

目 次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于 LEAP 模型的工业园区碳达峰路径: 以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析: 以北京 A 高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率: 来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季 PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物 PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀 PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区 VOCs 污染特征及健康风险评估案例: 高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤峰 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP 和 XGBoost 的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祺琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估

魏洪斌^{1,2,3}, 罗明², 向垒⁴, 查理思⁵

(1. 安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室, 淮南 232001; 2. 自然资源部国土整治中心(自然资源部土地科技创新中心)/自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 3. 自然资源部南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心, 南宁 530028; 4. 暨南大学生命科学技术学院, 广州 510632; 5. 广东财经大学公共管理学院, 广州 510320)

摘要: 为探明金属矿区周边农田土壤与农作物重金属污染特征与人体健康风险, 通过对矿区周边农田土壤和农作物进行样品采集并分析测定其Cd、Pb和As等重金属含量, 采用地累积指数法、富集系数法和综合潜在生态风险指数法, 研究土壤和农作物重金属的污染特征与综合潜在生态风险, 采用蒙特卡罗模拟法进行土壤和农作物重金属的健康风险评估。结果表明, 凉桥村土壤重金属污染主要是Cd、As和Pb, 分别有100%、100%和75%以上土壤样品超过农田土壤筛选值(GB 15618-2018), 农作物中Cd、Pb、As、Cr和Ni这5种重金属的含量, 均超标《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)严重; 地累积指数和富集系数表明Cd和As污染严重, 综合潜在生态风险指数(RI)普遍高于600, 具有极高生态风险, 其中Cd、As和Pb贡献最大, 贡献率分别为77.8%、14.4%和3.1%。健康风险评估表明, 凉桥村居民通过摄入农作物以及误食土壤造成较高的致癌风险(致癌风险 $>10^{-6}$)以及非致癌健康风险(危害商值 >1); 蒙特卡罗模拟人群健康风险分析显示, 凉桥村土壤重金属污染暴露途径下具有较高致癌与非致癌风险的人群为儿童和成人女性, 摄入农作物的风险概率远大于土壤暴露途径。该区域应采取风险管控和治理修复措施, 减缓农田土壤与农作物重金属的致癌风险, 成人和儿童应预防吸入土壤颗粒物和经口摄入土壤, 儿童还应重点预防皮肤接触土壤的暴露途径。

关键词: 金属矿区; 土壤与作物; 重金属污染; 健康风险评价; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: X171.5; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2461-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305184

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines

WEI Hong-bin^{1,2,3}, LUO Ming², XIANG Lei⁴, ZHA Li-si⁵

(1. Anhui Province Engineering Laboratory of Water and Soil Resources Comprehensive Utilization and Ecological Protection in High Groundwater Mining Area, Huainan 232001, China; 2. Land Consolidation and Rehabilitation Center(Land Science and Technology Innovation Center)/Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 3. Technical Innovation Center of Mine Geological Environmental Restoration Engineering in Southern Karst Area, Ministry of Natural Resources, Nanning 530028, China; 4. College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 5. College of Public Administration, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320, China)

Abstract: To analyze the heavy metal pollution characteristics and human health risks of farmland soils and crops around metal mines, samples were collected and analyzed from farmland soils and crops around the mining area. The soil accumulation index method, enrichment coefficient method, and comprehensive potential ecological risk index method were used to study the pollution characteristics and comprehensive potential ecological risks of heavy metals in soil and crops. The Monte Carlo simulation method was used to assess the health risk of heavy metals in soil and crops. The results showed that the main heavy metal pollutants in the soil of Liangqiao Village were Cd, As, and Pb, with over 100%, 100%, and 75% of the soil samples exceeding the screening values of farmland soil (GB 15618-2018), respectively; the contents of Cd, Pb, As, Cr, and Ni in crops significantly exceeded the national standard (GB 2762-2017). The geo-accumulation index and enrichment coefficient indicated that Cd and As pollution was serious, and the comprehensive potential ecological risk index (RI) was generally higher than 600, indicating a high ecological risk. Cd, As, and Pb contributed the most, with contribution rates of 77.8%, 14.4%, and 3.1%, respectively. The health risk assessment showed that residents of Liangqiao Village had a higher risk of carcinogenesis (carcinogenic risk $>10^{-6}$) and non-carcinogenic health risk (hazard quotient value >1) owing to the intake of edible crops and accidental ingestion of soil. Monte Carlo simulation of population health risk analysis showed that the populations with high carcinogenic and non-carcinogenic risks under the exposure pathway of heavy metal pollution in the soil of Liangqiao Village were children and adult women, and the risk probability of consuming agricultural products was much higher than that of the soil exposure pathway. Risk control and remediation measures should be taken in the region to mitigate the carcinogenic risk of heavy metals in the soil. Adults and children should avoid the inhalation of soil particles and the oral ingestion of soil. For children, there should also be a focus on the prevention of exposure pathways through skin contact with soil.

Key words: metal mining area; farmland soils and crops; heavy metal pollution; health risk assessment; Monte Carlo simulation

良好生态环境是实现中华民族永续发展的内在要求, 是增进民生福祉的优先领域, 是建设美丽中国的重要基础^[1]。健康的土壤生态环境是推进高质量发展和维护国家生态安全的重要内容, 是可持续发展的重要保障。矿产资源的开采、冶炼和洗矿过程引发了一定的生态环境问题, 大量尾矿和采矿废石

收稿日期: 2023-05-21; 修订日期: 2023-06-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800701); 安徽省高潜水位矿区水土资源综合利用与生态保护工程实验室开放课题项目(2022-WSREPMA-02); 自然资源部南方石山地区矿山地质环境修复工程技术创新中心开放课题项目(NFSS2023001)

作者简介: 魏洪斌(1984~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为土壤污染评估, E-mail: hongbin1202@163.com

伴随着雨水的淋滤和溶解,矿物的可溶成分随着地表径流和地下渗透造成矿区和周边农田的重金属污染^[2,3].人体食用了含重金属的农作物,通过食物链的富集作用,重金属在人体内可直接和分子结构中含羟基、氨基的蛋白质及各种酶结合,从而影响了正常的生理生化功能,甚至失去生物活性,导致出现蛋白质和糖类代谢紊乱等症状,其他重要的生命物质如核糖核酸、激素和神经递质等也能与重金属结合或发生作用,引起人体病变^[4,5].通过开展矿区周边农田土壤和农作物污染状况调查,评估土壤和农产品质量安全、生态风险和公众健康风险,对农田重金属污染的风险管控和治理修复具有重要意义.

矿区作为农田土壤重金属污染的源头,受到学者的日益关注并开展了相关的工作:如开展铅锌矿和锰矿等周边农田重金属污染评价、分布特征和生态风险评估研究^[6-9],解析重金属污染来源^[10-12],探讨矿区重金属形态分布特征和迁移转化机制^[13],关注矿区与周边农田重金属的源汇关系以及土壤-农作物间的迁移转换等^[14,15].已有的研究在农田土壤重金属污染评价、来源解析和风险管控等方面开展了大量工作^[16-19],而在健康风险评估方面主要侧重于重金属污染的生态风险^[20,21],或采用较传统的技术方法对重金属污染的健康风险进行评价^[22-24].根据重金属的含量和暴露参数进行健康风险评估,由于不同人群的个体差异,重金属含量和其他影响因素的存在,确定性风险评估中的固定参数很难准确识别出风险较高的重金属或对健康风险影响较大的因素;采用参数的均值或中位数进行风险评估,可能导致过高或过低的健康风险评估结果^[25,26].蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟健康风险评估进行概率风险分析,弥补了传统方法的不足,可以提高重金属污染健康风险评估结果的准确性,该方法通过计算污染物超过风险值的概率,确定健康风险控制的优先要素,识别出有限控制污染物,从而有效地进行概率风险分析^[27-29].蒙特卡罗模拟方法已在煤矸石周边农田和铅锌冶炼厂周边农田进行了健康风险评估的应用^[30,31],但综合评估金属矿区周边农田土壤和农作物重金属健康风险的研究则相对不足.

本文选择紧邻广东韶关大宝山矿的凉桥村为研究对象.大宝山矿是粤北地区的一座大型多金属硫化矿,矿产开采后的硫化物矿床在经过风化氧化、雨水淋滤后形成酸性矿山废水(acid mine drainage, AMD)等污染物,导致Cd、Pb和As等重金属经地表径流及采矿扬尘进入周边的土壤和水体.作为受矿区影响最直接的区域,该地区重金属污染现象严

重,危害人体健康.本文以广东大宝山矿周边农田为对象,开展土壤和农作物重金属污染特征效应研究,评估生态风险和人体健康风险,服务于矿业废弃地及周边农田的污染修复和生态保护,以期为土壤健康与安全利用提供科学指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

凉桥村位于广东省韶关市翁源县境内,属于紧邻大宝山矿下游区域,坐标为东经113°41'53"~113°46'40",北纬24°30'01"~24°35'26".地势北高南低,地形地貌主要为低矮山地和冲积平原.该区域全年湿润多雨,为亚热带季风气候,年均气温为16.8℃.研究区基带土壤类型为红壤,随着海拔升高逐渐演变为山地黄壤,区内岩石表层风化强烈.大宝山矿是一座以黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿为主的多金属硫化物矿床,在长期非法民采、民选矿产过程中,大量尾矿废渣露天堆放,采矿和选矿的重金属污水以及经风化淋溶产生的酸性矿山废水直接排入附近河流,经地表径流、自然下渗、地表水-地下水交互作用和人为的农业灌溉对矿区流域沿岸土壤和下游农田造成不同程度的重金属污染.因附近居民长期使用污水灌溉生产农产品,导致较高的癌症死亡率,部分村庄成为典型的“癌症村”,历史遗留的尾矿等矿业废弃地危害当地居民的身体健康,土壤污染状况依然严峻.

1.2 样品采集与处理

1.2.1 样品采集

根据研究区土地利用现状和遥感影像图,通过实地踏勘,遵照全面性、代表性、客观性和可行性的原则,采集土壤和农作物样品.采用分区布点法进行样点布设,制定采样方案并绘制样点分布图(图1).每个样点用五点取样法采集农田表层0~20 cm的土壤样品,剔除根茎、石块等杂物后用四分法保留1 kg装入聚乙烯袋中备用,系统采集矿区流域沿岸和污水灌溉的农田土壤样品45个;农作物样品采集可食用蔬菜的叶菜类样品,在农田中采集整株植物作为农作物样品,包括番薯叶、生菜、花生叶和韭菜,将采集的蔬菜样品装入布袋,带回实验室处理分析,共采集农作物样品13个.

1.2.2 样品处理与测定

土壤样品在室内自然风干后,除去杂质研磨,过2 mm筛后装入自封塑料袋中,贴好编号标签用于实验分析;植物样品先洗净可食用蔬菜部分的表面杂质,再用纯水冲洗后送至60℃烘箱中干燥,将烘干样品研磨过0.125 mm筛后装入塑料袋进行实验分

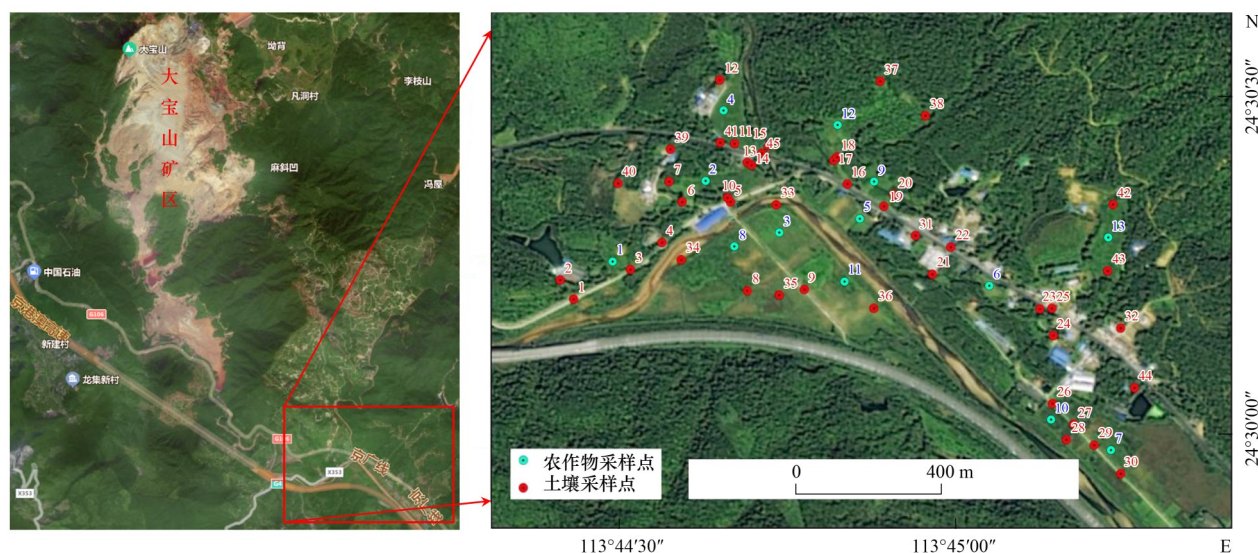


图1 研究区采样布点示意

Fig. 1 Sampling sites of study area

析.测定分析重金属Cd、As、Pb、Cr、Ni、Cu和Zn的含量,所采集样品中重金属Cd、Pb、As、Cu、Zn、Ni和Cr的总量采用微波消解和ICP-MS(Thermo x series 2)法测定.对样品中重金属指标进行统计分析,结果表明各平行样品间的相对标准偏差小于15%,为保证样品测定过程中结果符合质量控制要求,应同时设置质控样和空白样.目标重金属指标在空白样中未检出,质控样(标准土壤GBW07443)中各重金属指标回收率分别为89.7%(Cd)、97.3%(As)、97.7%(Pb)、94.3%(Cr)、104.1%(Ni)、89.7%(Cu)和87.0%(Zn).样品测试数据使用Excel和SPSS软件进行分类和处理,数据柱状图采用Origin 2018软件制作;采用Matlab和ArcGIS 10.2软件进行数据统计分析与图件绘制,利用Crystal Ball 11.1.24进行概率健康风险评估.

1.3 研究方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法(I_{geo})用来评价土壤和沉积物中重金属的富集和污染程度,计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{(K \times C_0)} \right] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为重金属的地累积指数, C_i 为土壤样品重金属含量, C_0 为评价标准,本文采用韶关市土壤环境背景值(DB4402/T 08-2021), K 为修正系数,参照有关文献取值为1.5.地累积污染指数分为7个评价等级: $I_{geo} \leq 0$,无污染; $0 < I_{geo} \leq 1$,无污染-中度污染; $1 < I_{geo} \leq 2$,中度污染; $2 < I_{geo} \leq 3$,中度污染-重度污染; $3 < I_{geo} \leq 4$,重度污染; $4 < I_{geo} \leq 5$,重度污染-极重度污染; $I_{geo} > 5$,极重度污染.

1.3.2 富集系数法

富集系数(EF)可以用于评价土壤中目标重金属

在环境中的富集程度,可以与地累积指数平均法相互验证,计算公式如下:

$$EF = \frac{C_i / B_i}{C_r / B_r} \quad (2)$$

式中, C_i 为土壤中重金属*i*的含量, B_i 为重金属*i*对应的背景值; C_r 为土壤重金属参考元素的含量, B_r 为土壤重金属参考元素对应的背景值.选取的参考元素应满足土壤中含量高、人为污染影响小和含量变化小这3个条件,常用的参考元素为Sc、Mn、Al和Fe,本研究选取Fe元素作为参考元素,其含量取值参照大宝山矿区周边农田的平均值^[32],背景值参照《中国土壤元素背景值》中广东地区土壤Fe的背景值^[33].

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法于1980年由瑞典学者Håkanson提出,该方法综合考虑了重金属的种类、含量和毒性,根据元素的区域背景值,分析重金属污染生态风险的敏感度,计算公式如下:

单个重金属元素污染指数:

$$C_i^i = \frac{C_i}{B_i} \quad (3)$$

单个重金属潜在生态危害指数:

$$E_r^i = T_r^i \times C_i^i = T_r^i \times \frac{C_i}{B_i} \quad (4)$$

多个重金属综合潜在生态风险指数:

$$RI = \sum E_r^i \quad (5)$$

式中, C_i^i 为样品中重金属*i*含量的实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为重金属*i*的区域背景值,本研究选取韶关市第四纪沉积物母质土壤环境背景含量值,来源为土壤环境背景值地方标准文件(DB4402/T 08-2021); T_r^i 为

重金属*i*的毒性系数, 参照有关文献取值为: Zn = 1, Cr = 2, Pb = Cu = Ni = 5, As = 10, Cd = 30. 根据本研究中7种重金属的毒性系数, 对RI值的大小进行修正后划分生态风险等级^[31], 详见表1.

表1 潜在生态风险评价分级标准
Table 1 Criterion of potential ecological risk assessment

C_i^i	污染水平	E_i^i	生态风险	RI	风险等级
<1	轻微	<40	轻微风险	<66	轻
1~3	中度	40~80	低风险	66~132	中
3~6	重度	80~160	中风险	132~264	强
>6	非常严重	160~320	高风险	>264	极强
		>320	极高风险		

1.3.4 蒙特卡罗模拟的人体健康风险评价法

研究区农田受到重金属污染后主要通过土壤暴露和可食农作物摄入危害到人体健康, 可分为土壤-人体和土壤-作物-人体这两种途径引发健康风险, 健康风险的评估过程如下^[34].

重金属经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入的日均摄入量(ADD)估算公式为:

$$ADD_{\text{经口摄入}} = \frac{C_i \times R_{\text{soil}}(R_{\text{crop}}) \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$ADD_{\text{皮肤接触}} = \frac{C_i \times SAE \times SL \times ABF \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$ADD_{\text{呼吸吸入}} = \frac{C_i \times R_{\text{inhal}} \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (8)$$

单一重金属的目标危害商(HQ)计算公式为:

$$HQ = \frac{ADD_i}{RfD_i} \quad (9)$$

式中, C_i 为土壤或可食农作物中重金属的含量,

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; BW为平均体重, kg; EF为暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED为平均暴露时间, a; AT为平均时间, $365 \times ED$, d; RfD_i 为毒性污染物的慢性参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$.

采用USEPA(美国环保署)的化学混合物的健康风险评价指南分析危害指数(HI), 计算公式为:

$$HI = \sum HQ = HQ_1 + HQ_2 + \dots + HQ_n \quad (10)$$

当 $HI \leq 1$ 时, 认为土壤重金属对人体无健康风险; 当 $HI > 1$ 时, 则存在潜在健康风险.

评估单一重金属元素的致癌风险(CR)计算公式为:

$$CR = ADD_i \times SF_i \quad (11)$$

评价多个重金属的综合致癌风险(TCR), 计算公式为:

$$TCR = \sum CR = CR_1 + CR_2 + \dots + CR_n \quad (12)$$

式中, CR为单一元素的潜在致癌风险, SF_i 为危险元素的致癌斜率因子, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$. 公式(6)~(8)中各参数的含义和取值见表2, 公式(9)和公式(11)中各参数的含义和取值见表3. 按照USEPA的综合风险信息数据库, 可接受的致癌风险为 $TCR < 10^{-6}$.

蒙特卡罗模拟健康风险评估是将符合概率分布的变量中随机选取样本作为参数, 代入变量函数模型并输出仿真结果的概率分布, 随机模拟的迭代次数设为10 000, 获得土壤重金属对人体的健康风险概率分布. 暴露参数参照中国人群暴露参数手册(儿童版、成人版)和相关研究, 选取暴露参数的对象为华南片区的农村人群(儿童5~6岁, 成人18~44岁).

表2 蒙特卡罗模拟健康风险评估模型参数取值

Table 2 Parameter values of health risk assessment model with Monte Carlo simulation

参数	含义	单位	分布形式	儿童	成人	文献
EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	三角	180、345 和 365		[35]
R_{soil}	土壤颗粒摄入速率	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	三角	66、103 和 161	4、30 和 52	[36~38]
R_{crop}	可食农作物摄入速率	$\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$	三角	0.011 5、0.138 0 和 0.180 5	0.034 5、0.103 5 和 0.207 0	[36~38]
SL	皮肤黏附系数	$\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	对数正态	0.65 和 1.2	0.49 和 0.54	[35]
R_{inhal}	土壤颗粒吸入速率	$\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	单点	8.6	19	[36~38]
ED	暴露时间	a	单点	6	24	[29]
PEF	颗粒物释放因子	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	单点	1.36×10^9		[29]
BW	体重	kg	对数正态	16.68 和 1.48	57.03 和 1.18	[36~38]
AT	平均暴露时间	d	单点	$365 \times ED$ (非致癌), 365×70 (致癌)		[29]
SAE	皮肤暴露面积	m^2	单点	0.23	0.54	[36~38]
ABF	皮肤吸收因子	无量纲	单点	0.001(非致癌), 0.01(致癌)		[29]

2 结果与分析

2.1 土壤与农作物重金属污染特征

凉桥村土壤为酸性, pH平均值为5.3, 其重金属含量特征如表4所示. 结合当地土地利用类型, 以

《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)中污染风险筛选值和风险管制值($\text{pH} \leq 5.5$, 其他)为标准进行土壤重金属污染评价(图2). 土壤样品的Cd含量基本都超过风险管制值($1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 污染最为严重; 其次为As和Pb, 其

表3 重金属参考剂量和斜率因子取值

Table 3 Corresponding reference dose (RfD) and slope factor (SF) values of heavy metals

重金属	参考剂量(RfD)/(mg·(kg·d) ⁻¹			斜率因子(SF)/(mg·(kg·d) ⁻¹			文献
	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触	
Cd	1.00E-03	1.00E-05	1.00E-05	6.10E+00	6.30E+00	—	[29]
Pb	3.50E-03	3.52E-03	5.25E-04	8.50E-03	—	—	[31]
As	3.00E-04	1.23E-04	1.23E-04	1.50E+00	1.51E+01	3.66E+00	[29]
Zn	3.00E-01	3.00E-01	6.00E-02	—	—	—	[31]
Cr	3.00E-03	2.86E-05	6.00E-05	8.50E-03	4.20E+01	—	[29]
Ni	2.00E-02	2.06E-02	5.40E-03	—	8.40E-01	—	[31]
Cu	4.00E-02	4.02E-02	1.20E-02	—	—	—	[29]

表4 土壤重金属含量统计结果

Table 4 Statistical results of heavy metal concentrations in soil

项目	Cd	Pb	As	Zn	Cr	Ni	Cu
最小值/mg·kg ⁻¹	0.5	29.9	35.2	108	48.1	10.7	310
最大值/mg·kg ⁻¹	30.2	3 274	1 367	5 066	106	42.2	3 045
均值/mg·kg ⁻¹	7.9	389	286	887	73.9	19.9	28.4
中位数/mg·kg ⁻¹	5.3	173	185	301	75.8	18.8	1 040
变异系数/%	67.59	58.36	75.79	45.31	29.54	22.62	38.27

中几乎所有样品的As含量都超过了筛选值(40 mg·kg⁻¹), 约50%以上的样品超过了管制值(200 mg·kg⁻¹); 样品中Pb含量超过筛选值(70 mg·kg⁻¹)和管制值(400 mg·kg⁻¹)的比例分别为75%和20%; 与Cu和Zn的风险筛选值相比, 75%的样品Zn含量超过筛选值(200 mg·kg⁻¹), 50%以上样品Cu含量超过筛选值(50 mg·kg⁻¹). Ni和Cr风险较低, 其含量均低于筛选值[ω(Ni)为60 mg·kg⁻¹和ω(Cr)为150 mg·kg⁻¹]. 可见, 研究区Cd污染最为严重, 其次为As和Pb.

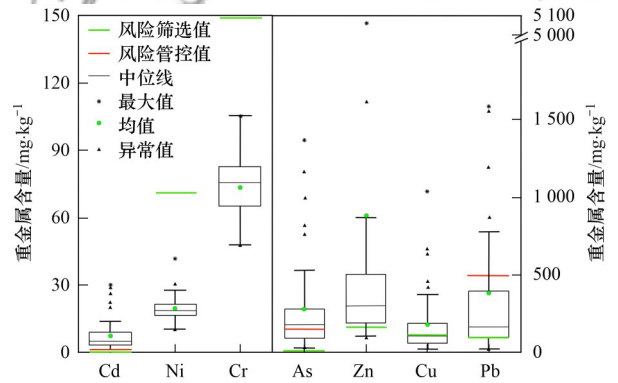


图2 矿区下游凉桥村土壤重金属含量特征

Fig. 2 Characteristics of heavy metal content in soil of Liangqiao Village downstream of mining area

农作物重点关注重金属Cd、Pb、As、Cr和Ni, 农作物样品中均普遍检出所关注的重金属, 其重金属含量特征如表5所示. 以《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017)中相关值进行评价(图3), 农作物中Cd、Pb、As、Cr和Ni这5种重金属均严重超标, 其中Pb超标最为严重, 所有农作物

样品的Pb含量均超标, 其次为As、Cd和Cr, 约75%的农作物样品超标, Ni超标率约为50%, 相对较低. 可见由矿区造成的农田土壤重金属污染, 导致种植的农作物大量吸收土壤中累积的有毒重金属元素, 造成极高的农产品安全隐患和人体健康风险.

表5 农作物重金属含量统计结果/mg·kg⁻¹

Table 5 Statistical results of heavy metal concentrations in crops/mg·kg⁻¹

项目	Cd	Pb	As	Cr	Ni
最小值	0.12	38.8	0.13	0.5	8.3
最大值	15.0	219.4	625	11.4	161
均值	2.1	102.5	43.5	2.5	36.6
中位数	0.82	75.4	3.1	1.8	16.1

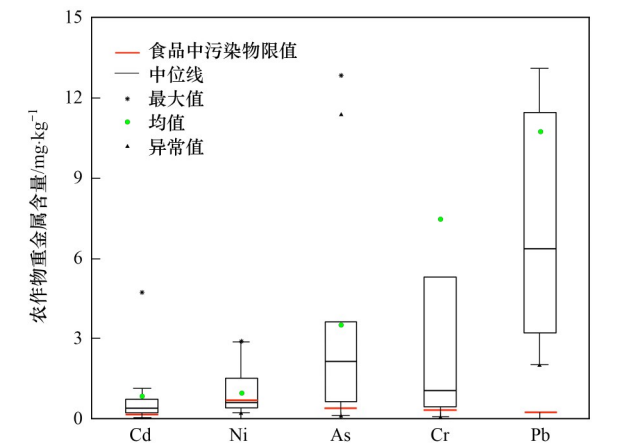


图3 凉桥村农作物重金属含量

Fig. 3 Heavy metal content of crops in Liangqiao Village

2.2 土壤重金属污染生态风险评价

2.2.1 地累积指数和富集系数分析

研究区土壤样品中Cd、As、Zn、Cr、Ni、Cu和Pb的地累积指数(I_{geo})平均值为4.25、3.31、2.11、

-0.19、-0.36、2.17 和 1.80(图4), 可以看出Cd为极严重污染, As为严重污染, Zn和Cu为中度污染-重度污染, Pb为中度污染, Cr和Ni为无污染; 结合变异系数来看(表4), 重金属Cd、As、Zn、Pb和Cu富集与污染水平较高, 主要源自人类活动对环境中输入的重金属元素, 而Cr和Ni的富集水平低, 反映了当地土壤的矿物组成和微量元素. 富集系数(EF)表明土壤重金属富集与污染水平呈现 $Cd>As>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr$ 的趋势(图5), 以往研究中Cu的 I_{geo} 高于Pb和Zn^[39,40], 这可能与大宝山矿区近年来开展的污染源头控制和生态修复工程有关, 从而减少了对下游地区Cu的输入, 而农业生产活动则增加了Zn和Pb的输入.

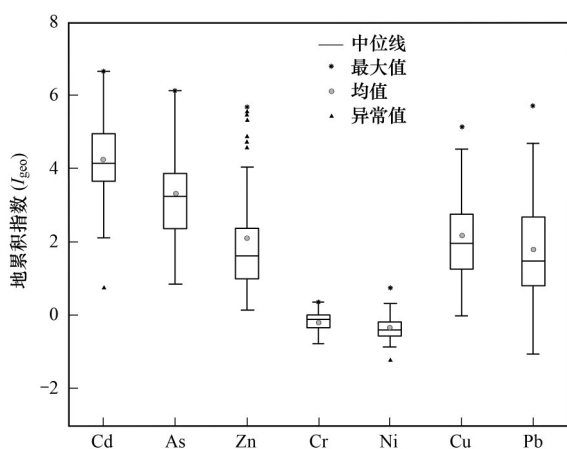


图4 矿区下游凉桥村土壤重金属地累积指数
Fig. 4 Heavy metal accumulation index of soil in Liangqiao Village downstream of mining area

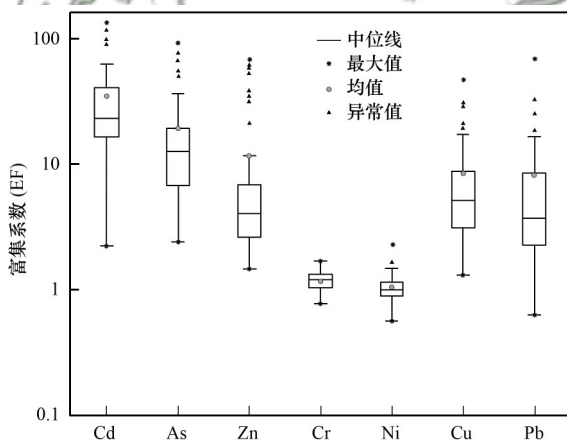


图5 凉桥村土壤重金属富集系数(EF)
Fig. 5 Heavy metal enrichment factors (EF) in soil of Liangqiao Village

2.2.2 综合潜在生态风险分析

结合重金属的毒性系数, 通过计算单个重金属的潜在生态危害指数(E_i^t)评估研究区土壤中目标重金属的潜在生态风险(图6), Cd、As、Zn、Cr、Ni、Cu和Pb的 E_i^t 平均值分别为1 186、220、14、3、6、

49和47, 其对综合潜在生态风险指数(RI)的平均贡献率分别为77.80%、14.44%、0.89%、0.18%、0.40%、3.20%和3.10%, 潜在生态危害呈现出 $Cd>As>Pb>Cu>Zn>Ni>Cr$ 的趋势. 其中, 极强潜在生态风险等级的为Cd, 强潜在生态风险等级的为As, 中度潜在生态风险等级的为Cu和Pb, 而轻度潜在生态风险等级的为Zn、Cr、Ni, 说明Cd、As、Cu和Pb这4种重金属在毒性系数的影响下潜在生态风险较大, 应采取相关安全措施管控其危害.

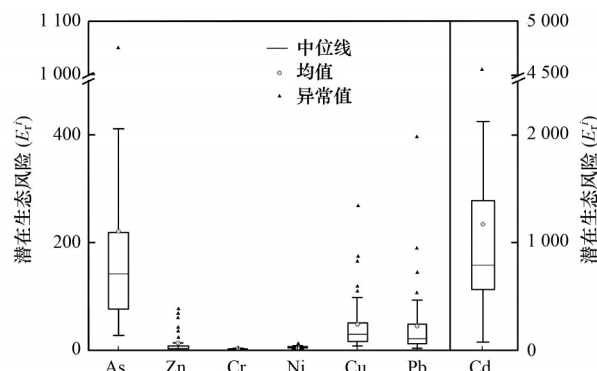


图6 凉桥村土壤目标重金属潜在生态风险评价
Fig. 6 Potential ecological risk assessment of soil target heavy metals in Liangqiao Village

2.3 土壤和农作物重金属健康风险评估

2.3.1 重金属危害商和危害指数分析

通过计算经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入土壤和可食农作物摄入这4种途径的危害商和暴露途径的危害指数, 分析研究区重金属污染的非致癌健康风险. 根据计算结果(图7~9), 研究区土壤重金属Cd、As、Zn、Cr、Ni、Cu和Pb的暴露途径危害指数(HI)均值分别为0.09、8.08、0.02、0.21、0.01、0.03和0.67. 其中, As对人体健康的非致癌风险危害水平较高, 其非致癌风险危害指数大于1, 超过可接受水平; 其他元素的非致癌风险水平较低, 对人体危害处于可接受水平. 可食农作物摄入暴露途径的平均危害商由大到小依次为: As(56.65)>Pb(15.18)>Cr(5.56)>Cu(2.25)>Cd(2.21)>Zn(1.10)>Ni(0.19), 可见Ni的非致癌健康风险处于可接受水平, 其他目标重金属对人体健康有非致癌健康危害, 特别是As、Pb和Cr的风险较高.

计算致癌元素Cd、As、Cr和Pb的所有土壤暴露和可食农作物摄入途径的致癌风险(CR)结果(图10~12). 土壤暴露途径致癌风险(CR)分别为0.000 2、0.000 8、0.000 3和7.055 99E-06, 4种元素的致癌风险(CR)都超过了USEPA的癌症并发阈值(1×10^{-6}), 其中致癌风险(CR)较高的Cd、As和Cr甚至高于残留量水平(1×10^{-4}). Cd、As、Cr和Pb的可食农作物

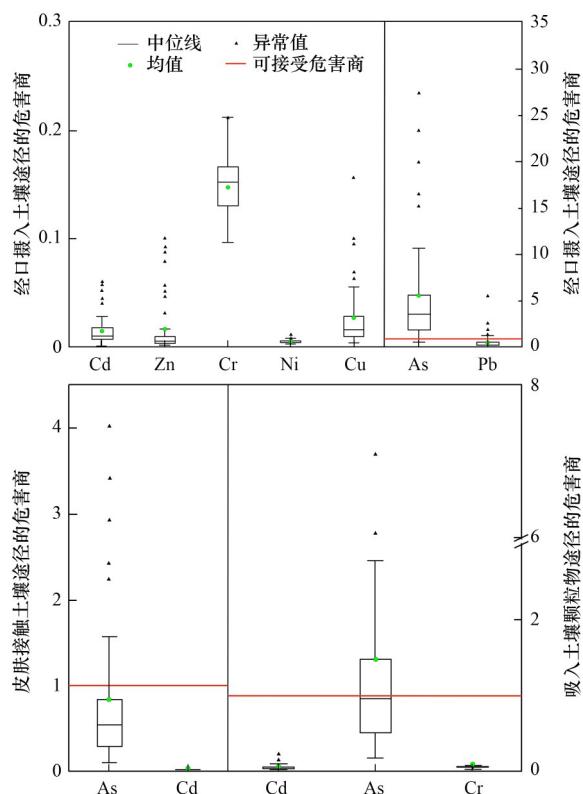


图7 凉桥村不同土壤暴露途径的污染重金属危害商

Fig. 7 Hazard quotient of heavy metals of different soil exposure routes in Liangqiao Village

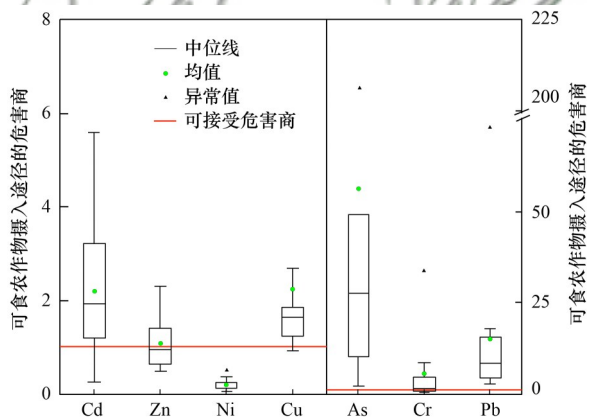


图8 凉桥村重金属可食农作物摄入途径的危害商

Fig. 8 Hazard quotient of edible crops intake routes in Liangqiao Village

摄入途径的致癌风险(CR)分别为0.033 2、0.025 5、0.008 3和0.000 5, 超过可接受人体健康风险范围的 $10^2 \sim 10^4$ 倍, 居民摄入该地种植的农作物具有极高的致癌风险, 可见土壤暴露和可食农作物暴露途径会引起非致癌和致癌风险。

2.3.2 蒙特卡罗模拟的人体健康风险分析

采用蒙特卡罗模拟的方法计算居民暴露重金属的人体健康风险概率, 当计算结果的累计概率分布曲线大于可接受危害商1与可接受致癌风险 10^{-6} 时, 则表明该曲线代表的暴露情景对人体存在非致癌与

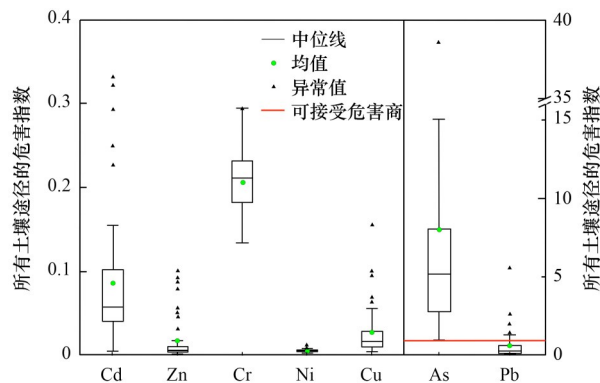


图9 目标重金属污染物所有土壤暴露途径的危害指数(HI)

Fig. 9 Hazard index (HI) of all exposure routes of the target heavy metal pollutants

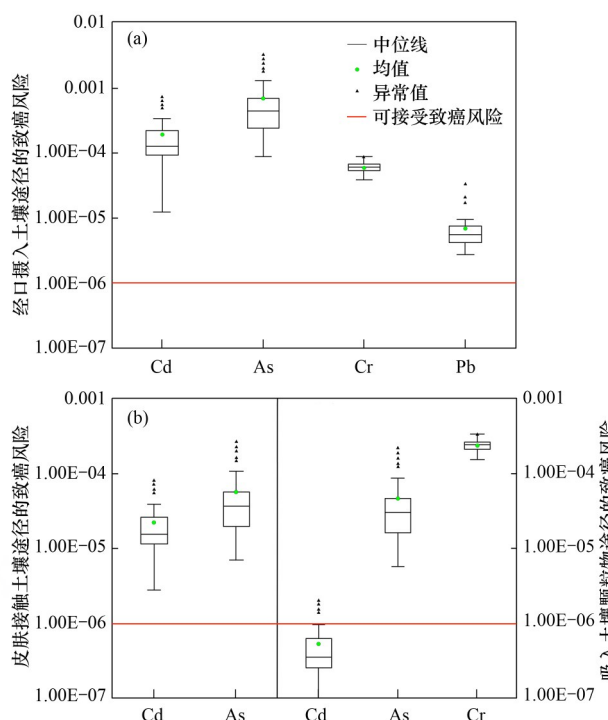


图10 凉桥村不同土壤暴露途径的污染重金属致癌风险

Fig. 10 Carcinogenic risk quotient of heavy metals of different soil exposure routes in Liangqiao Village

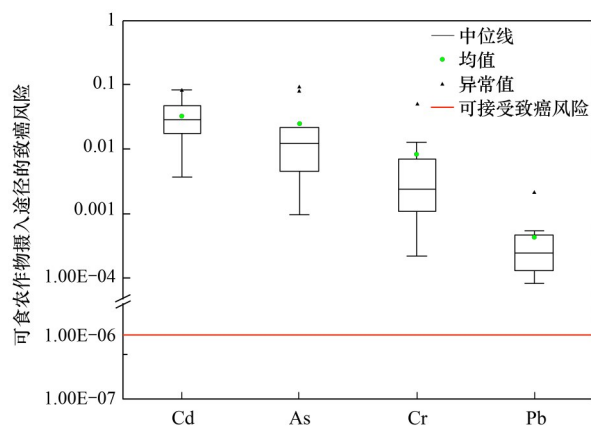


图11 凉桥村重金属可食农作物摄入途径的致癌风险(CR)

Fig. 11 Carcinogenic risk of edible crop intake routes in Liangqiao Village

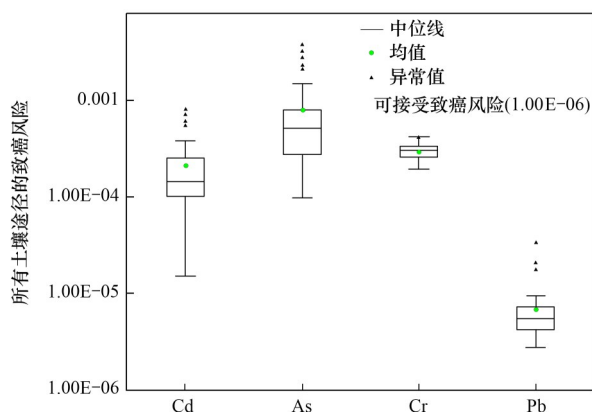


图 12 目标重金属污染物所有土壤暴露途径的总致癌风险(TCR)

Fig. 12 Total carcinogenic risk (TCR) of all exposure routes of the target heavy metal pollutants

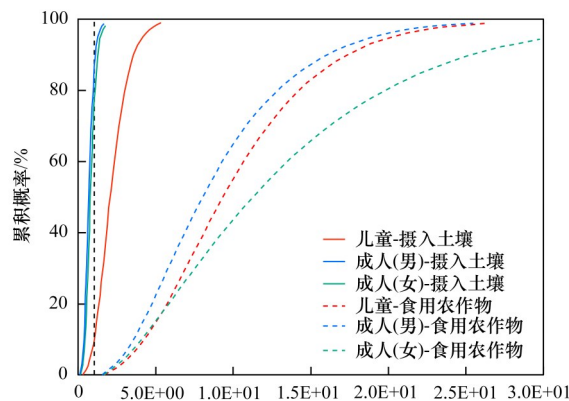


图 13 非致癌风险危害指数(HI)概率分布

Fig. 13 Probability distribution for non-carcinogenic hazard index (HI)

致癌的健康风险. 结果表明, 不同人群在经口摄入土壤暴露重金属的途径中, 危害指数由大到小依次为: 儿童、成人(女)和成人(男); 可食农作物暴露重金属的危害指数由大到小依次为: 成人(女)、儿童和成人(男). 研究区不同类型的暴露风险中, 可食农作物的重金属暴露风险为主导风险, 对暴露人群产生非致癌与致癌的健康危害概率为 100%(图 13). 对比两种途

径中成人(男)、成人(女)和儿童的危害商与致癌风险 6 项数据的第 50 百分位数(P50), 可食农作物的暴露风险是经口摄入土壤途径的 15.14、23.9、63.86、83.64、4.50 和 12.31 倍(图 14). 与成人经口摄入土壤的途径相比, 可食农作物的摄入具有较强的非致癌风险和极强的致癌风险, 特别是成人女性. 在经口摄入土壤的非致癌健康风险中, 成人的概率为 30% 左右, 而儿童则为 90%, 因此应重视当地儿

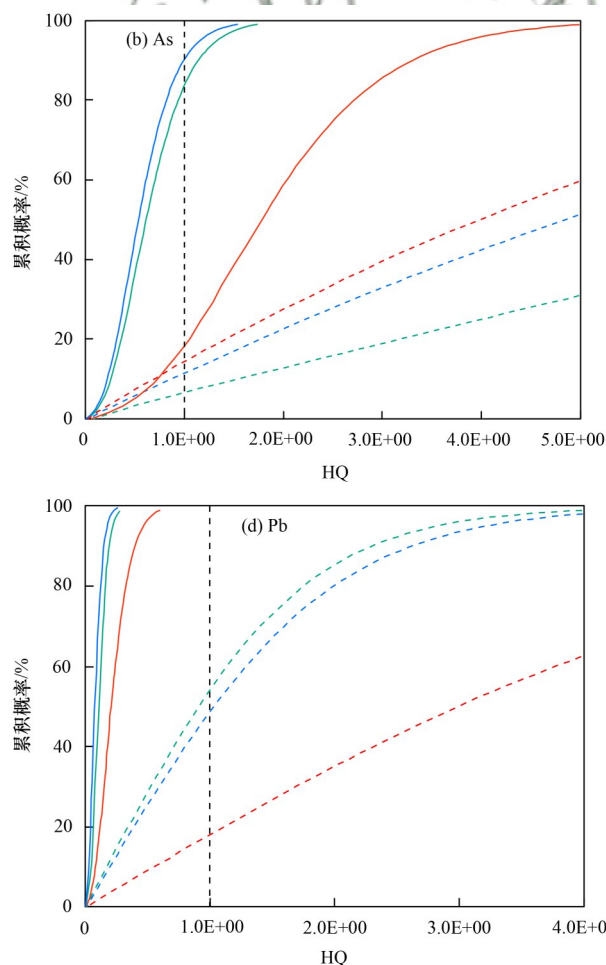
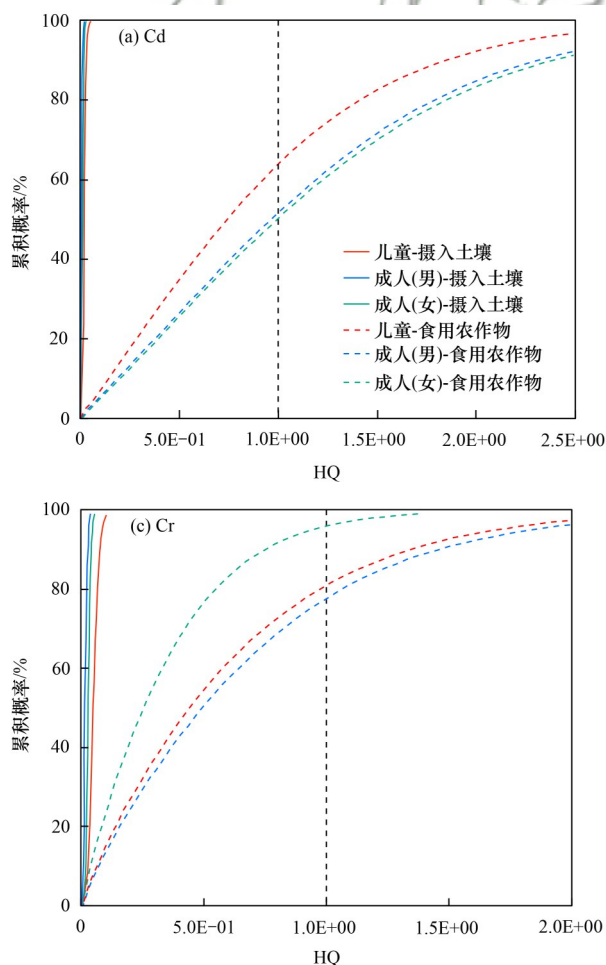


图 14 重金属非致癌风险危害商(HQ)的概率分布

Fig. 14 Probability distribution for hazard quotient (HQ) of heavy metals

童土壤重金属暴露的健康风险. 从重金属元素来看(图 14), As 是当地须特别关注的重金属污染物, 其对成人和儿童经口摄入土壤暴露的非致癌健康风险概率分别为 80% 和 20% 左右; Cd、Cr 和 Pb 对所有人群经口摄入土壤暴露重金属情景的危害商均低于可接受危害商值; 可食农作物暴露途径的非致癌健康风险概率排序为: As>Pb>Cd>Cr, As 的成人女性最高, 约 95%, Cr 的成人女性最

低, 约 5%.

从重金属暴露途径的总致癌风险来看, 经口摄入土壤和可食农作物摄入的总致癌风险均呈现儿童>成人(女)>成人(男)的趋势(图 15). 从重金属元素来看(图 16), 其中 Pb 对成人经口摄入土壤的重金属暴露途径中 20% 的概率无致癌风险, 其他暴露途径均有致癌风险, 不同重金属致癌风险呈现 As>Cd>Cr>Pb 的趋势.

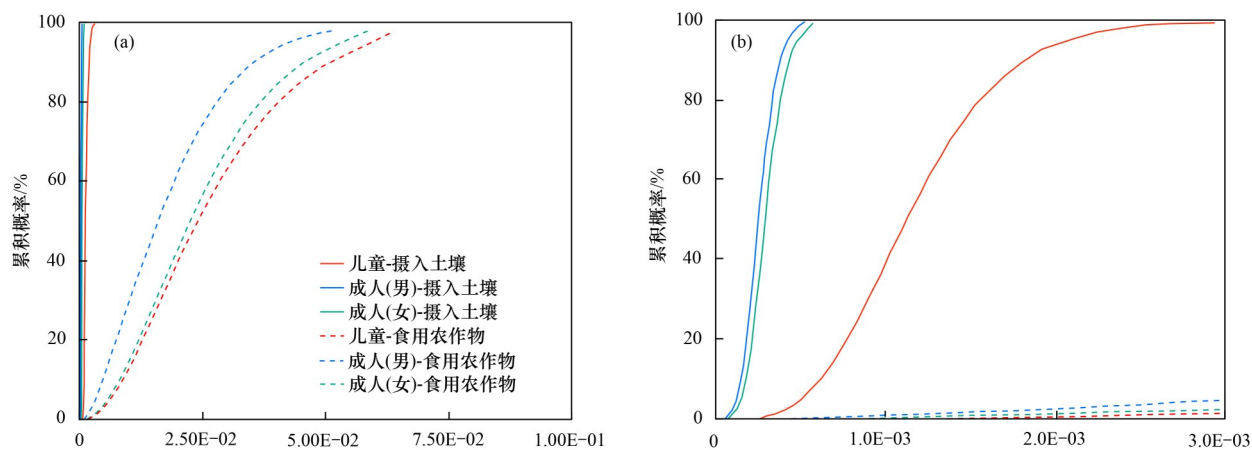


图 15 总致癌风险(TCR)的概率分布

Fig. 15 Probability distribution for total carcinogenic risk

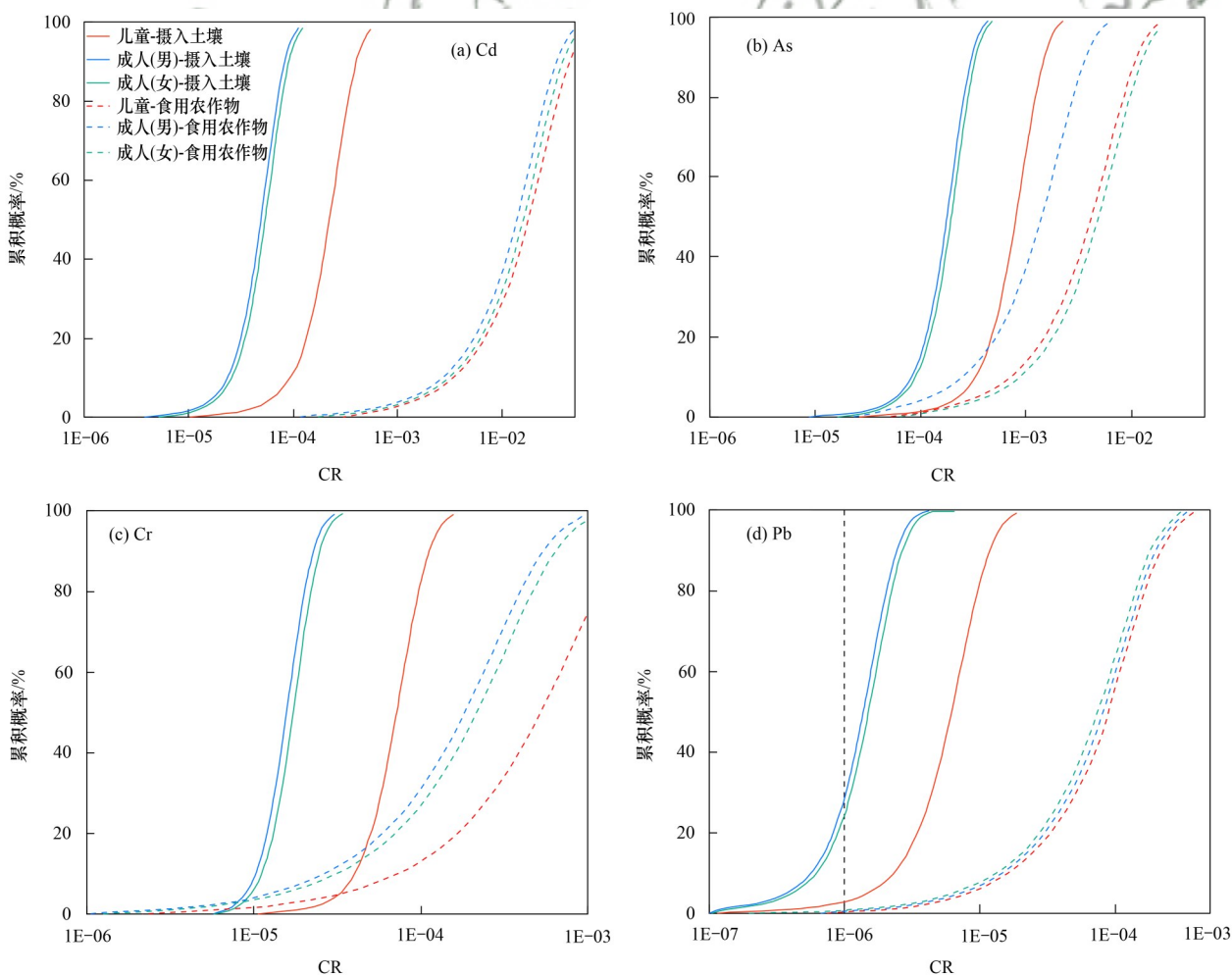


图 16 重金属致癌风险(CR)的概率分布

Fig. 16 Probability distribution for carcinogenic risk (CR) of heavy metals

3 讨论

研究区土壤重金属污染结果表明, Cd污染最为严重, 其次为As和Pb, 这也与研究区地累积指数和富集系数的计算结果一致. 由于土壤的重金属污染, 导致农作物中Cd、Pb、As、Cr和Ni含量均严重超标, 研究区生态环境和人体健康因上游大宝山矿区重金属的输入而存在潜在风险, 由于土壤和农作物中的重金属含量高, 土壤暴露和可食农作物摄入给当地居民造成极高的非致癌风险, 特别是在此长期生活的居民会因环境暴露和饮食摄入多种重金属而引起较高的联合健康风险, 该研究结果与前人研究的一致^[41]. 因此应开展矿业废弃地和周边农田的污染治理修复, 通过源头控制阻止重金属在土壤与作物间的迁移.

蒙特卡罗模拟方法计算当地不同人群在多种暴露途径的人体健康风险概率, 从不同重金属的非致癌风险和致癌风险概率结果来看, Cd和As是土壤和农作物暴露途径的主要致癌因子和非致癌因子, Cd和As对儿童和成人具有较高的健康风险可能与较高的斜率因子和较低的参考剂量有关^[42,43], 其中Cd的斜率因子(SF)最大, 而As对应的毒性污染物慢性暴露的参考剂量(RfD)仅为 $0.0001\text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 本研究结果与前人的研究结果具有一致性^[44,45]. Cd和As属于累积性毒害元素, 会危害人体多组织系统功能, 作为主要的一类致癌物质需重点关注, 长期暴露可引发肝和肺等多种内脏器官的肿瘤^[46,47]; As在经口、呼吸和皮肤这3种途径下, 儿童经口的危害商大于成人, 但呼吸的小于成人, 由于儿童体重小于成人, 成人长期的呼吸量数据远高于儿童, 造成二者摄入土壤重金属的暴露量相当; 从变量参数来看, 经口摄入土壤和可食农作物的致癌风险敏感度最高, 其次是暴露频率, 与前人研究结论一致^[48], 因此经口摄入的暴露途径远高于呼吸吸入和皮肤接触^[49,50]. 在非致癌风险防范方面, 儿童应重点预防经口摄入土壤和呼吸吸入的土壤颗粒物, 成人应重点防范的暴露途径为吸入土壤颗粒物. 儿童的致癌风险也远大于成人, 这与已有研究的结果一致^[51,52], 但儿童在皮肤接触和吸入颗粒物两种途径的致癌风险大小关系与成人相反, 这主要是由皮肤表面土壤黏附系数和呼吸吸入致癌斜率因子的差异造成的, 同时儿童对污染物具有较高的敏感性, 也与儿童的生理和行为特征有关^[53]; 在防范土壤重金属暴露致癌方面, 儿童预防的重点仍是经口摄入土壤和皮肤接触土壤两种途径, 而成人则应重点预防经口摄入土壤的途径.

4 结论

(1)研究区凉桥村土壤和农作物重金属超标严重, 土壤污染主要元素为Cd、As和Pb, 土壤样品中重金属Cd、As和Pb含量超过农田土壤筛选值(GB 15618-2018)的比例分别为100%、100%和75%. 农作物中Cd、Pb、As、Cr和Ni这5种重金属均严重超标, 其中Pb超标最为严重, 所有农作物样品均超标, As、Cd和Cr约75%的农作物样品超标, Ni超标率约为50%.

(2)地累积指数和富集系数的计算结果显示凉桥村土壤重金属污染严重, Cd和As污染累积和富集最为严重; 综合潜在生态风险极高, 总潜在生态风险指数(RI)普遍高于600, 其中贡献最大的是Cd、As和Pb, 贡献率分别为77.8%、14.4%和3.1%.

(3)当地居民通过误食土壤和摄入可食农作物造成的非致癌健康风险(危害商值>1)和致癌风险(致癌风险> 10^{-6})较高; 蒙特卡罗模拟健康风险分析显示儿童和成人女性在重金属暴露途径下具有较高致癌和非致癌风险, 可食农作物摄入途径的风险概率要大于土壤暴露途径; 该区域成人防范土壤重金属非致癌风险和致癌风险应注意吸入土壤颗粒物和经口摄入土壤的暴露途径, 而儿童应重点预防经口摄入、吸入土壤颗粒物和皮肤接触土壤的暴露途径.

参考文献:

- [1] 中共中央宣传部, 中华人民共和国生态环境部. 习近平生态文明思想学习纲要[M]. 北京: 学习出版社, 2022.
- [2] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2719-2731.
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. Environmental Science, 2022, 43(5): 2719-2731.
- [3] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2104-2114.
Wang H Y, Han L, Xie D J, et al. Distribution characteristics of heavy metals in farmland soils around mining areas and pollution assessment[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2104-2114.
- [4] 王伟全, 徐冬莹, 黄青青, 等. 污灌区土壤——小麦系统中重金属富集特征及其对人体健康风险评价[J]. 环境化学, 2022, 41(10): 3231-3243.
Wang W Q, Xu D Y, Huang Q Q, et al. Characteristics of heavy metals in the soil-wheat system of sewage irrigation area and its health risk assessment[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(10): 3231-3243.
- [5] 李慧, 韩雅静, 朱晓辉, 等. 基于生物可给性的农用地土壤重金属复合污染非致癌健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2023, 36(4): 783-793.
Li H, Han Y J, Zhu X H, et al. Non-carcinogenic health risk assessment of heavy metals combined exposure from soil of agricultural land based on bioavailability [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(4): 783-793.
- [6] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1054-1063.

- Wu J N, Long J, Liu L F, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38** (3): 1054-1063.
- [7] 黄钟霆, 易盛伟, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43** (2): 975-984.
- Huang Z T, Yi S W, Chen B B, *et al.* Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (2): 975-984.
- [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、污染与生态风险评估[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] 邓海, 王锐, 严明书, 等. 矿区周边农田土壤重金属污染风险评估[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.
- [10] 卢鑫, 邝荣禧, 何跃, 等. 基于APCS-MLR模型和地统计学相结合的矿区农田土壤溯源解析[J]. *土壤*, 2022, **54** (2): 379-384.
- Lu X, Kuang R X, He Y, *et al.* Source apportionment of Arsenic in agricultural soils from a typical mining area based on APCS-MLR model and geostatistics [J]. *Soils*, 2022, **54** (2): 379-384.
- [11] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 基于UNMIX模型的矿区周边农田土壤重金属溯源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39** (3): 1421-1429.
- Lu X, Hu W Y, Huang B, *et al.* Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (3): 1421-1429.
- [12] 李志涛, 王夏晖, 何俊, 等. 四川省江安县某硫铁矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38** (6): 1272-1279.
- Li Z T, Wang X H, He J, *et al.* Source identification and pollution assessment of heavy metals in farmland soils around a pyrite mining area in Jiang'an County, Sichuan Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38** (6): 1272-1279.
- [13] 魏洪斌, 罗明, 向垒, 等. 矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析[J]. *环境科学*, 2023, **44** (6): 3573-3584.
- Wei H B, Luo M, Xiang L, *et al.* Analysis on the distribution characteristics and influence mechanism of migration and transformation of heavy metals in mining wasteland [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (6): 3573-3584.
- [14] 毛志强, 田康, 刘本乐, 等. 广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40** (5): 987-998.
- Mao Z Q, Tian K, Liu B L, *et al.* Ecological risks of heavy metals and the relationship between sources and sinks in an abandoned mining area of Guangxi Zhuang Autonomous Region [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40** (5): 987-998.
- [15] 张龙, 宋波, 黄凤艳, 等. 湖南锡矿山周边土壤-农作物系统锑迁移转换特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43** (3): 1558-1566.
- Zhang L, Song B, Huang F Y, *et al.* Characteristics of antimony migration and transformation and pollution evaluation in a soil-crop system around a tin mine in Hunan province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43** (3): 1558-1566.
- [16] 刘洋, 刘明庆, 王磊, 等. 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41** (4): 785-793.
- Liu Y, Liu M Q, Wang L, *et al.* Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil around an abandoned silicon plant in Yunnan [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41** (4): 785-793.
- [17] 穆德苗, 陈艳秋, 胡涛, 等. 基于田块尺度的农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41** (6): 1271-1283.
- Mu D M, Chen Y Q, Hu T, *et al.* Assessment and source analysis of heavy metals pollution in farmland soil at the field scale [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41** (6): 1271-1283.
- [18] 周亚龙, 王乔林, 王成文, 等. 雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应[J]. *环境科学*, 2021, **42** (12): 5977-5987.
- Zhou Y L, Wang Q L, Wang C W, *et al.* Heavy metal pollution and cumulative effect of soil-crop systems around typical enterprises in Xiong'an New District [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (12): 5977-5987.
- [19] 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.
- [20] 刘鹏祺, 徐东昊, 李亚琳, 等. 基于多评估方法的县域镉污染风险管控研究[J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41** (7): 1424-1432.
- Liu P Q, Xu D H, Li Y L, *et al.* Risk management of cadmium pollution at the county level based on multiple evaluation methods [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41** (7): 1424-1432.
- [21] 魏洪斌, 罗明, 吴克宁, 等. 冀东平原农田土壤重金属污染源分析与风险评估[J]. *土壤通报*, 2023, **54** (2): 462-472.
- Wei H B, Luo M, Wu K N, *et al.* Source analysis and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil in the Eastern Hebei Plain [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, **54** (2): 462-472.
- [22] 王红梅, 吴健芳, 田自强, 等. 土壤污染物健康风险评估技术现状及发展趋势[J]. *环境工程技术学报*, 2023, **13** (2): 778-784.
- Wang H M, Wu J F, Tian Z Q, *et al.* Status and development trend of soil pollutant health risk assessment technology [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13** (2): 778-784.
- [23] 张浩, 王洋, 王辉, 等. 某废铅蓄电池炼铅遗留场地土壤重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境工程技术学报*, 2023, **13** (2): 769-777.
- Zhang H, Wang Y, Wang H, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of soil from an abandoned site for lead smelting of waste lead batteries [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13** (2): 769-777.
- [24] 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 等. 铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44** (11): 6085-6094.
- Liao H W, Jiang Z C, Zhou H, *et al.* Heavy metal pollution and health risk assessment in karst basin around a lead-zinc mine [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (11): 6085-6094.
- [25] 陈子万, 许晶, 侯召雷, 等. 基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44** (1): 405-414.
- Chen Z W, Xu J, Hou Z L, *et al.* Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil-crop system based on soil parent material zoning [J]. *Environmental Science*, 2023, **44** (1): 405-414.
- [26] 刘海, 魏伟, 黄健敏, 等. 长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44** (3):

- 1686-1697.
- Liu H, Wei W, Huang J M, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of soil-crops system in Anhui section of the Yangtze River Basin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1686-1697.
- [27] Tong R P, Yang X Y, Su H R, *et al.* Levels, sources and probabilistic health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the agricultural soils from sites neighboring suburban industries in Shanghai [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1365-1373.
- [28] Ding D, Kong L Y, Jiang D D, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of chemicals of concern in soil, water and sediment at a large strontium slag pile area [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **304**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114228.
- [29] Huang J L, Wu Y Y, Sun J X, *et al.* Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with Positive matrix factorization model [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **415**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125629.
- [30] 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 等. 基于蒙特卡罗模拟的煤矸山周边农用地土壤重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(10): 5666-5678.
- Ma J, She Z L, Wang S L, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around the gangue heap of coal mine based on Monte Carlo simulation [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(10): 5666-5678.
- [31] 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.
- [32] 张晓霞, 陈能场, 郑煜基. 大宝山矿区上坝村农田土壤重金属污染特征[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, **13**(4): 8-15.
- Zhang X X, Chen N G, Zheng Y J, *et al.* Characteristics of heavy metal pollution in farmland soils of Shangba village in Dabaoshan area [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2018, **13**(4): 8-15.
- [33] 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.
- [34] USEPA. Exposure Factors Handbook: 2011 Edition [R]. Washington DC: USEPA, 2011.
- [35] Chen R H, Chen H Y, Song L T, *et al.* Characterization and source apportionment of heavy metals in the sediments of Lake Tai (China) and its surrounding soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133819.
- [36] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 0~5岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [37] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 6~17岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [38] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- [39] Zhou F, Huang G H, Guo H C, *et al.* Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. *Water Research*, 2007, **41**(15): 3429-3439.
- [40] Zhao H R, Xia B C, Qin J Q, *et al.* Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage: A case study in Dabaoshan Mine, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(6): 979-989.
- [41] Liao J B, Wen Z W, Ru X, *et al.* Distribution and migration of heavy metals in soil and crops affected by acid mine drainage: Public health implications in Guangdong Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **124**: 460-469.
- [42] Li J, Li C, Sun H J, *et al.* Arsenic relative bioavailability in contaminated soils: comparison of animal models, dosing schemes, and biological end points [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(1): 453-461.
- [43] Li Z Y, Ma Z W, Van Der Kuijp T J, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **468-469**: 843-853.
- [44] Tseng W P. Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1977, **19**: 109-119.
- [45] Han J, Lee S, Mammadov Z, *et al.* Source apportionment and human health risk assessment of trace metals and metalloids in surface soils of the Mugan Plain, the Republic of Azerbaijan [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **290**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118058.
- [46] 王静, 魏恒, 潘波. 中国农田土壤Cd累积分布特征及概率风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 4006-4016.
- Wang J, Wei H, Pan B. Accumulation characteristics and probabilistic risk assessment of Cd in agricultural soils across China [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 4006-4016.
- [47] 吴婧, 董欣敏, 郑燕芳, 等. 镉致癌的分子机制研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(6): 54-61.
- Wu J, Dong X M, Zheng Y F, *et al.* Recent research progress in molecular mechanisms of cadmium induced carcinogenesis [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(6): 54-61.
- [48] Chen G Z, Wang X M, Wang R W, *et al.* Health risk assessment of potentially harmful elements in subsidence water bodies using a Monte Carlo approach: An example from the Huainan coal mining area, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 737-745.
- [49] Doabi S A, Karami M, Afyuni M, *et al.* Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil, atmospheric dust and major food crops in Kermanshah province, Iran [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **163**: 153-164.
- [50] 杨思言, 段宁, 魏婉婷. 基于蒙特卡罗方法的铅酸蓄电池厂土壤健康风险评估[J]. *工业安全与环保*, 2016, **42**(12): 98-102.
- Yang S Y, Duan N, Wei W T. Health risk assessment of the soil from a lead-acid battery factory based on Monte Carlo method [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, **42**(12): 98-102.
- [51] 佟瑞鹏, 杨校毅. 基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评估: 以PAHs为例[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2522-2529.
- Tong R P, Yang X Y. Environmental health risk assessment of contaminated soil based on Monte Carlo method: a Case of PAHs [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2522-2529.
- [52] 丛鑫, 雷旭涛, 付玲, 等. 海州煤矿矸石山周边土壤重金属污染特征及生态风险评估[J]. *地球与环境*, 2017, **45**(3): 329-335.
- Cong X, Lei X T, Fu L, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils around the gangue heap of Haizhou coal mine, China [J]. *Earth and Environment*, 2017, **45**(3): 329-335.
- [53] 王蕊, 陈楠, 张二喜. 龙岩市不同利用类型土壤及农作物Pb、Cd和As污染风险与贡献分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2252-2264.
- Wang R, Chen N, Zhang E X. Pollution risk and contribution analysis of Pb, Cd, and As in soils and crops under different land use types in Longyan city [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2252-2264.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiang, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)