

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
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	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫江 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

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

王蕊¹, 陈楠², 张二喜³, 李小赛¹

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 生态环境部环境发展中心, 北京 100029; 3. 西京学院理学院, 西安 710123)

摘要: 采集了龙岩市某铁锰矿区基岩-不同层位土壤配套样品, 测试了其中重金属 Pb、Cd 和 As 含量, 采用普通克里金插值法, 研究了土壤中 3 种重金属元素的地球化学空间分布特征, 分析了 Pb、Cd 和 As 的来源。结果表明, 研究区地处汇水盆地中, 高含量 Pb 和 As 主要分布于工作区西部靠近露天采场的区域, 中部两支河流交汇处及东部废石堆附近, 而 Cd 大面积集中于西部露天采场周边及选矿厂附近。从水平剖面看, 3 种重金属在土壤各层位高值区域的含量变化整体表现为随着与矿区水平距离的增加而逐渐降低的趋势。从垂向剖面看, 重金属在不同层位土壤间的相关度高。Pb、Cd 和 As 在西部距离露天采场较近的区域, 含量随深度增加呈先升高再降低的趋势。在其他高值区域, 3 种重金属含量随深度增加而降低。不同层位土壤 Pb 和 As 含量与花岗岩、闪长岩中的含量均呈显著正相关关系, Pb 和 As 继承了矿床及其周边母岩的特性。研究区重金属 As 虽受到矿山开采等人为影响, 但影响程度不高。部分点位母质(岩)自身具有较高含量的重金属, 同时, 土壤中重金属 Pb 和 Cd 的含量显著高于岩石含量, 甚至远远超过土壤风险筛选值, 受工矿业、交通运输和农业生产等人类活动影响较大, 存在点源污染, 需关注其对农产品质量安全、农作物生长及土壤生态环境可能产生的风险。

关键词: 土壤; 重金属; 矿区; 地球化学空间分布; 来源

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1114-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007142

Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City

WANG Rui¹, CHEN Nan², ZHANG Er-xi³, LI Xiao-sai¹

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Environmental Development Centre of the Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China; 3. College of Science, Xijing University, Xi'an 710123, China)

Abstract: Bedrock and soil samples from different soil profile layers were collected in an iron and manganese ore area of Longyan City and total amounts of Pb, Cd, and As were determined. The geochemical patterns of three heavy metal elements in the soil were studied using ordinary Kriging interpolation and their sources were also analyzed. High concentrations of Pb and As were found near the mining area to the west, at the intersection of two rivers in the middle, and near the waste rock heap in the east of the study area, while the main area of Cd contamination is located near to the mining areas and ore dressing plant. Based on a horizontal section, the content of Pb, Cd, and As in soils from the high-value region of each layer decreased with horizontal distance from the mining area. Vertically, the concentrations of heavy metals in different soil layers were significantly correlated. Near the mining area, Pb, Cd, and As concentrations first increased and then decreased with depth. In other high-value regions, the concentrations of these three heavy metals decreased with soil profile depth. These heavy metals inherit the characteristics of the deposit and bedrock during the weathering process, and the content of Pb and As in the soil at different depths was significantly positively correlated with granite and diorite content. Although As has been artificially influenced by mining, this influence does not appear to be strong; parent rock in the study area shows higher concentrations of heavy metals, while at the same time, the Pb and Cd content of soil is significantly higher than in the rock indicating the influence of human activities including mining, transportation, and agricultural production. Further attention should now be paid to the quality and safety of agricultural products, crop growth, and possible environmental risks in the study area.

Key words: soil; heavy metal; mining area; geochemical spatial distribution; sources

土壤是人类赖以生存的基础,也是农产品安全的根本保证。重金属具有难降解、易积累和危害持久等特点,进入土壤的重金属经耕作、淋溶等作用发生迁移和累积,并通过食物链以有害浓度在人体内蓄积,危害人体健康^[1~4]。土壤重金属元素主要来源于土壤母质风化、成土过程等自然作用,以及工矿业、农业和交通等人为活动干扰^[5,6]。在分析土壤重金

属来源时,部分学者通过表层土壤重金属含量的 Moran's 指数、变异系数或基于地统计学原理,利用半方差函数相关参数反映重金属的空间相关性、变异性程度及成因等^[7~10]。部分学者利用相关性分

收稿日期: 2020-07-15; 修订日期: 2020-08-23

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190193)

作者简介: 王蕊(1984~),女,博士,主要研究方向为矿山环境调查、风险评估与修复, E-mail: wangrui@cags.ac.cn

析、主成分分析(PCA)等多元统计方法,当元素间相关性较强且存在于同一主成分时,成因可能相同或相似^[11~15].上述方法在判断重金属的单一来源时被广泛应用.然而,近年来的研究成果已经证实,针对单一某种重金属,可能受自然因素与人为因素等多源叠加影响^[16,17].当前人们主要根据研究区工农业排放重金属的特点识别人为来源^[18],而分析地质来源时,通常是依据重金属的地质背景情况,污染源的标志性元素等推断,进而与研究区背景值或其他参照值等对比判断.但由于地区差异性,不同尺度的土壤背景值不易获取或相差较大,集中考虑土壤表层重金属含量等因素造成对地质成因重金属的研究相对较少^[4,19].

福建省龙岩市矿产资源丰富,目前已探明资源储量的矿产地 300 多处,有 15 种矿产探明资源储量占福建全省第一位,主要有铁矿、锰矿、铜金矿、高岭土矿、膨润土矿和煤矿等.有研究表明,矿区排污是农用地土壤重金属最大的污染源,矿山的开采、冶炼、重金属尾矿、冶炼废渣和矿渣堆放等,间接或直接造成矿区周边农用地土壤重金属污染^[20].而土壤是由岩石经过长期风化作用形成的,土壤中绝大部分元素都来自于成土母岩,土壤元素组成与含量很大程度上继承了成土母岩地球化学特征^[21,22].在成

土过程中,原生矿物不断风化,在降雨的淋洗作用下引起土壤中黏土矿物等物质发生淋溶和淀积,从而形成了土壤剖面的各种发生层次,通过颜色、结构、质地、紧实度和其他形态特征等判别土壤 A 层(淋溶层)、B 层(淀积层)和 C 层(土壤母质层)^[23].本研究即以龙岩市某铁锰矿区为例,通过对矿区基岩-不同层位土壤配套样品 Pb、Cd 和 As 的地球化学空间分布规律进行详细调查,考察土壤重金属的空间分布特征,分析重金属来源,以期为矿区周边农田土壤的合理利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省龙岩市新罗区西部.矿区出露的地层主要是石炭系下统林地组以及中石炭纪喷发的一套中性火山岩与火山碎屑岩.次一级的小褶皱较为发育,构造线近于东西.岩浆活动具有明显的多期性,矿区出露的岩浆岩,系属燕山早期中-酸性侵入的黑云二长花岗岩及呈脉状出现在矿区北东的英安斑岩.地貌类型属于低山丘陵地貌,并有平坦的冲洪积阶地.土壤类型多为黄红壤,系红壤向黄红壤过渡地带.黄红壤土体深厚,剖面土层分化明显.研究区及采样点分布如图 1 所示.

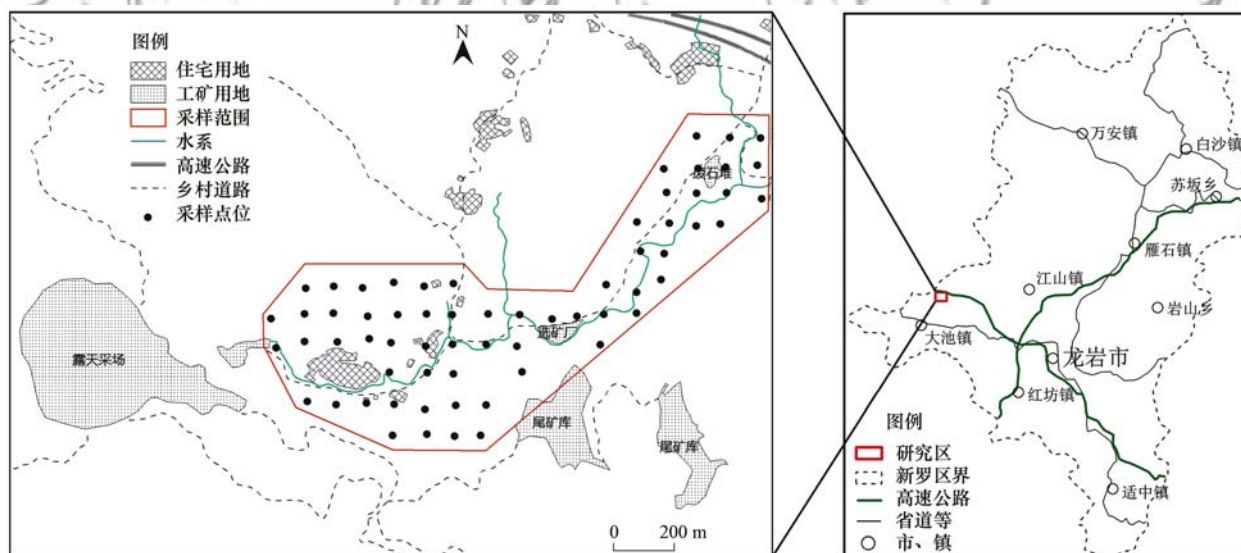


图 1 研究区采样点分布示意

Fig. 1 Sampling points within the study area

1.2 样品采集及分析方法

采用人工点槽方式,采集 A、B 和 C 层土壤及其对应的下伏基岩样品各 64 件^[24].利用拣块法,收集各点位岩石碎块(屑),通过显微镜观察等方法,识别不同类型的岩石后,分别称重、研磨并过 200 目筛. Pb 和 Cd 含量采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定,检出限分别为 $2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. As 含量采用

氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定,检出限为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.基岩样品分析采用国家一级标准物质 GSR-1、GSR-2、GSS-21 和 GSS-25 进行质量控制.重金属 Pb、Cd 和 As 含量分析结果的相对误差 RE 范围为 0.7%~10.4%、1.7%~13.4% 和 4.3%~11.6%,标准偏差 RSD 范围为 2.0%~6.1%、2.9%~7.8% 和 4.0%~7.9%,重复性样品检验结果的相对双差 RD 范

围为0.2%~14.1%、2.1%~26.5%和0.1%~21.9%.

土样经自然风干后去除植物残体、砾石等杂物,按四分法取土研磨过200目筛.土壤中Pb、Cd和As含量测定前,分别采用HF-HCl-HNO₃-HClO₄消解法和(1+1)王水提取法进行预处理.Pb和Cd全量采用WFS-120B原子吸收分光光度计测定,As全量采用AFS-3000双道原子荧光光度计测定.土壤样品分析采用国家一级标准物质GSS-1和GSS-28进行质量控制.重金属Pb、Cd和As含量分析结果的相对误差RE范围为1.4%~22.2%、1.6%~18.5%和0.5%~17.7%,标准偏差RSD范围为1.2%~16.3%、2.6%~15.0%和1.4%~12.4%,重复性样品检验结果的相对双差RD范围为0.1%~14.3%、1.5%~21.1%和0.1%~16.9%.以上样品采集和测试结果均符合规范要求^[25~28].

1.3 土壤重金属地球化学空间分布特征研究

进入土壤的重金属在自然因素和人类活动的影响下发生横向和纵向迁移,利用克里金法对原始数据进行网格化,再勾绘等值线成地球化学图,可以直观地反映出重金属在不同点位、不同土层的含量空间分布特征^[29].为了使得不同元素的地球化学图具有可对比性,采用统一的等值线尺度,即采用累积频率的分级方法,分别提取0.5%、1.5%、4%、8%、

15%、25%、40%、60%、75%、85%、92%、95%、98.5%、99.5%和100%分位数划分区并进行等量线勾绘^[28].同时,利用富集指数(EF)表征重金属在土壤垂向剖面的富集程度.当EF<1时,表示重金属无富集;EF≥1时,则定为重金属累积,EF越大,富集程度越高,受到人为输入影响越大.本研究进一步细划等级间隔为:1≤EF<1.5时,弱富集;1.5≤EF<2时,中度富集;2≤EF<3时,强富集;EF≥3时,极强富集.

$$EF = C_{sij} / C_{dij} \tag{1}$$

式中,EF为重金属元素*i*在第*j*个采样点的富集指数,*C_{sij}*为重金属元素*i*在第*j*个采样点相对浅层土壤的实测含量;*C_{dij}*为重金属元素*i*在第*j*个采样点相对深层土壤的实测含量.

1.4 数据处理方法

本研究选用Excel 2010和SPSS 25.0软件对数据进行处理和统计分析,图形处理采用Surfer 13.0和ArcGIS 10.2软件绘制.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属元素含量参数统计

土壤中3种重金属元素含量统计结果如表1所示.

表1 不同层次土壤样品Pb、Cd、和As的含量及其统计结果¹⁾

Table 1 Contents of Pb, Cd, and As in different soil layers and their statistical results										
土壤分层	元素	范围 /mg·kg ⁻¹	算数均值 /mg·kg ⁻¹	几何均值 /mg·kg ⁻¹	变异系数 /%	偏度	峰度	K-S 检验	Sig. 值	超标倍数
A	Pb	23.0~1466.1	161.4	81.4	188.1	3.39	10.7	对数正态	0.045	0.30~16.3
	Cd	0.17~0.99	0.46	0.43	39.1	1.17	1.09	对数正态	0.200	0.60~3.30
	As	0.54~33.1	5.03	3.52	116.1	3.10	10.2	对数正态	0.200	0.01~0.83
B	Pb	34.5~1534.5	200.4	104.4	158.5	3.24	11.4	对数正态	0.132	0.30~17.1
	Cd	0.21~0.85	0.47	0.45	31.9	0.41	0.03	正态	0.200	0.70~2.80
	As	0.71~30.8	5.52	3.59	115.2	2.74	8.48	对数正态	0.073	0.02~0.77
C	Pb	27.0~813.3	145.1	87.1	128.6	2.39	5.52	对数正态	0.200	0.30~9.00
	Cd	0.18~0.99	0.45	0.41	42.2	1.25	1.75	正态	0.139	0.60~3.30
	As	0.37~21.5	4.37	2.99	103.9	2.61	7.65	对数正态	0.200	0.01~0.54

1) 显著性水平为0.05

表1显示,采用K-S非参数检验法和峰度偏度联合检验法对原始数据进行正态分布检验,除A和B层重金属Pb与A层重金属As原始数据呈非正态分布外,重金属的原始数据均呈正态分布或经对数转换后呈正态分布.为减少非正态分布引起的统计误差,对不服从正态分布的原始数据,按照5%截尾剔除异常值后,A和B层重金属Pb与A层重金属As也呈对数正态分布或近似对数正态分布^[30].

工作区土壤整体呈酸性,pH值范围在4~6之间,均值为5.37.以《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中农用地

土壤重金属污染风险筛选值作参比^[31],A、B和C层土壤As均未超出筛选值,说明重金属As对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险低.Pb和Cd超标较为明显,根据各点位土壤实际pH值及农用地类型,得到A、B和C层重金属Cd的超标率分别为82.8%、86.7%和73.3%,虽然Pb超过标准值的样本数占总样本数的比率较Cd低,分别为34.4%、43.3%和36.7%,但Pb在A、B和C层土壤的最大超标倍数可达16、17和9倍,明显高于Cd(3.3、2.8和3.3倍),因而重金属Pb和Cd对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在

风险. 有研究表明, 变异系数可以反映一定区域内重金属元素的分布和污染程度的差异. 一般认为, 变异系数越大, 说明受人类活动影响越大. $CV \leq 10\%$ 为弱变异性, $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异性, $CV \geq 100\%$ 为强变异性^[32]. 工作区 A、B 和 C 层土壤重金属 Cd 含量在各样点间呈现中等变异, 空间分布离散性不显著, 较为均匀. Pb 和 As 的变异系数较高, 且偏度和峰度值也较高, 表明人类活动可能是造成空间异质性强的主要因素.

2.2 土壤中重金属元素 Pb、Cd 和 As 的地球化学分布特征

重金属元素之间的相关性在一定程度上反映了这些元素污染程度的相似性或污染元素有相似的来源. 利用 Pearson 相关系数分析 A、B 和 C 层不同重金属之间的依附关系, 结果如表 2 所示.

表 2 不同层次土壤样品重金属元素 Pb、Cd 和 As 的相关性¹⁾

Table 2 Correlations between Pb, Cd, and As in soil samples from different depths				
土壤分层	元素	Pb	Cd	As
A	Pb	1		
	Cd	0.077	1	
	As	0.783 **	0.029	1
B	Pb	1		
	Cd	0.140	1	
	As	0.894 **	0.100	1
C	Pb	1		
	Cd	-0.136	1	
	As	0.745 **	-0.016	1

1) ** 表示 $P < 0.01$ 的相关水平

表 2 显示, 矿区下游农田重金属元素 Pb 与 As 在 A、B 和 C 层土壤中均呈极显著正相关, 且相关度高, 相关系数分别为 0.783、0.894 和 0.745, 但是与 Cd 之间未呈显著相关性. 由于相关性较好的元素可能在成因和来源上有一定的关联, 推测 Pb 和 As 可能具有相同的富集途径.

运用普通克里金插值法对元素的空间分布进行研究, 由于各重金属元素之间含量差异较大, 对不同元素采用不同的分级标准. A、B 和 C 层土壤重金属元素 Pb、Cd 和 As 的空间分布特征如图 2 所示.

图 2 显示, 重金属元素 Pb、Cd 和 As 在 A、B 和 C 层土壤的地球化学空间分布特征表现出较强区域规律性. 从水平剖面看, Pb 和 As 在不同层位土壤的地球化学空间分布特征相似, 高含量点位主要集中在工作区西部靠近露天采场的区域、工作区中部两支河流交汇处、以及东部废石堆附近, 进一步表明 Pb 与 As 可能具有相同来源. A 层土壤, 重金属 Pb 和 As 的含量在两支流水交汇处出现极高值, 其含量分别为采矿场周边土壤 Pb 和 As 含量的 1.3 倍和 1.2 倍, 为废石堆场附近土壤的 1.3 倍和 1.1 倍. B 和 C 层土壤, Pb 和 As 含量在上述主要高值区域, 由西向东呈逐渐降低的趋势. 其中, B 层土壤 Pb 含量由 1534.5 降低至 373.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 含量由 30.8 降低至 7.38 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均降低了约 76%. C 层土壤 Pb 含量由 813.3 降低至 190.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, As 含量由 16.6 降低至 5.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降低幅度分别为 77% 和 68%. 重金属 Cd 的地球化学空间分布特征不同于 Pb 和 As. Cd 的含量变化总体表现为随着距矿区水

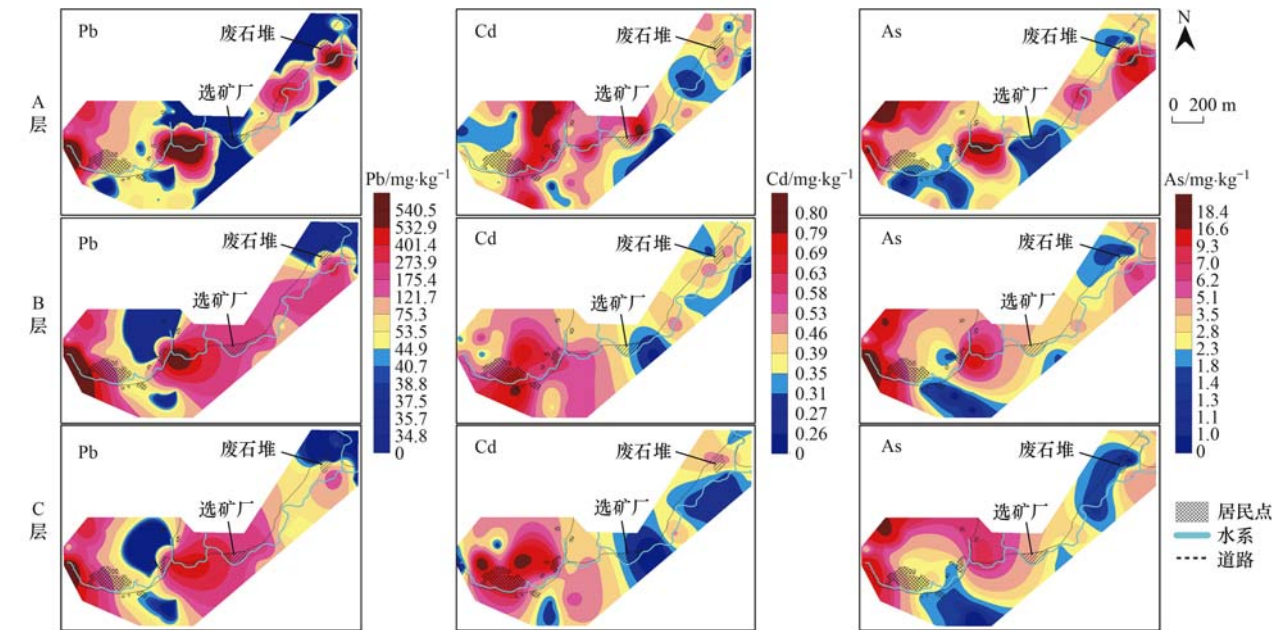


图 2 A、B 和 C 层土壤中 Pb、Cd 和 As 的地球化学空间分布特征

Fig. 2 Geochemical spatial distribution characteristics of Pb, Cd, and As in A, B, and C layer of soil

平距离的增加而降低. 各层位土壤高含量 Cd 大面积分布于西部露天采场周边,在工作区中部两支河流交汇处及东部废石堆附近含量相对较低. A 层土壤,重金属 Cd 在选矿厂附近土壤中的含量也较高,约为《标准》(GB 15618-2018)^[31]的 3.3 倍.

从垂向剖面看,同一点位 A 层土壤 Pb、Cd 和 As 与 B、C 层土壤中重金属元素含量均呈显著正相关,且相关度较高,相关关系如表 3 所示.

图 3 显示,工作区 A 层土壤 Pb、Cd 和 As 相对

表 3 Pb、Cd 和 As 含量在不同土层间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients of Pb, Cd, and As in different soil layers

项目	Pb	Cd	As
A 层与 B 层的相关系数	0.825 **	0.621 **	0.744 **
A 层与 C 层的相关系数	0.850 **	0.409 **	0.815 **
B 层与 C 层的相关系数	0.936 **	0.476 **	0.874 **

1) **表示 $P < 0.01$ 的相关水平

于 B 层的富集指数变化范围分别为 0.21 ~ 4.96、0.43 ~ 6.43 和 0.48 ~ 3.71, B 层土壤 Pb、Cd 和 As 相对于 C 层的富集指数变化范围分别为 0.56 ~ 4.19、0.26 ~ 2.18 和 0.52 ~ 2.58. 结合 3 种重金属的地球化学空间分布特征, Pb、Cd 和 As 在土壤各层位的高含量区域集中在工作区西部露天采场周边、中部两支河流交汇处、选矿厂以及东部废石堆场附近. 其中,工作区西部距离露天采场较近的区域, A 层相对 B 层土壤,重金属 Pb、Cd 和 As 呈无-弱程度富集, B 层相对 C 层土壤,呈弱-中度富集,表明靠近矿区的土壤垂向剖面上, 3 种重金属含量随深度增加呈先升高再降低的趋势. 在西部距离露天采场较远的区域、中部两支河流交汇处、选矿厂以及东部废石堆场附近, A 层土壤 Pb、Cd 和 As 存在强-极强的富集现象,重金属在垂向剖面的含量变化整体上表现为随深度增加而降低.

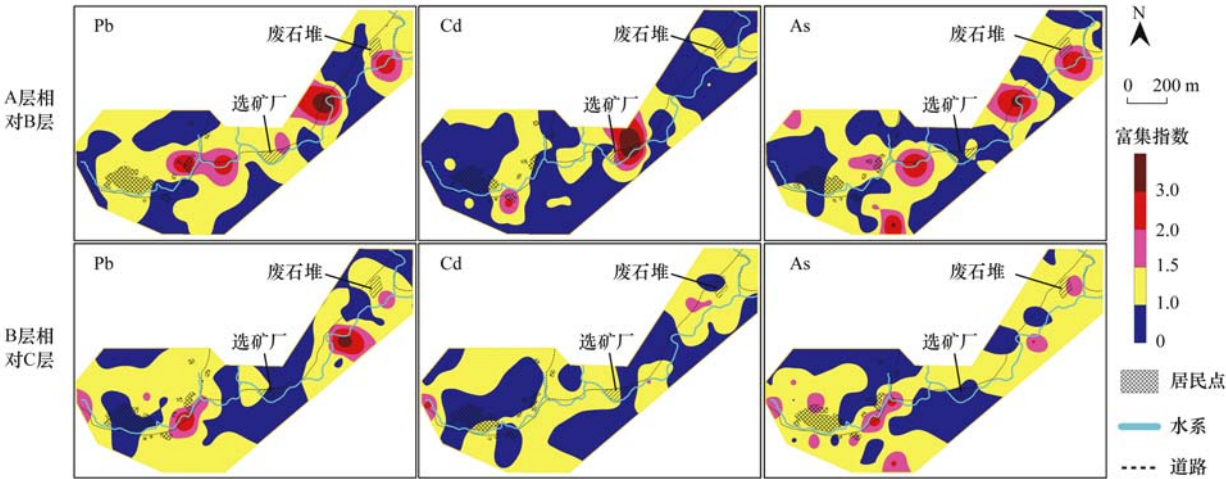


图 3 重金属 Pb、Cd 和 As 在土壤垂向剖面的富集特征

Fig. 3 Enrichment characteristics of heavy metals Pb, Cd, and As in vertical profile of soil

2.3 重金属元素在土壤及基岩中的相关性分析

土壤来自基岩的风化,与基岩(矿体)有紧密的空间和成因联系,普遍认为其化学成分对基岩化学成分有继承性,因而利用基岩-土壤重金属之间的相关性以及基岩与土壤元素的含量变化特征来判断土壤对成土母质的继承关系^[33]. 结合研究区的地质资料,识别出 64 个采样点位采集的基岩样品以花岗岩、闪长岩两种岩性为主,花岗斑岩次之. 花岗岩呈肉红色、灰色,他形粒状,粒度 3 mm 左右,由长石、石英、云母组成. 花岗斑岩为灰色、绿灰色,块状,隐晶质结构. 闪长岩为黑白颜色相间,半自形粒状,粒度大小 2 mm 左右,由白色板状或粒状斜长石、绿黑色柱状或粒状角闪石、黑色片状黑云母组成. 将不同类型的岩石与 A、B 和 C 层土壤中的重金属元素 Pb、Cd 和 As 含量进行相关性分析,结果如表 4 所示.

表 4 不同类型的岩石与土壤中重金属元素 Pb、Cd 和 As 相关性¹⁾

Table 4 Correlations between different types of rocks and heavy metal elements Pb, Cd, and As in soil

土壤分层	重金属元素	花岗岩	花岗斑岩	闪长岩
A	Pb	0.311 *	0.159	0.495 **
	Cd	-0.076	-0.163	-0.050
	As	-0.079	0.197	0.584 **
B	Pb	0.497 **	0.132	0.593 **
	Cd	-0.118	-0.251 *	-0.005
	As	0.081	-0.005	0.404 **
C	Pb	0.443 **	0.138	0.608 **
	Cd	-0.089	-0.332 **	-0.087
	As	0.051	-0.059	0.279 *

1) * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 的相关水平

表 4 显示,土壤与基岩中重金属元素含量并非简单的线性关系. 土壤重金属 Pb 和 As 基本与花岗岩、闪长岩中的含量呈显著正相关关系. 可见, Pb 和

As 在土壤中的含量变化与基岩元素含量高低有关, 地层岩性物质组成对于土壤化学成分构成的影响明显, 土壤中重金属含量在很大程度上继承了矿床及其周边母岩的特性. 重金属 Cd 在土壤与岩石中未表现出显著相关关系. 根据同一点位不同类型岩石的实测重金属含量数据及质量分数, 得到各点位岩石中的重金属 Pb 的平均含量为 $0 \sim 310.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $42.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cd 的平均含量为 $0 \sim 0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; As 的平均含量为 $0 \sim 11.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $1.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 研究区土壤与岩石中的 Pb、Cd 和 As 含量特征表明, 土壤中的重金属元素保留了部分基岩的信息, 但也表现出与基岩的差异性. 部分点位土壤中重金属由于内生环境到表生环境物理化学条件变化导致了元素再分配和迁移, 含量发生“均一化”^[33]. 部分点位母质(岩)自身具有较高含量重金属, 同时, Pb、Cd 和 As 在这些点位土壤中的含量显著高于岩石含量 ($P < 0.05$), 推断工作区土壤重金属的地球化学空间分布特征是由自然因素与人为因素共同作用的结果.

3 讨论

土壤重金属元素含量的地球化学空间分布特征受矿体规模、隐伏深度、风化作用强度、表生地球化学环境等多种因素制约^[33]. 据地质资料记载, 工作区矿床系火山沉积-热液迭加-风化淋滤型的褐铁矿. 在火山活动的间歇期, 形成了许多或者以黄铁矿为主的, 或者以赤铁矿为主的小铁矿体. 随后的热液活动, 给矿床带来了 Cu、Pb 和 Zn 等硫化物, 再经长期的剥蚀、风化淋滤而成现今的褐铁矿床. 高程分布(图 4)显示, 研究区为天然的积水洼地, 地势低. 从实地调查来看, 山间有溪流穿过, 重金属元素 Pb、Cd 和 As 在自然河流和地表径流的作用下, 由汇水区上游及周边向洼地汇集, 形成汇水盆地, 使之成为元素高富集区^[34,35].

重金属 Pb、Cd 和 As 在 A、B 和 C 层土壤的高含量区域, 自西向东主要分布于露天采场周边、河流交汇处、选矿厂以及废石堆场附近. 3 种重金属在土壤各层位高值区域的含量变化整体表现为随着与矿区水平距离的增加而逐渐降低的趋势, 可以推断, 由于河水流动, 易导致重金属的释放与迁移, 河流的沉淀自净作用使得重金属含量在空间上的释放和迁移规律呈现随地势降低而下降的特点^[36]. 工作区 A 层土壤重金属 Pb 和 As 在两支流水交汇处出现极高值, 其含量值甚至高于矿区周边, 有研究表明, 两支流水汇合后的河流弯曲地带, 由于河水流速降低, 部分处于溶解态、可交换态的重金属从河水的悬浮物或沉

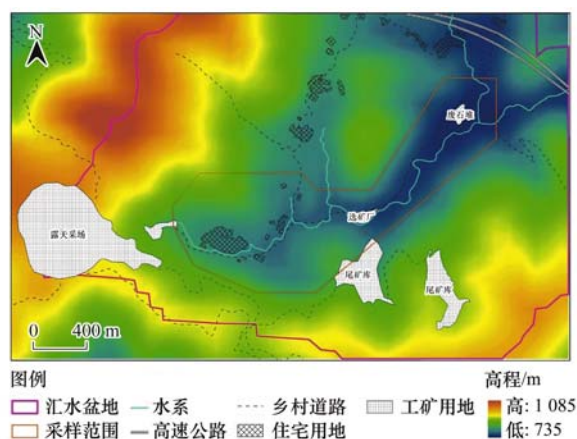


图 4 研究区汇水盆地示意

Fig. 4 Schematic diagram of catchment basin in the study area

积物中重新释放出来, 通过侧渗等方式, 可能导致该点位土壤重金属含量增加^[37].

由土壤中重金属元素之间的相关性分析可知, Pb 与 As 在 A、B 和 C 层土壤中均呈极显著正相关, 相关度高, 且在不同层位土壤的地球化学空间分布特征相似, 推测 Pb 与 As 可能具有相同来源. 结合 Pb 和 As 在不同类型基岩与土壤中的相关性结果, A、B 和 C 层土壤重金属 Pb 和 As 基本与花岗岩、闪长岩中的含量呈显著正相关关系, 可定性判断工作区土壤重金属 Pb 与 As 的地球化学空间分布特征受自然因素影响. 同时, 区域内土壤中 Pb 和 As 的变异系数较高, 偏度和峰度值也较高, 表明受到人为活动的影响, 存在点源污染. 通过进一步对比分析土壤与岩石中 Pb 和 As 的含量, 推断工作区土壤重金属 As, 主要来源于地质成因, 虽个别点位受到人为影响, 但影响程度不高. 重金属 Pb, 除继承了矿床及其周边母岩的特性外, 由于部分点位母质(岩)自身具有较高含量重金属 Pb, 且 Pb 在这些点位土壤中的含量显著高于岩石含量 ($P < 0.05$), 说明受人为作用影响大, 结合 Pb 的地球化学空间分布特征, 高含量点位集中在河流和道路两旁, 来回过往拉矿石及客货运车辆较多, 汽车尾气及轮胎磨损中气体的排放量较大, 而 Pb 常被作为机动车污染源的标志性元素^[38]. 对于重金属 Cd, 在自然地质作用中虽然丰度值一般不高, 但常常与 Pb、As 等元素密切伴生, 且 Cd 是典型的亲铜亲硫元素^[18], 因而通过 Cd 在土壤与岩石中的相关性并不能充分解释土壤 Cd 一定与自然因素无关. 采样点位的土地利用类型主要为水田、旱地和林地等农用地, 其中, 80% 以上点位 Cd 的含量甚至高于土壤风险筛选值, 推断人类活动很大程度影响了 Cd 的地球化学分布特征. 有研究表明, 重金属 Cd 是农业活动使用的化肥农药的标志性元素^[38]. 工作区各点位 Cd 在垂向剖面的分布规

律显示,除工矿业污染源(如矿区、选矿厂)外,Cd的表生富集强度较低,主要在深层土壤累积,可能是因为重金属Cd具有较强的向下迁移能力^[39]。

工作区在地表暴露环境中,硫化物矿山的开发,使得矿床形成以来的元素平衡体系被破坏,重金属随流水等迁移方式进入表生地球化学环境,与大气中O₂和H₂O发生反应,生成硫酸,在细菌参与作用下,形成酸性矿山废水(AMD),对区域地球化学环境产生根本性的影响。酸性矿山废水pH值低,一般为4.5~6.5,某些可低至2.5~3.0,甚至达2.0^[40]。矿山开采活动产生的废渣、废水等外排,导致工作区水体及土壤整体呈酸性,河流附近的土壤pH值低至4左右。河流两旁的土壤主要为农业生产用地,随河水灌溉沿岸农田、矿石长期风化和淋滤等过程,是导致耕作层土壤重金属高度富集的重要因素。随着土壤的酸化,重金属元素的水溶态和交换态含量上升,生物活性急剧提高,给农作物安全生产带来危害^[41]。同时,土壤酸化造成K、Na、Ca和Mg等盐基离子大量淋失,土壤肥力下降,养分贫瘠,土壤质量下降,不利于农作物生长。矿区重金属的地球化学空间分布特征表明,Pb、Cd和As已在距露天采场较近区域的深层土壤中富集,在其他高含量分布区,虽然重金属Pb、Cd和As的含量随深度增加呈下降趋势,但仍超出标准值,因而可能存在土壤环境生态风险。综合上述分析,应加强区水、土壤和农产品协同监测,特别是重金属Pb和Cd,必要时应当采取安全利用措施。

4 结论

(1)研究区重金属As含量未超出筛选值,A、B和C层土壤Pb含量超出农用地土壤重金属污染风险筛选值的点位(34.4%、43.3%和36.7%)低于Cd的超标率(82.8%、86.7%和73.3%),但Pb的最大超标倍数(16、17和9倍)显著高于Cd(3.3、2.8和3.3倍),因此,Pb和Cd对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险。

(2)研究区地处汇水盆地中,高含量Pb和As主要分布于工作区西部靠近露天采场的区域、中部两支河流交汇处、以及东部废石堆场附近,而Cd大面积集中于西部露天采场周边。3种重金属在土壤各层位高值区域的含量变化整体表现为随着与矿区水平距离的增加而逐渐降低的趋势。A层土壤,Pb和As的含量在两支流水交汇处出现极高值,Cd在选矿厂附近土壤中的含量也较高。

(3)同一点位Pb、Cd和As在不同土壤层位的含量均呈显著正相关,且相关度较高。在重金属高含

量分布区,Pb、Cd和As在西部距离露天采场较近的区域,含量随深度增加呈先升高再降低的趋势。在西部距离露天采场较远的区域,中部两支河流交汇处,选矿厂以及东部废石堆场附近,3种重金属含量随深度增加而降低。

(4)A、B和C层土壤与花岗岩、闪长岩中Pb和As的含量呈显著正相关关系,Pb和As继承了矿床及其周边母岩的特性。重金属As虽受到矿山开采等人为影响,但影响程度不高。研究区部分点位母质(岩)自身具有较高含量重金属,同时,土壤中Pb和Cd的含量显著高于岩石含量,甚至远远超过土壤风险筛选值,受工矿业、交通运输和农业生产等人类活动影响较大,存在点源污染,需关注其潜在生态风险。

参考文献:

- [1] Ren Z Q, Xiao R, Zhang Z H, *et al.* Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: a case study in the coastal city of Zhejiang Province, China [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019, **33** (11-12): 2109-2118.
- [2] Hadzi G Y, Ayoko G A, Essumang D K, *et al.* Contamination impact and human health risk assessment of heavy metals in surface soils from selected major mining areas in Ghana [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, **41** (6): 2821-2843.
- [3] Kolo M T, Khandaker M U, Amin Y M, *et al.* Assessment of health risk due to the exposure of heavy metals in soil around mega coal-fired cement factory in Nigeria [J]. *Results in Physics*, 2018, **11**: 755-762.
- [4] 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 等. 厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40** (8): 3764-3773.
Zhang W H, Yu R L, Yang Y J, *et al.* Migration and source analysis of heavy metals in vertical soil profiles of the drylands of Xiamen City [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (8): 3764-3773.
- [5] 王洋洋, 李方方, 王笑阳, 等. 铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40** (1): 437-444.
Wang Y Y, Li F F, Wang X Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metal contamination in surface farmland soil around a lead and zinc smelter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (1): 437-444.
- [6] 李伟迪, 崔霞霞, 曾撑撑, 等. 太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40** (11): 5073-5081.
Li W D, Cui Y X, Zeng C C, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige Canal Valley [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (11): 5073-5081.
- [7] Wu C F, Huang J Y, Minasny B, *et al.* Two-dimensional empirical mode decomposition of heavy metal spatial variation in agricultural soils, Southeast China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24** (9): 8302-8314.
- [8] 任加国, 王彬, 师华定, 等. 沱江上游支流土壤重金属污染空间相关性及其解析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**

- (3): 530-541.
- Ren J G, Wang B, Shi H D, *et al.* Spatial correlation and variation analysis of soil heavy metals contamination in upper source tributary of Tuojiang River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(3): 530-541.
- [9] 秦治恒, 师华定, 王明浩, 等. 湘江流域主要支流土壤 Cd 污染空间分布与相关性[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(8): 1399-1406.
- Qin Z H, Shi H D, Wang M H, *et al.* Spatial distribution and correlation of soil cadmium contamination in Xiangjiang River tributary basin of China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(8): 1399-1406.
- [10] 臧亮, 张贵军, 张慧, 等. 黄骅市土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(5): 337-342.
- Zang L, Zhang G J, Zhang H, *et al.* Assessment on spatial variability and pollution of the heavy metal in soil of Huanghua City[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(5): 337-342.
- [11] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, **15**(4): 163-178.
- [12] Shangguang Y X, Cheng B, Zhao L, *et al.* Distribution assessment and source identification using multivariate statistical analyses and artificial neural networks for trace elements in agricultural soils in Xinzhou of Shanxi Province, China [J]. *Pedosphere*, 2018, **28**(3): 542-554.
- [13] Avadi A, Nitschelm L, Corson M, *et al.* Data strategy for environmental assessment of agricultural regions via LCA: case study of a French catchment [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, **21**(4): 476-491.
- [14] 韩志轩, 王学求, 迟清华, 等. 珠江三角洲冲积平原土壤重金属元素含量和来源解析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(9): 3455-3463.
- Han Z X, Wang X Q, Chi Q H, *et al.* Occurrence and source identification of heavy metals in the alluvial soils of Pearl River Delta region, south China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3455-3463.
- [15] 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, *et al.* Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in southwestern China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2884-2892.
- [16] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- Shang E P, Xu E Q, Zhang H Q, *et al.* Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4670-4683.
- [17] 杨安, 王艺涵, 胡健, 等. 青藏高原表土重金属污染评价与来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 886-894.
- Yang A, Wang Y H, Hu J, *et al.* Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet plateau [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 886-894.
- [18] 宋波, 张云霞, 庞瑞, 等. 广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- Song B, Zhang Y X, Pang R, *et al.* Analysis of characteristics and sources of heavy metals in farmland soils in the Xijiang River draining of Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4317-4326.
- [19] 阿提姑·吐尔洪, 李新国, 李志, 等. 新疆博斯腾湖西岸湖滨带土壤剖面重金属分布特征及来源分析[J]. *生态科学*, 2019, **38**(6): 53-59.
- Atigul T, Li X G, Li Z, *et al.* Distribution characteristics and sources of heavy metals in soil profile of lakeside zone on the west bank of Boston lake, Xinjiang [J]. *Ecological Science*, 2019, **38**(6): 53-59.
- [20] 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞. 滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- Hong T, Kong X S, Yue X F. Concentration characteristics, source analysis, and potential ecological risk assessment of heavy metals in a peak-cluster depression area, southeast of Yunnan Province [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4620-4627.
- [21] 杨忠芳, 奚小环, 成杭新, 等. 区域生态地球化学评价核心与对策[J]. *第四纪研究*, 2005, **25**(3): 275-284.
- Yang Z F, Xi X H, Cheng H X, *et al.* The core and countermeasures of regional ecological geochemical assessment [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**(3): 275-284.
- [22] 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 等. 桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 876-885.
- Wang F P, Xiao N C, Zhou L, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals on farmland of geochemical anomaly area in southwest Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 876-885.
- [23] Siek M, Paszko T. Factors affecting coupled degradation and time-dependent sorption processes of tebuconazole in mineral soil profiles [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**: 1035-1047.
- [24] 王嘉怡, 郝立波, 赵新运, 等. 基于土壤化学成分的基岩岩石类型识别[J]. *物探与化探*, 2018, **42**(6): 1180-1185.
- Wang J Y, Hao L B, Zhao X Y, *et al.* The identification of bedrock types based on soil chemical composition [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, **42**(6): 1180-1185.
- [25] DD2005-02, 区域生态地球化学评价技术要求(试行) [S].
- [26] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行) [S].
- [27] DZ/T 0011-2015, 地球化学普查规范(1:50 000) [S].
- [28] DD2005-01, 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000) [S].
- [29] Sun Y B, Zhou Q X, Xie X K, *et al.* Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **174**(1-3): 455-462.
- [30] 王存龙, 庞绪贵, 胡圣虹, 等. 山东省烟台地区土壤重金属的生态效应——以砷为例[J]. *中国地质*, 2011, **38**(6): 1620-1630.
- Wang C L, Pang X G, Hu S H, *et al.* The ecological effects of soil heavy metals in Yantai, Shandong Province: a case study of As [J]. *Geology in China*, 2011, **38**(6): 1620-1630.
- [31] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- [32] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 270-279.

- Liu S, Wu Q Y, Cao X J, *et al.* Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 270-279.
- [33] 郝立波, 陆继龙, 马力. 浅覆盖区土壤化学成分与基岩化学成分的关系及其意义——以大兴安岭北部地区为例[J]. *中国地质*, 2005, **32**(3): 477-482.
- Hao L B, Lu J L, Ma L. Relation between the chemical compositions of residual soils and bedrocks in shallow overburden areas and its significance—a case study of the northern Da Hinggan Mountains[J]. *Geology in China*, 2005, **32**(3): 477-482.
- [34] 吴洋, 杨军, 周小勇, 等. 广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2964-2971.
- Wu Y, Yang J, Zhou X Y, *et al.* Risk assessment of heavy metal contamination in farmland soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous region, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2964-2971.
- [35] Kim S M, Choi Y, Yi H, *et al.* Geostatistical prediction of heavy metal concentrations in stream sediments considering the stream networks[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, **76**(2), doi: 10.1007/s12665-017-6394-2.
- [36] Gao L, Chen J Y, Tang C Y, *et al.* Distribution, migration and potential risk of heavy metals in the Shima River catchment area, South China[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, **17**(10): 1769-1782.
- [37] Rahman M A, Rahman S H, Chowdhury M A Z, *et al.* Impacts of low flows on heavy metal concentrations in Turag River Bangladesh[J]. *Journal of Environmental Science & Natural Resources*, 2017, **10**(2): 177-182.
- [38] Liu M X, Yang Y Y, Yun X Y, *et al.* Concentrations, distribution, sources, and ecological risk assessment of heavy metals in agricultural topsoil of the Three Gorges Dam region, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(3), doi: 10.1007/s10661-015-4360-6.
- [39] Xu M, Zheng Y, Chen W W, *et al.* Leachate properties and cadmium migration through freeze-thaw treated soil columns[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, **98**(1): 113-119.
- [40] Shabalala A N, Ekolu S O. Assessment of the suitability of mine water treated with pervious concrete for irrigation use[J]. *Mine Water and the Environment*, 2019, **38**(4): 798-807.
- [41] Moeng K. Community perceptions on the health risks of acid mine drainage; the environmental justice struggles of communities near mining fields [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2019, **21**(6): 2619-2640.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polys to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)