

1.3.1 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合指数法是国内外学者最常用的评价方法. 该方法反映污染物对土壤的影响的同时突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影响. 其公式如下^[32]:

$$P_i = c_i / S_i \quad (1)$$

$$P_N = \sqrt{(P_{i\max}^2 + P_{iave}^2) / 2} \quad (2)$$

式中, P_i 为第 i 种重金属元素的污染指数, c_i 为第 i 种重金属元素的实测浓度, S_i 为重金属元素的评价标准, P_N 为内梅罗污染综合指数; $P_{i\max}$ 为 P_i 最大值; P_{iave} 为各个污染元素指数的平均值. 本研究选用潼关县农用地土壤重金属元素背景值作为评价标准^[33~35],根据内梅罗综合污染指数法,污染等级分为 5 级,等级分类可参考文献^[36].

1.3.2 土壤重金属潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法由瑞典学者 Hakanson^[37]于 1980 年提出,该方法根据土壤重金属性质及特点,既考虑污染物含量,还考虑了污染物毒性,可反映多种污染物的综合作用,将潜在生态风险程度进行定量划分,其计算公式如下^[38]:

$$P_i = c_i / c_n^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times P_i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (5)$$

式中, P_i 是第 i 种重金属污染参数, c_i 是第 i 种重金属的实测值; c_n^i 为潼关县农用地土壤重金属元素

背景值^[33~35], E_r^i 为第 i 种重金属潜在生态风险指数; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性响应参数; RI 为总潜在生态危害指数. 将 E_r^i 和 RI 分成 5 级(表 1). 重金属毒性系数为: Hg = 40、Cd = 30、Pb = Cu = Ni = 5、As = 10、Cr = 2、Zn = 1^[33].

表 1 Hakanson 潜在生态危害评价指标

重金属潜在生态危害指数 (E_r^i)	单项生态风险程度	多项生态危害指数 (RI)	总潜在生态危害指数
<40	轻微	<150	轻微
40 ~ 80	中	150 ~ 300	中
80 ~ 160	强	300 ~ 600	强
160 ~ 320	很强	600 ~ 1 200	很强
>320	极强	>1 200	极强

1.3.3 空间分析

使用克里金空间插值法对 480 个采样点的 8 种重金属浓度的空间分布趋势进行插值. 克里金法作为一种地质统计学插值方法,使用从样本属性计算的半变异函数对整个空间的空间变异性进行插值,该方法能量化采样点之间的空间自相关性,以确定样本数据之间的距离对插值属性值的作用^[39]. 克里金法由于其无偏特性和相对于其他方法在地质统计技术中的优势而得到广泛应用. 因此,克里金法被广泛应用于土壤重金属环境风险的空间分析^[40,41].

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2019 对土壤重金属含量、内梅罗综合污染指数、潜在生态风险指数进行统计和计算;利用 SPSS 23.0 对土壤重金属相关性和主成分进行统计与分析,相关性分析能了解重金属的来源以及途径是否关联^[42],Pearson(皮尔逊)相关检验用于揭示所含重金属之间的关系,主成分分析(PCA)常用于将许多指标简化为一组较小的综合指标,也用于土壤样品的分析;ArcGIS 10.2 用于制作研究区概况图和插值图来展示土壤采样点和重金属的分布.

2 结果与分析

2.1 潼关矿区周边土壤重金属含量状况

潼关矿区周边农田土壤重金属含量见表 2. 从中可知,土壤重金属平均值高于土壤背景值. $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Hg})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{As})$ 范围分别为 20.90 ~ 8 438、16.50 ~ 1 614、0.11 ~ 10.30、0.02 ~ 88.30、34.90 ~ 92.50、10.60 ~ 35.70、55.90 ~ 1 217.00 和 1.73 ~ 60.10 mg·kg⁻¹,中位数为 164.50、37.15、0.612、1.61、63.30、28.30、83.70 和 10.80 mg·kg⁻¹,平均

值分别为 496.07、85.39、0.99、4.61、63.24、28.08、125.18 和 11.21 mg·kg⁻¹。480 个点均有元素超过土壤背景值,污染最明显的是 Pb、Cu、Cd 和 Hg 这 4 种元素。其中 Cd 全部超标,样本超标率达到 100.00%,Pb、Cu 和 Hg 超过背景值的点数分别为 470、407 和 458 个,样本超标率分别为 97.91%、84.79% 和 95.41%。其他 4 种元素也均有不同程度超标,这些结果表明,潼关矿区农田土壤中的重金属具有一定程度的富集。

8 种重金属元素的变异系数大小为: Hg > Pb > Cu > Cd > Zn > As > Ni > Cr,其中 Cr 和 Ni 的变异系数都小于 0.1,表明 Cr 和 Ni 在潼关农田土壤的分布比较均匀并且受外界环境影响较小。As 的变异系数为 0.36,属于中等变异。Pb、Cu、Hg、Cd 和 Zn 的变异系数都大于 1,均呈强度变异,数据结果表明这 5 种重金属的离散程度高,在不同点位的重金属含量差异大,说明研究区重金属含量受人为等随机性因素影响的作用明显^[43]。

表 2 研究区表层土壤重金属含量描述 (n = 480)

Table 2 Characteristic description of heavy metal content in topsoil of the study area (n = 480)						
元素	含量范围 /mg·kg ⁻¹	中位数 /mg·kg ⁻¹	平均值 ± 标准差 /mg·kg ⁻¹	变异系数	土壤背景值 /mg·kg ⁻¹	超率 /%
Pb	20.90 ~ 8 438.00	164.50	496.07 ± 982.55	1.98	29.40	97.91
Cu	16.50 ~ 1 614.00	37.15	85.39 ± 142.55	1.70	22.50	84.79
Cd	0.11 ~ 10.30	0.61	0.99 ± 1.20	1.21	0.08	100
Hg	0.02 ~ 88.30	1.61	4.61 ± 9.49	2.06	0.18	95.41
Cr	34.90 ~ 92.50	63.30	63.24 ± 4.89	0.08	55.50	96.87
Ni	10.60 ~ 35.70	28.30	28.08 ± 2.43	0.09	20.95	98.54
Zn	55.90 ~ 1217.00	83.70	125.18 ± 126.42	1.01	64.50	91.45
As	1.73 ~ 60.10	10.80	11.21 ± 4.14	0.37	11.10	28.95

2.2 土壤重金属空间分布特征

根据克里金插值法绘制潼关各采样点重金属含量空间分布,结果如图 2 所示。从中可知,研究区土壤重金属中 Pb、Cd、Cu、Hg、Zn 和 As 这 6 种元素呈斑块状富集,Cr 和 Ni 呈片状富集。重金属含量高值区域整体上集中在研究区的南部。Pb 含量高值区域主要集中在研究区南部,中部以及东北部,这与 Cu、Hg 和 Zn 的分布规律相似,均呈斑块状分布。Cd 含量高值集中在整个南部,相比 Pb、Cu、Hg 和 Zn,在南部的分布范围更广,而 Cd 的最高值分布也与 Pb 和 Hg 元素的高值分布重合。As 的含量高值出现在研究区的东部,呈斑状分布。Cr 和 Ni 的元素分布整体呈片状,结合变异系数很小可知 Cr 和 Ni 受人类等随机性因素影响较少。Pb、Cd、Cu、Hg 和 Zn 这 5 种元素在研究区南部含量较高,呈现出富集趋势,分布相关性明显,说明人类活动对重金属的富集产生较大的影响。

2.3 土壤中重金属污染的风险评估

使用内梅罗综合污染指数对研究区进行风险评

估。由表 3 和表 4 可知在 480 个重金属采样点中,单因子结果显示 Pb、Cu、Cd 和 Hg 污染明显,Pb 在整个研究区达到重度污染的采样点有 255 个,占总样点的 53.13%,Cd 有 92.08% 的采样点污染指数达到中度污染及以上,其中有 70.21% 的采样点达到重度污染。Hg 有 79.80% 的采样点达到中度污染及以上,其中达到重度污染的采样点占 66.88%。Pb、Cd 和 Hg 的污染等级整体呈重度污染。Cu 有 28.13% 的采样点达到中度污染及以上,有 11.88% 和 44.79% 的样点达到轻度污染和轻微污染。Cr、Ni、Zn 和 As 达到轻度污染及以上的样点数为 0,属于轻微污染的样点分别占 96.88%、98.54% 和 69.79%,Cr、Ni 和 Zn 主要为轻微污染。As 达到轻微污染和未污染的样点比率为 27.50% 和 71.04%。内梅罗综合污染指数显示达到重度污染的采样点有 422 个,重度污染率达到 87.92%,中度污染率和轻度污染率分别为 9.58% 和 2.50%,因此整体处于重度污染。

表 3 不同污染级别样点个数及在总样点个数中占比¹⁾ (n = 480)

项目	污染等级				
	$P_i > 5$ (重污染)	$3 < P_i \leq 5$ (中污染)	$2 < P_i \leq 3$ (轻污染)	$1 < P_i \leq 2$ (轻微污染)	$P_i \leq 1$ (无污染)
Pb	255 (53.13)	88 (18.33)	64 (13.33)	63 (13.13)	10 (2.08)
Cu	79 (16.46)	56 (11.67)	57 (11.88)	215 (44.79)	73 (15.21)
Cd	337 (70.21)	105 (21.88)	34 (7.08)	4 (0.83)	0 (0.00)
Hg	321 (66.88)	62 (12.92)	44 (9.17)	31 (6.46)	22 (4.58)
Cr	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	465 (96.88)	15 (3.12)
Ni	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	473 (98.54)	7 (1.46)
Zn	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	335 (69.79)	41 (8.54)
As	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	132 (27.50)	341 (71.04)

1) 括号外数值表示样点个数,括号内数值表示样点个数在总样点个数的占比 (%)

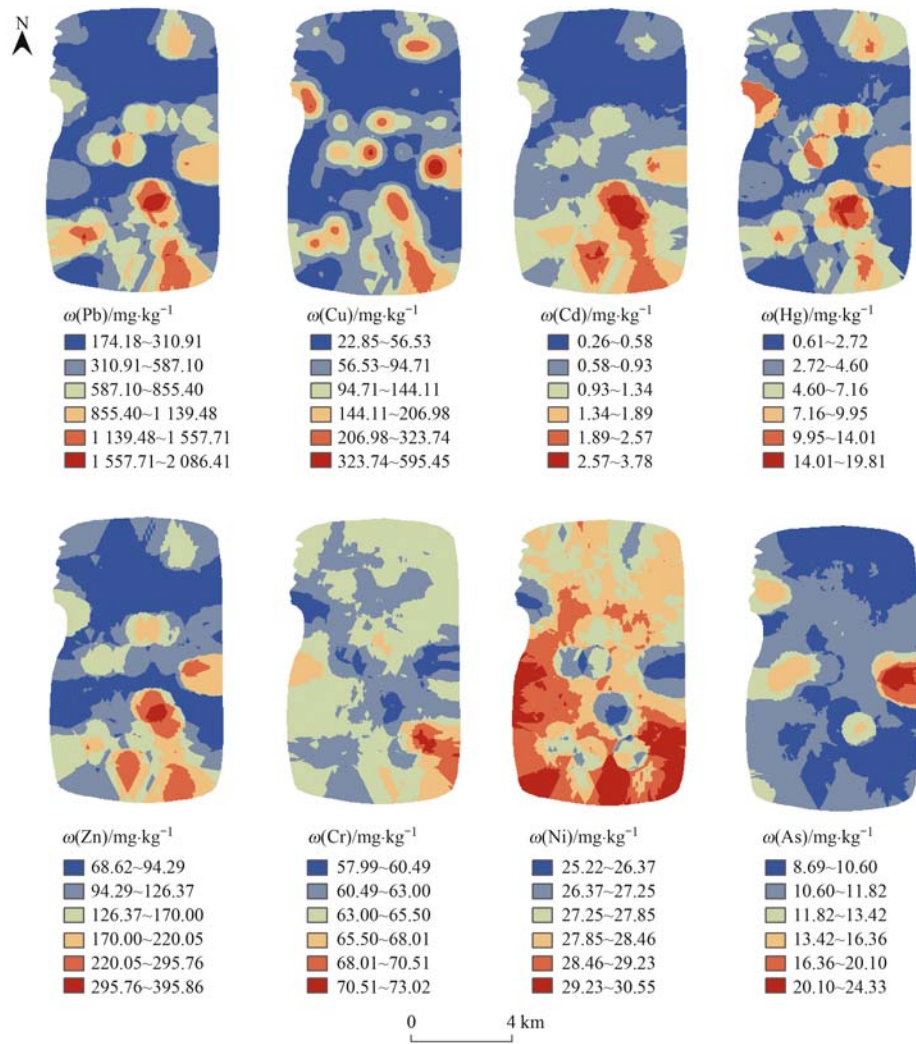


图2 研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil heavy metals in the study area

表4 内梅罗综合污染各等级样点个数及占比¹⁾ (n = 480)

Table 4 Number and percentage of samples of each grade of Nemerow comprehensive pollution (n = 480)

项目	$P_N > 3.0$ (重污染)	$2.0 < P_N \leq 3.0$ (中污染)	$1.0 < P_N \leq 2.0$ (轻污染)	$0.7 < P_N \leq 1.0$ (警戒)	$P_N \leq 0.7$ (未污染)
参数	422 (87.92)	46 (9.58)	12 (2.50)	0 (0.00)	0 (0.00)

1) 括号外数值表示样点个数, 括号内数值表示样点个数在总样点个数的占比 (%)

潜在生态风险评价结果见表5, 单项潜在生态风险指数表明, Hg 和 Cd 的生态风险评估为强的结果远远大于其他重金属. Hg 达到强污染及以上的样点比率为 88.95%, 其中极强污染的样点占比为 53.95%. Cd 达到强污染的样点比率为 95.62%, 其

中极强污染的样点比率为 35.83%. 因此, Hg 和 Cd 显然对潜在生态风险的评估结果有显著影响. Pb 达到强污染的样点占比 21.45%. Cu、As、Ni、Cr 和 Zn 的潜在风险指数明显低于 Hg 和 Cd, 但它们具有较低的潜在生态风险. 同时, 总的潜在生态风险指数

表5 研究区潜在生态风险指数各等级样点个数及占比¹⁾ (n = 480)

Table 5 Number and percentage of each grade of potential ecological risk index in the study area (n = 480)

污染等级	Pb	Cu	Cd	Hg	Cr	Ni	Zn	As	RI
极强	31 (6.45)	1 (0.21)	172 (35.83)	259 (53.95)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	267 (55.63)
很强	26 (5.41)	2 (0.42)	150 (31.25)	91 (18.95)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	130 (27.08)
强	46 (9.58)	21 (4.37)	137 (28.54)	77 (16.04)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	69 (14.37)
中等	64 (13.33)	28 (5.83)	21 (4.37)	31 (6.45)	0 (0.00)	0 (0.00)	0 (0.00)	2 (0.00)	14 (2.92)
轻微	313 (65.21)	428 (89.16)	0 (0.00)	22 (4.58)	480 (100)	480 (100)	480 (100)	478 (100)	0 (0.00)

1) 括号外数值表示样点个数, 括号内数值表示样点个数在总样点个数的占比 (%)

达到强污染的样点比率为 97.08%, 其中极强、很强和强污染的样点占比分别为 55.63%、27.08% 和 14.37%, 表明研究区潜在生态风险很强。

对 Pb、Cu、Cd 和 Hg 这 4 种重金属元素的潜在生态风险指数和总潜在生态风险指数依据克里金插值如图 3, 显示了研究区潜在生态风险水平的空间分布差异。依据潜在生态风险划分等级可将研究区污染情况分为 5 级。由图 3 可知 Hg、Cd 和 Pb 污染明显。Hg 整体为红色, 表明 Hg 的极高风险区几乎遍布整个研究区域。Cd 处于极强风险和很强风险,

Cd 在中部和南部风险更高, 向北低一些。另一方面, Pb 在研究区西北部和中部分地区风险水平中等, 靠近南部的部分地区风险水平为很强或强风险。Cu 整体处于轻微风险, 在南部和中部分也有些呈斑状分布的中风险区域。由于 Cr、Ni、Zn 和 As 的潜在生态风险指数等级均为轻微, 因此未插值。总潜在生态风险结果表明研究区大部分区域为极强潜在生态风险, 主要集中在南部, 中部和东北部, 这与主要重金属污染元素 Cd 和 Hg 的浓度分布相似。

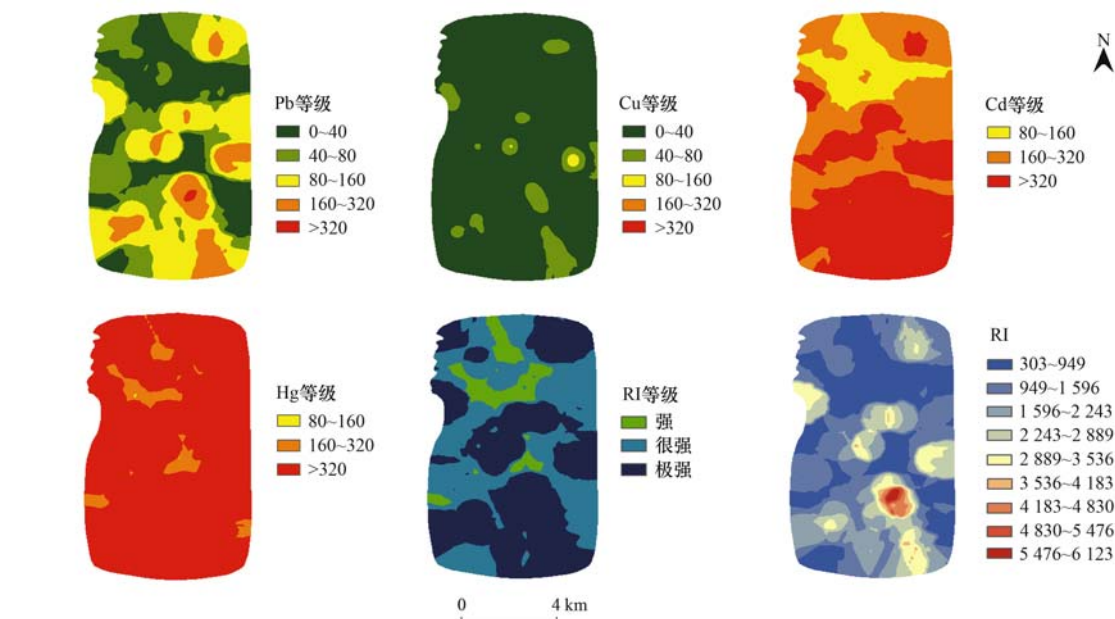


图 3 研究区潜在生态风险指数等级插值

Fig. 3 Interpolation plot of potential ecological risk index grade

2.4 潼关矿区周边土壤重金属相关性分析

重金属元素含量与土壤母质密切相关, 并直接受到人类活动的影响^[44]。重金属来源常用相关性分析来探究^[45], 不同元素之间如果存在显著正相关关系, 那么其来源于同一种物质或成因的可能性更大。对研究区 8 种重金属元素进行 Pearson 相关分析, 分析结果见表 6。土壤重金属相关分析显示 Pb、Cu、Cd、Hg 和 Zn 这 5 种元素两两之间具有统计显著的

正相关, 其中 Cd-Zn、Pb-Cu、Cu-Hg、Pb-Hg、Pb-Zn、Cu-Zn、Pb-Cd、Hg-Zn、Cu-Cd 和 Hg-Cd 之间的相关系数为 0.94、0.90、0.86、0.85、0.82、0.81、0.74、0.73、0.71 和 0.64, 达到显著正相关 ($P < 0.01$)。同时, Cr 只和 Ni 具有正相关, 相关系数为 0.67, 与其他 7 种元素均为负相关。As 与 Pb、Cu、Hg 和 Cd 存在相关性, 但相关性较低 (绝对值低于 0.3)。

表 6 研究区土壤重金属相关系数¹⁾

Table 6 Correlation coefficient of soil heavy metals in the study area								
	Pb	Cu	Cd	Hg	Cr	Ni	Zn	As
Pb	1							
Cu	0.907 **	1						
Cd	0.739 **	0.716 **	1					
Hg	0.850 **	0.864 **	0.644 **	1				
Cr	-0.399 **	-0.368 **	-0.301 **	-0.354 **	1			
Ni	-0.582 **	0.525 **	-0.488 **	-0.455 **	0.675 **	1		
Zn	0.819 **	0.813 **	0.940 **	0.736 **	-0.336 **	-0.551 **	1	
As	0.175 **	0.317 **	0.155 **	0.173 **	0.014	-0.023	0.220 **	1

1) ** 表示 $P < 0.01$, 在 0.01 水平上显著相关

2.5 潼关矿区周边土壤重金属主成分分析

主成分分析是辨识重金属元素之间关系和来源的一种常用手段^[46]. 首先进行 KMO 和巴特利球体检验,检验结果是 KMO 值为 0.815,因此对 8 种重金属元素做主成分分析. 结果如表 7 所示,主成分分析提取的两个因素可以解释数据中 76.22% 的总方差,其中,第一主成了解释了总方差的 61.02%. Pb、Cu、Zn、Hg 和 Cd 的负载量分别为 93.3%、92.6%、92.0%、86.7% 和 85.4%. 第二主成了解释了总方差的 15.2%,Cr 的负载量为 67.0%,Ni 和 As 在第二主成分也具有较高的负载量,分别为 52.6% 和 63.6%.

表 7 研究区土壤重金属主成分分析

Table 7 Principal component analysis of heavy metals in soils in the study area

元素	组成	
	第一主成分	第二主成分
Pb	0.933	0.061
Cu	0.926	0.185
Zn	0.920	0.139
Hg	0.867	0.122
Cd	0.854	0.122
Ni	-0.698	0.526
Cr	-0.529	0.670
As	0.244	0.636
特征值	4.880	1.220
贡献率/%	61.020	15.200
累积贡献率/%	61.020	76.220

3 讨论

从重金属含量水平来看,潼关矿区周边农田土壤中 Pb、Cu、Cd、Hg、Zn、Cr 和 Ni 的含量整体高于潼关土壤背景值(表 2),这和金属矿山废料中含有大量潜在的重金属元素有关. 在当前研究中,相对

于参考基质土壤,潼关矿区周边农田中检测到的高含量元素主要为 Hg、Cd、Pb 和 Cu,它们有更高的潜在风险指数和地累积指数. 历史上当地小混汞碾、小氰化池、小球磨提金极为盛行,冶炼产生的大量含重金属的废渣被随意处置. 这些作坊在提金过程中,由于对 Hg 的回收率低(51%~59%)^[47],大大助长了该区域 Hg 污染. 除了 Hg 外,金矿开采产生大量的尾矿中含有一定量的 Cd、Pb 和 Cu. 上述金属的氧化物和硫化物形式的有毒物质可能通过风化过程到陆地环境中,并对周围土壤构成严重的污染.

从空间分布来看,Hg、Pb、Cd、Cu 和 Zn 的高浓度采样点主要分布在中部和南部且呈斑块状分布,且高浓度土壤的分布均靠近村庄. 通过遥感影像和实地调研对研究区可能的金矿位置进行摸查,共在研究区发现 30 处污染源,其中有 26 处疑似矿污染区、2 处矿渣倾倒区和 2 处污染修复区. 将污染源分布与遥感影像地类和总的潜在生态风险指数插值相结合绘制图 4. 图 4(a)为地类,反映了村庄等建设用地与污染源的关系;图 4(b)为总的潜在生态风险插值,反映了污染源与土壤污染的关系. 结合实地土壤检测结果发现,重金属分布与村庄建设用地以及污染源分布有着密切的关系. 主要是因为小型的提金作坊大都分布在距离村庄不远或紧挨村庄的区域,由于过去监管不严,提金产生的大量矿渣及废弃物大都就地堆放或直接倾倒入黄土沟壑区,这可能是造成研究区中部以及北部高浓度重金属斑状分布的主要原因. 同时潼关矿区开采主要在研究区以南的秦岭山下分布,且南部有多处疑似矿污染区,这可能是造成研究区南部靠近矿区的地域整体重金属含量偏高的原因. Ni 和 Cr 分布无明显规律说明采矿及尾矿对 Ni 和 Cr 的影响较小. 图 4(a)中疑似矿

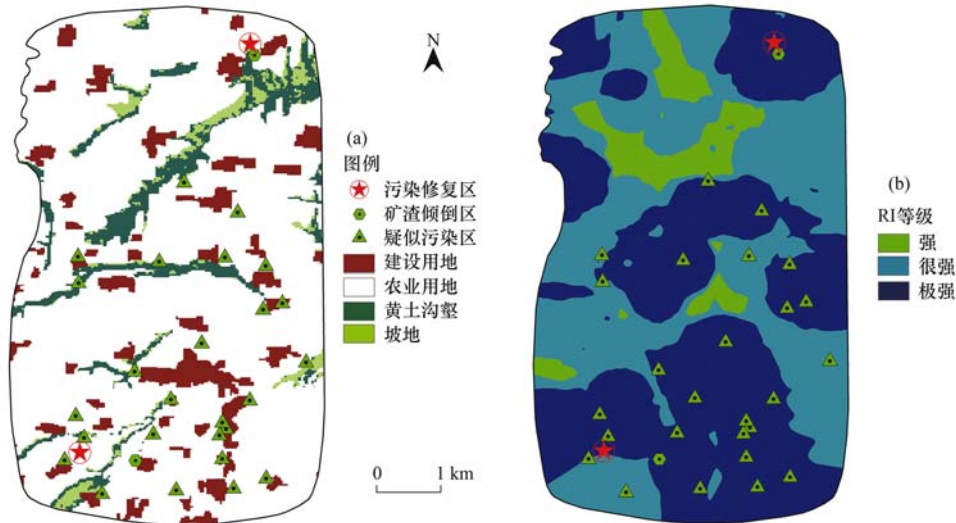


图 4 研究区污染源分布

Fig. 4 Distribution map of pollution sources in the study area

污染区主要包括尾矿、小型废弃矿、矿渣堆积区和矿石加工厂。2 处矿渣倾倒地是指该区域为黄土沟壑区,有明显矿渣倾倒地痕迹,且目前仍然堆积着矿渣。2 处污染修复区是指过去该地为疑似污染区,现在已经进行土地修复,经实地调查 2 处修复区在 2021 年 7 月已被绿植覆盖。

从重金属元素之间相关性分析及主成分分析结果来看,第一主成分的贡献率 61.02%,Pb、Hg、Cd、Cu 和 Zn 具有较高的因子载荷,分别为 0.93、0.87、0.85、0.93 和 0.92(图 5)。该地“三小”、手工金矿冶炼和尾矿渣是 Hg 的主要来源,黄金冶炼时会产生大量的 SO_2 和 Hg 蒸气,随大气降水或自然沉降进入矿区周边土壤,造成污染。Pb、Cd、Cu 和 Zn 也与采矿关系密切。一方面,矿山开采中岩石爆破和剥离过程中会产生大量含 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的矿物碎屑和粉尘,它们会直接沉降到矿山周边土壤中,造成污染;另一方面,选矿后的废水中也含有残留的重金属络合物和金属矿物,尾矿和废渣直接沉积在地面上,其中的重金属元素通过风化或地表径流和粉尘对土壤造成污染。元素和组成之间的关联系数反映了它们之间的接近程度。这种接近度随着一个系数的绝对值(载荷)而增加。结合主成分分析因子组件可知(图 5),Pb、Cu、Zn、Hg 和 Cd 在 PCA1 相关性明显,接近度更高;因此第一主成分主要反映采矿和尾矿造成的土壤污染,推测为人为因素。第二主成分的贡献率为 15.2%,Cr 和 Ni 在 PCA2 具有较高的因子载荷,分别为 0.67 和 0.52,相关性分析可知 Cr 和 Ni 相关性明显,接近度高;说明这两种元素大部分来自成土母质等自然来源,受采矿等人为因素影响小,因此推测其为自然源。如果单一某个元素在两个或者多个不同主成分上有相当大的载荷时,那么它由两个或多个来源引起的可能性更大。As 在第一主成分和第二主成分的载荷分别为 0.244 和 0.636,变异系数为 0.37,属中等变异,且 As 的空间分布有部分的高值与 Hg、Cd、Pb、Cu 和 Zn 的斑状高值重合,说明 As 受自然因素与人为因素共同影响的可能性更大,因此推测其应由人为和自然混合来源共同作用产生。综合以上分析,推断潼关矿区周边土壤中 8 种重金属的来源分别为:① Pb、Cu、Cd、Hg 和 Zn 为人为源;② Cr 和 Ni 为自然源;③ As 为混合源。

目前,潼关地区的生态风险依然是最值得关注的,潼关县矿区周边农田土壤重金属早在 1996 年就采取措施进行整治,从本世纪初至今,有学者对当地重金属以及造成的污染危害进行研究^[17,27~30,34,35],整体研究结果为该地区重金属富集明显,且污染均

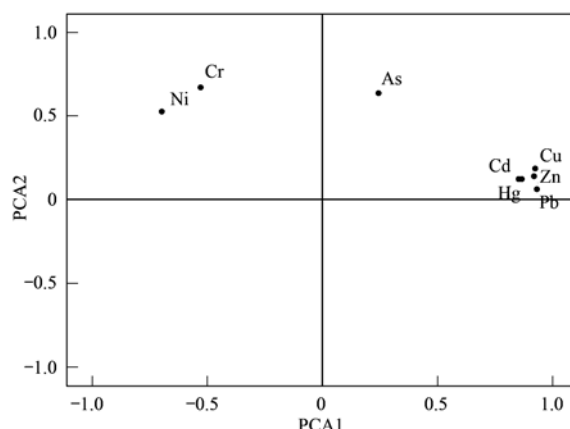


图 5 主成分分析 PCA1 和 PCA2 组件

Fig. 5 Principal component analysis of PCA1 and PCA2 component diagrams

与黄金提取有关。Wu 等^[48]研究了该地区居民头发和富集在农作物中的重金属,表明有重金属富集。林苒等^[33]的研究对该地区的健康风险做了最新的评价,表明矿区土壤重金属对儿童有明显非致癌风险。国家污染防治工程已经在当地开展多年,这对当地环境保护和污染治理起着积极的作用。需要注意的是,潼关矿区开发已久,北部为黄河,县内有 7 条河流最终流入黄河,河流以及降雨可能会造成尾矿和矿渣中重金属迁移到黄河,对黄河生态环境造成威胁。同时,研究区中部分居民的饮用水主要为地下水了。因此该地区由于金矿产生的重金属有多少被河流地表水带入黄河又有多少迁移到地下水并对人的健康造成影响,这些需要进一步做定量研究,并持续监测综合地去评价重金属对生态环境及人体健康的影响。

4 结论

(1)对比当地背景值,潼关矿区周边农田土壤中重金属含量均有所超出,内梅罗综合污染指数显示重度污染的采样点有 422 个,重度污染率达到 87.91%。潜在生态风险指数显示 Hg、Cd 和 Pb 达到强污染的样点比率为 88.95%、95.62% 和 21.45%,为主要污染元素,总潜在生态风险指数达到强污染样点比率为 97.08%,其中极强、很强和强污染的样点分别为 55.63%、27.08% 和 14.37%。

(2)在空间分布上,土壤重金属中 Pb、Cd、Cu、Hg、Zn 和 As 这 6 种元素呈斑块状富集,Cr 和 Ni 呈片状富集。Hg、Cd、Pb、Cu 和 Zn 这 5 种重金属元素的高值分布主要在研究区南部和中部。

(3)对 8 种元素进行 Pearson 相关分析,结果表明:Hg、Cd、Pb、Cu 和 As 这 5 种元素相互之间显著正相关。结合主成分分析可知,潼关矿区周边重金属

有3种主要来源:一是由于人类采矿尾矿影响所致的人为源;二是成土母质所导致的自然来源;三是采矿与成土母质相结合的混合源.其中Hg、Cd、Pb、Cu和Zn为人为源,Cr和Ni为自然源,As为混合源.

致谢:黄五超、黄勃学、韩星、崔禹和李慧慧参加野外土样采集,范拴喜老师为本文修改提出了宝贵的意见,在此深表感谢!

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] Jiang Y F, Chen S C, Hu B F, *et al.* A comprehensive framework for assessing the impact of potential agricultural pollution on grain security and human health in economically developed areas[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114653.
- [3] 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.
- [4] Gu Y G, Lin Q, Gao Y P. Reprint of: Metals in exposed-lawn soils from 18 urban parks and its human health implications in southern China's largest city, Guangzhou[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **163**(S1): S164-S171.
- [5] Sun T, Huang J L, Wu Y Y, *et al.* Risk assessment and source apportionment of soil heavy metals under different land use in a typical estuary alluvial island [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(13), doi: 10.3390/ijerph17134841.
- [6] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al.* Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **512-513**: 143-153.
- [7] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(3): 410-418.
- [8] Shi T R, Wang Y H. Heavy metals in indoor dust: Spatial distribution, influencing factors, and potential health risks[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **755**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142367.
- [9] 王蕊,陈楠,张二喜,等.龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1114-1122.
Wang R, Chen N, Zhang E X, *et al.* Geochemical patterns and source analysis of soil heavy metals in an iron and manganese ore area of Longyan City[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1114-1122.
- [10] 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.
- [11] Ba Tran Q, Lohitnavy M, Phenrat T. Assessing potential hydrogen cyanide exposure from cyanide-contaminated mine tailing management practices in Thailand's gold mining [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **249**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109357.
- [12] 韩琳,徐夕博.基于PMF模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5114-5124.
Han L, Xu X B. Quantitative evaluation of human health risk of heavy metals in soils based on positive matrix factorization model and geo-statistics[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5114-5124.
- [13] 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.
- [14] 张军,梁青芳,高煜.宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4504-4513.
Zhang J, Liang Q F, Gao Y. Spatial distribution and pollution characteristics of heavy metals in plant leaves in Baoji City[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4504-4513.
- [15] Liu R P, Xu Y N, Zhang J H, *et al.* Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaoqinling Gold Belt, China[J]. *China Geology*, 2020, **3**(3): 402-410.
- [16] Zhuang P, Lu H P, Li Z A, *et al.* Multiple exposure and effects assessment of heavy metals in the population near mining area in south China [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0094484.
- [17] 王爽,李荣华,张增强,等.陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(9): 2313-2320.
Wang S, Li R H, Zhang Z Q, *et al.* Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(9): 2313-2320.
- [18] 赵靓,梁云平,陈倩,等.中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
Zhao L, Liang Y P, Chen Q, *et al.* Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in north China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5552-5561.
- [19] 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.
- [20] Redwan M, Bamoussa A O. Characterization and environmental impact assessment of gold mine tailings in arid regions: a case study of Barramiya gold mine area, Eastern Desert, Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, **160**, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103644.
- [21] Akoto R, Anning A K. Heavy metal enrichment and potential ecological risks from different solid mine wastes at a mine site in Ghana[J]. *Environmental Advances*, 2021, **3**, doi: 10.1016/j.envadv.2020.100028.
- [22] Yun S W, Kim D H, Kang D H, *et al.* Effect of farmland type on the transport and spatial distribution of metal (loid) s in agricultural lands near an abandoned gold mine site: Confirmation of previous observations[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, **181**: 129-137.

- [23] 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.
- [24] 孙变变, 赵银鑫, 常丹, 等. 银川市城市绿地土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(6): 262-268, 277.
- Sun B B, Zhao Y X, Chang D, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in green spaces of Yinchuan city[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(6): 262-268, 277.
- [25] 张俊辉, 林青, 姜珊, 等. 宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 978-986.
- Zhang J H, Lin Q, Jiang S, *et al.* Analysis of heavy metal pollution and ecological risk assessment on vegetation leaves in Baoji city[J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 978-986.
- [26] 高海东, 吴翌. 黄河头道拐—潼关区间植被恢复及其对水沙过程影响[J]. 地理学报, 2021, **76**(5): 1206-1217.
- Gao H D, Wu Z. Vegetation restoration and its effect on runoff and sediment processes in the Toudaoguai-Tongguan section of the Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, **76**(5): 1206-1217.
- [27] 徐艳, 王曙光, 郭振, 等. 主成分分析在矿区农田土壤污染分析中的应用[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(S2): 9-13.
- Xu Y, Wang S G, Guo Z, *et al.* Application of principal component analysis method in heavy metal contaminated soil in mining area[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(S2): 9-13.
- [28] 王姣, 肖然, 李荣华, 等. 陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3888-3896.
- Wang J, Xiao R, Li R H, *et al.* Application potential and assessment of metallurgical contaminated soil after remediation in Tongguan of Shaanxi[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3888-3896.
- [29] 张开军, 魏迎春, 徐友宁. 小秦岭金矿区土壤重金属生物有效性影响因素[J]. 地质通报, 2014, **33**(8): 1182-1187.
- Zhang K J, Wei Y C, Xu Y N. Analysis of bioavailability and affecting factors of heavy metals in the soils over Xiaolingling gold mining region[J]. Geological Bulletin of China, 2014, **33**(8): 1182-1187.
- [30] 庞喆, 王启龙. 潼关矿区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2019, **4**(7): 45-51.
- Pang Z, Wang Q L. Potential ecological risk assessment of soil heavy metal pollution in Tongguan Mining area[J]. Land Development and Engineering Research, 2019, **4**(7): 45-51.
- [31] 韩玲, 宁昱铭, 刘志恒. 宝鸡北部黄土覆盖区耕地土壤重金属污染特征及评价[J]. 江西农业学报, 2018, **30**(11): 86-93.
- Han L, Ning Y M, Liu Z H. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in arable soil of loess covered area in northern Baoji[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, **30**(11): 86-93.
- [32] 胡梦珺, 李春艳, 李娜娜, 等. 基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2457-2468.
- Hu M J, Li C Y, Li N N, *et al.* Using the matter-element extension model to assess heavy metal pollution in topsoil in parks in the main district park of Lanzhou city[J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2457-2468.
- [33] 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.
- [34] 胡明. 大荔县农田土壤重金属分布特征与污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(1): 79-84.
- Hu M. Distribution characteristics and pollution assessment for the farmland soil heavy metals in Dali county[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, **28**(1): 79-84.
- [35] 柯海玲. 陕西潼关金矿区土壤重金属环境地球化学特征及污染评价[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [36] 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.
- [37] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [38] 张夏, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5288-5294.
- Zhang X, Liu B, Xiao B L, *et al.* Pollution characteristics and assessment of heavy metals in atmospheric deposition in core urban areas, Chongqing[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5288-5294.
- [39] 莫跃爽, 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.
- [40] 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.
- [41] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [42] 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.
- [43] 阿卜杜萨拉木·阿布都加帕尔, 王宏卫, 杨胜天, 等. 淮东地区土壤重金属污染特征及来源分析[J]. 中国矿业, 2019, **28**(11): 168-174.
- Abdusalam A, Wang H W, Yang S T, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of soil heavy metals in east Junggar region[J]. China Mining Magazine, 2019, **28**(11): 168-174.

- 168-174.
- [44] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- Chen Y L, Weng L P, Ma J, *et al.* Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(10): 2219-2238.
- [45] 谢龙涛, 潘剑君, 白浩然, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及污染评价——以南京市江宁区某乡镇为例[J]. 土壤学报, 2020, **57**(2): 316-325.
- Xie L T, Pan J J, Bai H R, *et al.* GIS-based spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soils; a case study of a town of Jiangning, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(2): 316-325.
- [46] 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.
- [47] Xiao R, Wang S, Li R H, *et al.* Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **141**: 17-24.
- [48] Wu Y G, Xu Y N, Zhang J H, *et al.* Evaluation of ecological risk and primary empirical research on heavy metals in polluted soil over Xiaoginling gold mining region, Shaanxi, China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, **20**(4): 688-694.

环境科学

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)