

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO₂协同效益评估肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM_{2.5}碳组分空间差异性来源解析武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM_{2.5}中碳质气溶胶的变化特征及来源解析桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM_{2.5}中金属元素特征及健康风险评估杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤 Cd 通量特征

杨焯宇^{1,2,3}, 李程⁴, 杨忠芳^{4*}, 张起钻⁵, 邹胜章^{1,2}, 宋淑娥⁶, 蔡贺清⁷

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 2. 广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 桂林 541004; 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 530022; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 5. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 6. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 沈阳 110032; 7. 广西壮族自治区矿产资源储量评审中心, 南宁 530028)

摘要: 广西是我国西南部典型的地质高背景区, 碳酸盐岩、黑色岩系、基性-超基性岩体与金属矿床(矿化体)强烈的风化成壤作用, 使土壤重金属镉(Cd)含量高于全国其他地区. 为了查明在地质高背景区矿业活动对耕层土壤环境质量的影响程度, 在广西贺州市选取矿业活动影响区和对照区为研究区, 系统开展了耕层土壤 Cd 输送途径及输送通量密度的对比研究. 结果表明, 在矿区 and 对照区耕层土壤中, Cd 大气干湿沉降通量密度平均值分别为 $1.87 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $1.52 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 分别占总输入通量密度的 61.5% 和 60.3%, 施肥和灌溉输入土壤 Cd 通量密度较低; Cd 的输出途径均以地表水下渗为主, 分别占总输出通量密度的 75.4% 和 86.6%, 农作物收割输出通量密度矿区高于对照区, 且矿区内种植的水稻籽实 Cd 含量超标率更高, 玉米籽实则未超标. 整体上, 矿区与对照区土壤 Cd 净输送通量密度分别为 $-3.05 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $-4.05 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 表现为土壤 Cd 淋失状态, 但大气干湿沉降输入通量密度高值点和水稻籽实 Cd 含量超标点均主要分布在矿区周围, 有可能对当地居民健康造成潜在威胁, 因此建议通过监控和种植结构调整对该区域 Cd 污染土壤进行治理.

关键词: 年净通量; 镉(Cd)积累; 耕层土壤; 矿区; 广西贺州

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1739-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303051

Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi

YANG Ye-yu^{1,2,3}, LI Cheng⁴, YANG Zhong-fang^{4*}, ZHANG Qi-zuan⁵, ZOU Sheng-zhang^{1,2}, SONG Shu-e⁶, CAI He-qing⁷

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources/ Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin 541004, China; 3. Technical Innovation Center of Mine Geological Environmental Restoration Engineering in Southern Karst Area, Ministry of Natural Resources, Nanning 530022, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 6. Liaoning Geological and Mineral Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110032, China; 7. Guangxi Mineral Resources Reserve Evaluation Center, Nanning 530028, China)

Abstract: Guangxi is a typical geological high background area in southwest China, where carbonates, black rock series, basic-ultrabasic rock mass, and metal deposits (mineralized bodies) exhibit strong weathering into loam, resulting in higher cadmium (Cd) content in the soil than that in other areas of China. In order to investigate the degree of influence of mining activities on topsoil environmental quality in the area with high geological background, we chose a mining area and control area in Hezhou for this research and systematically carried out a comparative study on Cd transport routes and transport flux density in topsoil. The results showed that the average atmospheric dry and wet deposition flux densities of Cd in the soil of the mining area and control area were $1.87 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and $1.52 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, accounting for 61.5% and 60.3% of the total input flux density, respectively. The flux density of Cd in the soil by fertilization and irrigation was lower. Surface water infiltration was the main avenue of soil Cd output in both the mining area and control area, accounting for 75.4% and 86.6% of the total output flux density, respectively. The harvest output flux density in the mining area was higher than that in the control area, and the Cd content of rice planted in the mining area was higher than the standard, whereas that of maize was safe. On the whole, the net transport flux densities of soil Cd in the mining area and control area were $-3.05 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ and $-4.05 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, both of which showed Cd leaching in the soil. However, the points of high atmospheric deposition flux density and exceeding Cd content in rice were mainly distributed around the mining area, which may have posed a potential threat to the health of local residents. Therefore, it is suggested to control the soil Cd pollution through monitoring and planting structure adjustment.

Key words: annual net fluxes; cadmium (Cd) accumulation; topsoil; mining areas; Guangxi Hezhou

镉(Cd)是一种非必需潜在有毒重金属元素,在自然界中广泛存在,会通过饮食等途径进入人体内并积累,进而损害人体健康^[1,2]. 土壤是一个开放系统,土壤中Cd的来源分为自然来源和人为来源^[3-6]. 自然来源指源于成土母质,土壤中Cd异常富集主要与富含Cd等重金属的地质体(如黑色岩系、煤系地层、基性-超基性岩体、泥页岩等)和金属硫化物矿床的风化成壤作用,以及碳酸盐岩的次生风化富集作用^[7,8]有关,而与人为活动无关,这种自然作用过程漫

长,规模巨大,所形成的区域尺度土壤Cd异常富集区即为地质高背景区^[9]. 除了由地质高背景引起土壤Cd异常富集外,人为活动导致土壤Cd的输入输出,

收稿日期: 2023-03-06; 修订日期: 2023-06-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800300); 广西典型土壤重金属生态地球化学研究项目(12120114092001); 全国土壤污染状况详查示范委托业务项目(IGGEW2018005)

作者简介: 杨焯宇(1996-),女,硕士,助理研究员,主要研究方向为重金属生态环境地球化学和农业地质, E-mail: yangyeyu@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者, E-mail: yangzf@cugb.edu.cn

特别是在工矿企业生产过程中产生的废水和废气排放及废渣和尾矿堆放等是短时间内造成土壤 Cd 含量变化的主要原因^[10,11]。汤奇峰等^[12]指出,成都经济区因采矿、冶金等活动影响使大气干湿沉降 Cd 通量密度较高;Yang 等^[4]指出,贺州市矿区表层土 $\omega(\text{Cd})$ 平均值($0.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)高于非矿区($0.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);余飞等^[13]指出,重庆市青龙镇耕地表层土壤 Cd 污染程度最高且与周边区域工业源密切相关;刘硕等^[14]指出,龙口市北部表层土 Cd 等重金属富集情况严峻,重度污染区主要分布在煤矿区域。此外,有研究表明,土壤 Cd 的输送途径包括自然作用途径,如蒸腾作用、地表水下渗与径流和土壤中元素挥发等,以及与人有关的大气干湿沉降、污水灌溉、施肥和农作物收割等^[15-18]。

1:25 万多目标区域地球化学调查和 1:5 万土地质量地球化学评价结果显示,广西壮族自治区是我国西南典型的地质高背景地区,广泛分布碳酸盐岩和黑色岩系,丰富的 Pb、Zn 等多金属硫化物矿和锡矿等矿产资源及强烈的土壤化学风化程度,使得土壤中 Cd 高度富集^[19,20],平均含量高出全国背景值 1.9 倍。Cd 在土壤中的积累是一个长期且缓慢的过程,难以监测其含量的变化,也难以在短期内预测并预防潜在的环境风险,但由于农田自身功能和人为管理的单调性,农业土壤可以在一个周期内进行调查并预测元素含量的变化。此外,以往针对区域重金属元素输送通量的研究大多基于模型模拟计算、统计年鉴相关数据提取分析和文献信息获取,很少进行系统的区域性实地采样调查和实验室分析^[21,22]。因此,为探寻在 Cd 自然高含量的背景下,人类活动能否构成影响土壤 Cd 累积与生物活性的主要因素,本文选取了广西贺州一个矿业活动影响区和对照区作为研究区,计算对比不同区域各输送途径土壤重金属 Cd 年输送通量密度,进而评价年净输入通量密度对土壤 Cd 含量及土壤环境质量的影响。本研究结果不仅为地质高背景区土地资源开发与矿山合理开采提供科学依据,还为 Cd 元素表生地球化学循环研究提供数据支持,进一步丰富了表生地球化学研究理论。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区贺州市内(东经 $111^{\circ}20' \sim 111^{\circ}53'$,北纬 $23^{\circ}49' \sim 24^{\circ}40'$),矿区位于研究区东北方,对照区位于研究区东南方,属亚热带季风气候,年平均气温 20°C ,年平均降雨量 1535.6 mm ,以丘陵和平原为主。矿区以新路、白面山和水岩坝等大型锡矿床为主,面积约为 1200 km^2 ,开采时间

为 1964~1996 年。其中,新路和白面山锡矿成矿类型属热液石英脉型矿床,主要矿物有磁黄铁矿、铁闪锌矿、毒砂、锡石、脆硫锑铅矿、石英和方解石等;水岩坝锡矿属砂卡岩型矿床,主要矿物有黑钨矿、白钨矿、锡石、磁黄铁矿、石英和萤石等。土壤类型主要为红壤和水稻土,主要岩性为碎屑岩、碳酸盐岩、酸性火成岩和第四系沉积物^[23,24]。对照区距矿区 20 km ,面积约为 330 km^2 ,远离人为污染,人类活动干扰较小,土壤类型以赤红壤、水稻土和紫色土为主,主要岩性为碎屑岩、第四系沉积物、酸性火成岩和碳酸盐岩。

1.2 样品采集与分析

本文涉及的样品种类包括大气干湿沉降物、化肥、灌溉水、下渗水、土壤剖面 and 农作物(水稻、玉米),每类样品采集、加工和处理均严格执行《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)^[25]和《区域生态地球化学评价规范》(DZ/T 0289-2015)^[26]要求。具体采样点分布见图 1。

1.2.1 布点与采样

大气干湿沉降样品:研究区共布设了 18 个大气干湿沉降采样点,其中矿区 10 个,对照区 8 个(图 1),样品收集周期 12 个月,采样点远离污染源且周围无高大树木或建筑。接尘缸为直径 25 cm 、高 65 cm 的高密度聚乙烯塑料桶。样品收集静置后,在上清液中加入 5 mL HNO_3 (1+1)溶液酸化(即一份 98% 浓硝酸加一份水,配成约 50% 的硝酸溶液),沉淀物用 $0.45 \mu\text{m}$ 聚酯纤维过滤器过滤后,记录滤液体积,滤饼在低于 65°C 的温度下干燥后记录重量。最后,将干燥后的沉淀物进行实验室分析^[27]。

化肥样品:研究区共采集了 27 件化肥样品,其中矿区 16 件(复合肥 10 件、氮肥 2 件、钾肥 2 件和磷肥 2 件),对照区 11 件(复合肥 6 件、氮肥 1 件、钾肥 2 件和磷肥 2 件)(图 1)。每件样品用 1% 的 HNO_3 溶解后,用去离子水稀释到 50 mL ,摇匀密封后送至实验室。

灌溉水:农田灌溉季节(7~8 月)在不同灌溉水系所在主要取水口采集样品。研究区共布设了 101 个灌溉水采样点,其中矿区 66 个,对照区 35 个(图 1)。每个采样点的原水样用预清洗的聚乙烯塑料瓶采集 1500 mL ,另一瓶用玻璃瓶采集 500 mL ,并加入 25 mL 浓 HNO_3 和 5 mL 浓度为 5% 的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 作为保护剂^[28]后,送至实验室。

下渗水:共采集 3 件下渗水样品,其中对照区 1 件,矿区 2 件,样品收集周期 6 个月,共 500 mL 。在每个采样点挖一个 80 cm 的坑,将 20 cm 的表土作为覆盖土移走。将高 60 cm 的储水箱放入坑内后,将覆盖塑料网、 50 mm 河沙和覆盖土的塑料分离器置于其

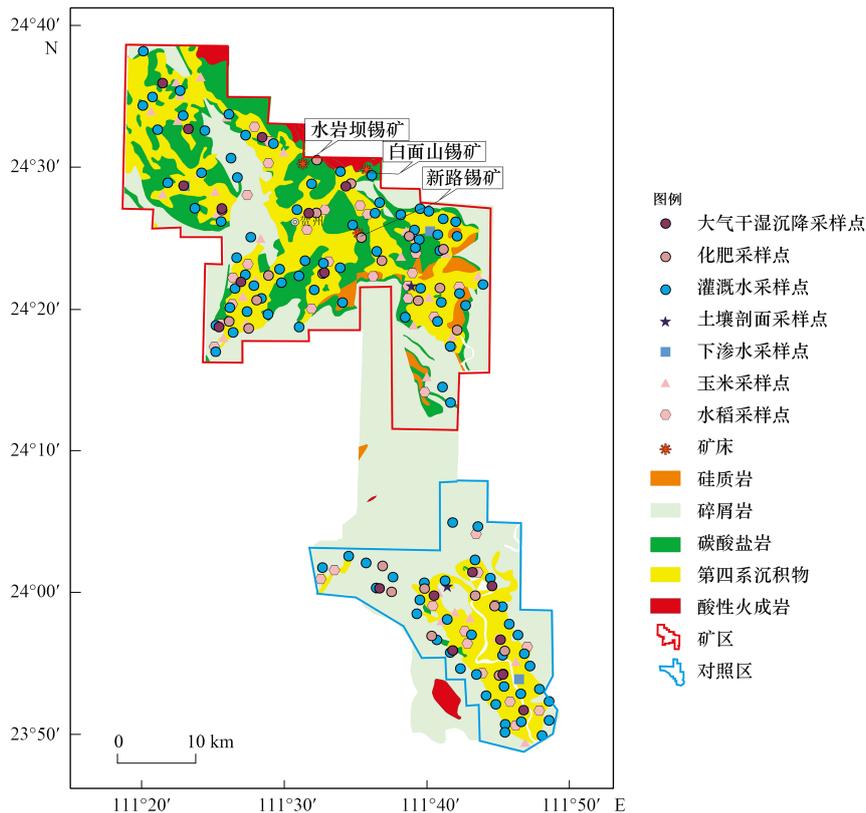


图1 研究区交通位置与样品采样点分布示意

Fig. 1 Location of traffic and sampling sites in the study area

上,并把聚丙烯管(长 100 cm,直径 2 cm)插入水箱底部,利用硅胶导管和手动真空泵采集样品^[16].样品中加入 5 mL HNO₃(1+1)溶液酸化,摇匀密封后,送至实验室.

土壤剖面:共采集 2 条土壤剖面样品,其中矿区 1 条,对照区 1 条.挖一个 1.8 m×1.5 m×2 m 深坑,自下而上每 0.2 m 逐层采集新鲜土壤剖面,每件样品约 2 kg.将采集的样品平铺于室内通风处自然风干,去除植物根系等杂物并捶打至自然粒级,过筛后送至实验室^[29].

农作物样品:研究区主要农作物品种为水稻和玉米,由于秸秆和根系大多焚烧还田,因此,只采集水稻和玉米籽实.矿区内分别采集了 24 件水稻和 26 件玉米籽实样品,对照区内分别采集了 14 件水稻和 7 件玉米籽实样品.以 80 cm×80 cm 为采样单元,农作物样品于阴凉通风处晾干脱粒,粉碎过 60 目筛网(< 0.25 mm),送至实验室测试分析^[30].

1.2.2 样品分析与质量控制

所有样品均由广西壮族自治区地质矿产测试研究中心分析检测.用 HCl、HNO₃、H₂O₂ 和 HF 的酸性混合物消化大气沉降(固)及化肥样品;用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定所有溶液样品和土壤样品中的 Cd;用微波消解法和等离子体质谱法提取

测定农作物样品中的 Cd. 各类样品 Cd 元素分析方法检出限见表 1.

表 1 各类样品 Cd 元素分析方法检出限

Table 1 Detection limits of Cd analysis methods in various samples

样品类型	单位	检出限
大气沉降(固)	mg·kg ⁻¹	0.02
大气沉降(液)	μg·L ⁻¹	0.06
化肥	mg·kg ⁻¹	0.02
灌溉水	μg·L ⁻¹	0.06
下渗水	μg·L ⁻¹	0.06
土壤剖面	mg·kg ⁻¹	0.02
农作物	mg·kg ⁻¹	0.10

在分析过程中通过标准参考样、加标回收和室内外重复样、密码样的检验控制,分析精密度和准确度,所有样品的分析精密度和准确度合格率均达到 100%,满足《多目标区域地球化学调查规范(1:2 500 000)》(DZ/T 0258-2014)要求^[31].

1.3 各输送途径通量密度计算方法

Cd 通过大气干湿沉降、化肥和灌溉水这 3 种途径进入耕层土壤中的年输入通量密度计算公式分别见式(1)~(3):

$$I_D = (c_s V_s + C_i M_i) / S \times 100 \quad (1)$$

式中, I_D 为表层土壤 Cd 大气干湿沉降年输入通量密度, $g \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$; S 为接尘缸口的面积, m^2 ; c_s 为湿沉降

物中 Cd 浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; V_s 为接尘缸中湿沉降总体积, L; C_i 为干沉降物中 Cd 含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; M_i 为接尘缸中干沉降物的总质量, g.

$$I_F = \sum_{i=1}^n C_i F_i \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中, I_F 为表层土壤 Cd 施肥年输入通量密度, $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$; i 为第 i 种化肥, n 为化肥种类; C_i 为第 i 种化肥 Cd 含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; F_i 为第 i 种化肥的年施用量, $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

$$I_W = c_w V \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, I_W 为表层土壤 Cd 灌溉年输入通量密度, $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$; c_w 为灌溉水中 Cd 浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为年灌溉水量, $\text{L}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$. 根据《广西壮族自治区 2019 年水资源公报》公布的数据, 全区农田实灌公顷均耗水量为 1.18×10^7 L, 有效利用系数为 0.501, 折合为 5.912×10^6 $\text{L}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

Cd 通过农作物收割和农田水下渗两种输出途径的年输出通量密度计算公式分别见式(4)和式(5):

$$I_R = \sum_{i=1}^n C_i R_i \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中, I_R 为农作物 i 收割后农田土壤 Cd 年输出通量密度, $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$; C_i 为农作物 i 籽实中 Cd 含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; R_i 为农作物 i 籽实年产量, $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.

$$I_L = c_i V_i \times p_a / p_6 \times 100 / S \quad (5)$$

式中, I_L 为农田水下渗后土壤 Cd 年输出通量密度, $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$; c_i 为下渗水中 Cd 浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; V_i 为下渗水体积, L; p_a 和 p_6 分别为采样点全年和 6 个月的降水量, mL; S 为采样瓶的颈口面积, cm^2 .

为研究耕层土壤中 Cd 平衡情况, 结合输入输出途径得到年净通量密度, 见式(6):

$$N = \sum \text{输入} - \sum \text{输出} \quad (6)$$

式中, $\sum \text{输入} = I_D + I_F + I_W$, $\sum \text{输出} = I_R + I_L$.

2 结果与讨论

2.1 研究区土壤 Cd 含量特征

从文献[4]可知, 矿区表层土中 Cd 含量明显高于对照区, 且 Cd 的高值异常区主要分布在矿床周围. 虽然对照区内表层土中 Cd 含量的最大值仅为矿区的 1/3, 且平均值不足矿区的一半, 但矿区和对照区表层土中 Cd 含量分别超过国家背景值 91.56% 和 65.62%, 也分别超过广西背景值 40.66% 和 10.78%, 说明研究区为地质高背景区. 为探究成土过程中自然因素是否对土壤 Cd 含量产生影响, 分别在矿区和对照区成土母质为第四系沉积物的地区各取 1 条剖面(图 2). 通过对比发现, 二者在大于 0.6 m 的深层土壤中 Cd 含量差异不大, 但矿区 0~0.2 m 表层土壤(耕

层土)中 Cd 含量显著高于对照区, 说明在成土过程中影响土壤 Cd 含量的自然因素无显著差异, 人类活动则是造成土壤 Cd 含量快速增加的主要因素.

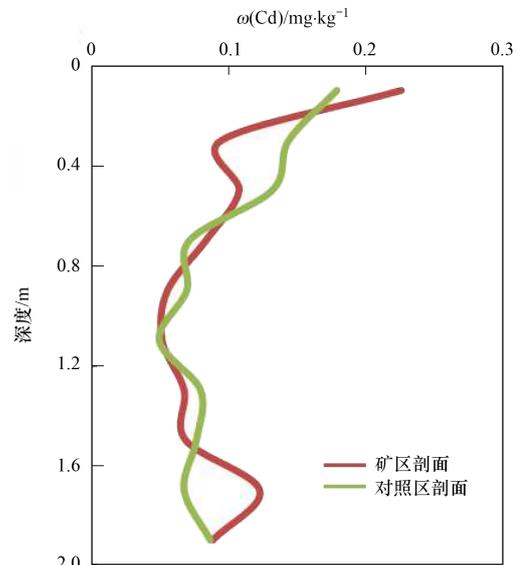


图 2 研究区土壤垂直剖面地球化学特征
Fig. 2 Geochemical characteristics of soil vertical profile in the study area

2.2 耕层土壤 Cd 输入途径及年输入通量密度

为了查清在地质高背景区引起耕层土壤 Cd 异常富集的外源输入途径, 开展耕层土壤 Cd 输入通量密度研究. 由于研究区远离固体垃圾堆放和交通干线等污染源, 输入途径仅考虑大气干湿沉降、灌溉和化肥施用.

2.2.1 大气干湿沉降 Cd 年输入通量密度

大气干湿沉降被认为是去除大气污染物的主要过程, 也是重金属元素污染表层土壤的重要途径^[32]. 经计算, 矿区内 ($n = 10$) 大气干湿沉降 Cd 年输入通量密度最小值为 $0.45 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 最大值为 $3.04 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 均值为 $1.87 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$; 对照区内 ($n = 8$) 大气干湿沉降 Cd 年输入通量密度最小值为 $0.91 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 最大值为 $2.34 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$, 均值为 $1.52 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ (图 3). 冯梦等^[33]指出, 矿区内分布钨锡矿、砂锡矿和风化型稀土矿等各类大大小小矿点, 本文图中仅标注具有代表性和规模较大的矿床. 虽然目前研究区内由大气干湿沉降带来的 Cd 输入通量密度未超过全国平均水平 [$4.0 \text{ g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]^[21], 但通过观察研究区大气干湿沉降 Cd 年输入通量密度空间分布(图 4), 可以直观地看出高值点主要分布在矿区周边, 且矿区明显高于对照区. 由于矿区内常年矿石开采和冶炼, 大型柴油机动车流量较大, 对燃煤的需求量也较大, 加上尾矿库和排土场矿渣的随意堆放^[34,35], 使矿区表层土壤和大气干湿沉降物中 Cd 含量较高, 说明人类活动是造成矿区表层土壤 Cd 含量

增加的原因之一。

张敏等^[36]通过对比湖南攸县工厂区、煤矿区和煤矿工厂区水稻田土壤 Cd 的污染情况,计算得出工厂区、煤矿区和煤矿工厂区大气干湿沉降 Cd 年输入通量密度分别为 4.20 、 0.745 和 $12.0 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,且 3 类样地的农田表土及灌溉渠底泥中 $\omega(\text{Cd})$ 平均值均超过了土壤环境质量标准 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);陶美娟等^[37]通过研究江西贵溪市某铜冶炼厂周边的农田土壤,计算得出大气干湿沉降 Cd 年输入通量密度为 $65.6 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,远高于全国平均水平。学者们对其他地区的研究亦表明在矿区和冶炼厂等人类活动强烈区会引发粉尘中 Cd 的高生态风险,进而促使 Cd 通过大气干湿沉降进入土壤,大大影响土壤的质量。

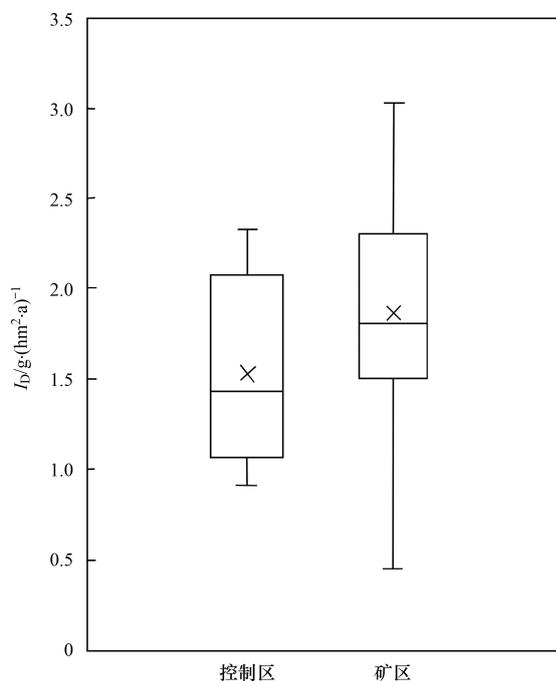


图3 研究区大气沉降 Cd 年输入通量密度

Fig. 3 Cd annual input flux density of atmospheric sedimentation in the study area

2.2.2 化肥 Cd 年输入通量密度

研究区主要施用复合肥,钾肥、氮肥和磷肥使用占比较小。各类化肥中 Cd 含量及年输入通量密度如表 2 所示。经计算,矿区 ($n = 16$) 和对照区 ($n = 11$) 内化肥 Cd 年输入通量密度分别为 0.78 和 $0.63 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,差异较小,且各类化肥中最高 Cd 含量均未超过《肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标》(GB/T 23349-2009)所规定的限值 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[38]。对比广西其他地区,如河池、崇左^[16]、北部湾经济区^[28]和中东部 9 县^[39],化肥 Cd 年输入通量密度分别为 2.11 、 2.94 、 0.022 和 $0.17 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,可见研究区化肥 Cd 年输入通量密度处于中等偏下水平。

另外,研究区各类化肥中 Cd 含量均呈现出:磷肥

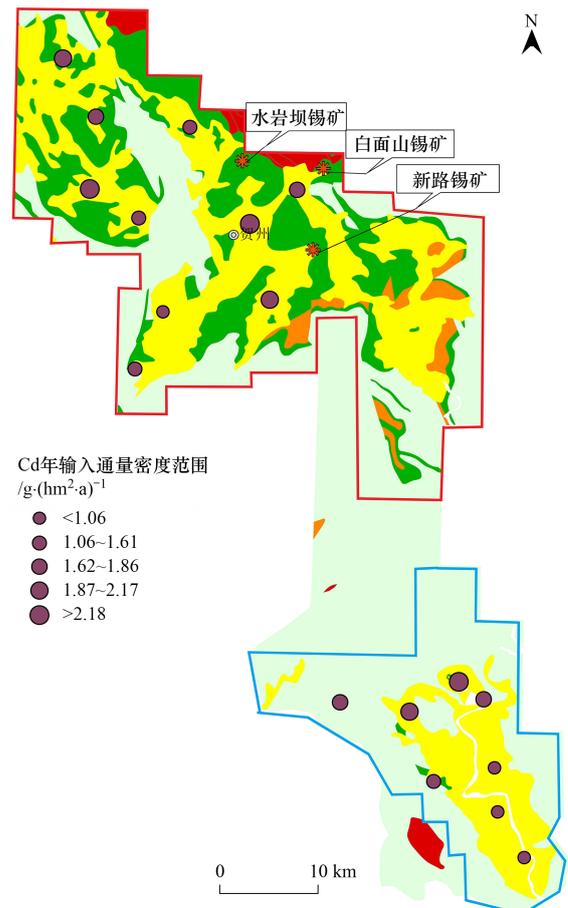


图4 研究区大气沉降 Cd 年输入通量密度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of Cd annual input flux density of atmospheric sedimentation in the study area

>复混肥>钾肥>氮肥,这主要与生产化肥的原材料有关。生产磷肥的主要原料为磷矿石,而 Cd 是磷矿石的主要伴生元素,在加工制造的过程中,部分 Cd 会随原料进入磷肥中^[39]。尽管研究区磷肥中 Cd 含量远低于欧洲国家 ($5.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[40] 和伊朗 ($8.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[41],但大量磷肥与复合肥的不合理施用,仍会造成 Cd 元素在耕层土壤中积累。Huang 等^[42]也得出相似的结论,即长期施用磷肥较施用其他种类肥料的土壤 Cd 的积累率更高。

2.2.3 灌溉水 Cd 年输入通量密度

研究区耕地主要类型为水田,灌溉耗水量较大,灌溉水中 Cd 质量浓度及年输入通量密度如表 3 所示。结果显示,矿区内灌溉水 ($n = 66$) $\rho(\text{Cd})$ 的最高值和最低值分别为 $0.46 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,对照区内 ($n = 35$) $\rho(\text{Cd})$ 的最高值和最低值分别为 $0.16 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,均低于《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)^[43]中规定的农田水警戒线 ($10 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。矿区内灌溉水 Cd 年输入通量密度最大值为 $2.72 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,最小值为 $0.35 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,平均值为 $0.39 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$;对照区内灌溉水 Cd 年输入通量

表2 研究区各类化肥中Cd含量及年输入通量密度

Table 2 Concentration of Cd and annual input flux density of various fertilizers in the study area

化肥种类	矿区			对照区		
	样品数 /件	$\omega(\text{Cd})$ /mg·kg ⁻¹	年输入通量密度 /g·(hm ² ·a) ⁻¹	样品数 /件	$\omega(\text{Cd})$ /mg·kg ⁻¹	年输入通量密度 /g·(hm ² ·a) ⁻¹
复合肥	10	0.20	0.78	6	0.15	0.63
氮肥	2	0.02		1	0.02	
钾肥	2	0.02		2	0.06	
磷肥	2	0.47		2	0.35	

密度最大值为 0.95 g·(hm²·a)⁻¹, 最小值为 0.35 g·(hm²·a)⁻¹, 平均值为 0.37 g·(hm²·a)⁻¹(表3)。矿区与对照区内灌溉水Cd年输入通量密度均值差异不显著, 但矿区内灌溉水Cd年输入通量密度最大值约是对照区的3倍。

对比前人对我国其他地区的研究数据, 如常州、南通、绍兴和江西等地区^[18]、广西中东部9县^[39]、广东大宝山地区^[44]和河北省^[45], 农田土壤灌溉水Cd年输入通量密度分别为: 0.77、0.10、3.53、0.30、

0.35、3.88和3.34 g·(hm²·a)⁻¹。整体来看, 研究区耕层土壤灌溉水Cd年输入通量密度较低, 说明区内灌溉水Cd质量浓度较低, 符合农田灌溉水质标准要求, 基本上不会对农田土壤造成潜在污染。但矿区灌溉水中 $\rho(\text{Cd})$ 平均值(0.07 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)与最大值(0.49 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)均大于对照区, 尤其是最大值是对照区的3倍多, 说明矿区局部区域, 农田灌溉是Cd进入土壤的主要途径, 也是造成矿区相对于对照区土壤Cd含量增加的原因之一。

表3 研究区灌溉水中Cd质量浓度及年输入通量密度

Table 3 Concentration of Cd and annual input flux density in irrigation water in the study area

区域	样品数 /件	$\rho(\text{Cd})/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$					年输入通量密度 /g·(hm ² ·a) ⁻¹
		最小值	中位值	平均值	最大值	标准差	
矿区	66	0.06	0.06	0.07	0.46	0.049	0.39
对照区	35	0.06	0.06	0.06	0.16	0.016	0.37

2.3 耕层土壤Cd输出途径及年输出通量密度

在表生环境下, 除Hg和Se元素外, 蒸腾作用对其余重金属元素的影响, 可忽略不计^[46]。李海华等^[47]也指出重金属元素易与土壤中的腐殖质和黏粒矿物产生各类物理化学反应, 进而被固定在表土中, 由蒸腾作用引发的输出量很小且难以统计, 一般不予考虑。由于计算通过地表径流方式Cd输出通量密度需测试水及悬浮物中Cd的质量浓度后, 再根据径流的年流量和流域面积进行估算, 且需假定流域面积内的水土流失是平均分布的^[28], 故估算值对小区域的参考意义不大。因此, 本研究区耕层土壤Cd的输出途径主要考虑农作物收割和农田水下渗。

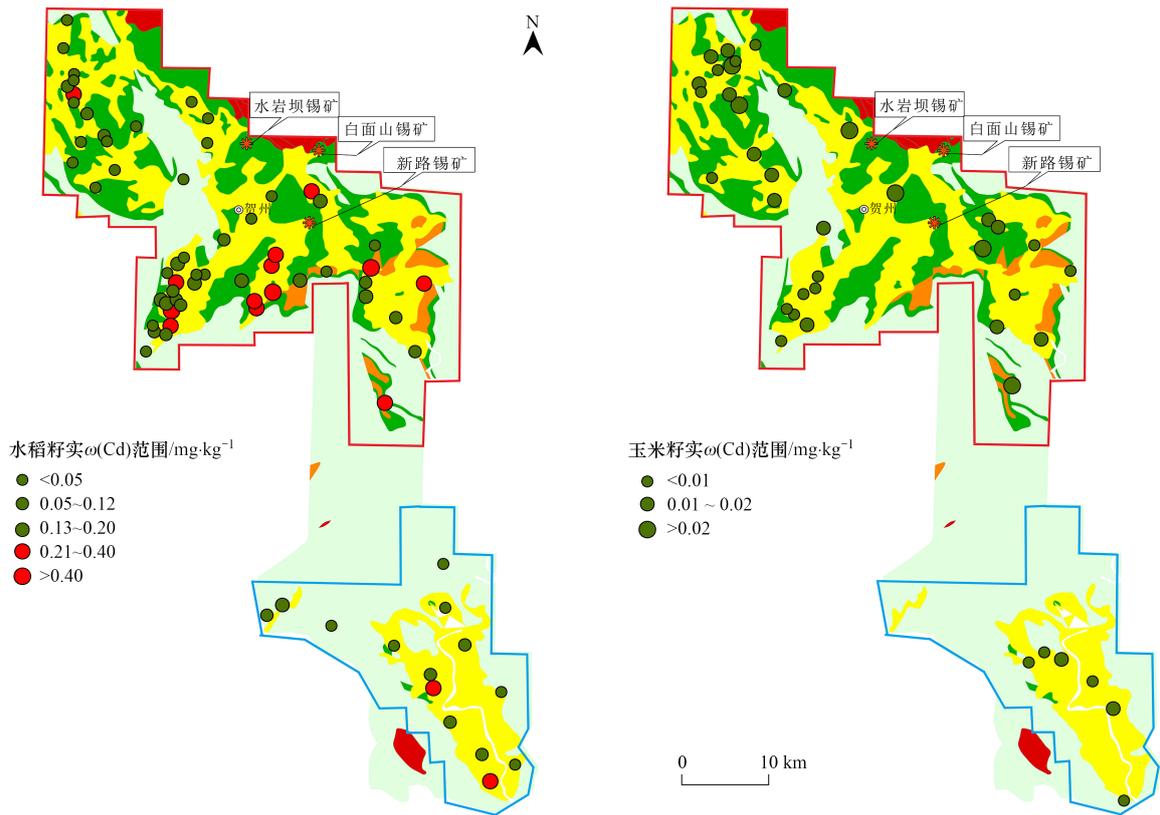
2.3.1 农作物收割Cd年输出通量密度

农作物收割是土壤Cd输出的重要途径。研究区以水稻和玉米为主要农作物, 由于其不可食用部分基本全部还田, 因此只计算可食用部分(籽实)的输出量。研究区农作物籽实样品中Cd含量及年输出通量密度见表4。从中发现, 矿区内水稻和玉米籽实Cd年输出通量密度分别为 1.28 g·(hm²·a)⁻¹和 0.22 g·(hm²·a)⁻¹, 对照区内分别为 0.80 g·(hm²·a)⁻¹和 0.08 g·(hm²·a)⁻¹, 且矿区内水稻籽实Cd的超标率高于对照区。根据研究区水稻和玉米籽实Cd含量及《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-

2017)^[48]中规定水稻(0.2 mg·kg⁻¹)和玉米(0.1 mg·kg⁻¹)籽实中Cd含量的最大限值, 绘制空间分布(图5)。从中可以直观地看出, 矿区和对照区中水稻超标率分别为24.14%和14.29%, 但玉米样品均未超标。王锐等^[49]通过对重庆市黔江区西南部的表层土壤和农作物样品分析得出, 可以通过重新区划土地提高粮食产量及土地利用; Yang等^[4]指出可以通过调整种植结构, 使贺州受采矿活动导致Cd污染的耕地资源得到充分利用; 吴桂容等^[35]通过对水岩坝矿区废弃地重金属污染的研究提出, 可以根据土壤重金属种类选取栽种富集系数较小的农作物品种, 从而实现减少农作物中重金属含量, 进而降低进入食物链的含量。因此, 从粮食安全生产和人体健康的角度出发, 由于玉米中Cd的积累量低于其他作物^[4], 建议在水稻种植超标区改种玉米。虽然水稻收割为Cd带出土壤的主要途径之一, 种植结构调整会降低Cd输出通量密度, 但最大程度保障了人体健康, 同时使土地资源得到了安全利用。

2.3.2 农田水下渗Cd年输出通量密度

当水通过降雨和灌溉进入农田后, 一部分蒸发到大气中被植物吸收, 另一部分则通过土壤孔隙向下渗透。如表5所示, 与农作物收割相比, 农田水下渗为土壤Cd主要的输出方式, 由于对照区下渗的农



绿色表示样品 Cd 含量未超标,可安全食用;红色表示 Cd 含量超标,存在安全风险

图 5 研究区水稻和玉米籽实 Cd 含量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Cd in rice and maize seeds in the study area

表 4 研究区农作物籽实中 Cd 含量及年输出通量密度

Table 4 Concentration of Cd and annual output flux density in crop seeds in the study area

区域	作物种类	样品数 /件	$\omega(\text{Cd})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	年产量 / $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	年输出通量密度 / $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$
矿区	水稻	24	0.13	9 855	1.28
	玉米	26	0.01	21 705	0.22
对照区	水稻	14	0.09	8 880	0.80
	玉米	7	0.01	8 085	0.08

田水体积大,即使 Cd 平均质量浓度低于矿区,年输出通量密度仍较高. 矿区内分布大量碳酸盐岩,对照区则以第四系沉积物为主, Li 等^[16]研究结果也指出非岩溶区内农田下渗水 Cd 输出通量密度高于岩溶区. 由于成土母质不同,且矿区周围通过重金属沉淀、深埋和雨污分流等方式对土壤进行治理,使矿区内土壤 pH 值(5.62)高于对照区(5.18). 随着 pH 值升高, H^+ 通过竞争吸附诱导金属离子释放的能力越弱, Cd 的迁移率和可浸出性就越低,从而减缓其从土壤中释

放的速率^[50]. Cd 经农田水下渗带走后,会流向土壤下层或进入地下水中,一旦 Cd 进入地下水层,它就可以被输送到河流、湖泊或海洋等水体中. 当这些水体被人类或动物饮用或通过食物链传递逐步累积时, Cd 便会对人类健康和生态系统造成潜在危害. 因此,由农田水下渗所带走的土壤 Cd 应引起人们高度关注,必要时需采取相关措施,如土壤修复^[51]、控制化肥施用量^[52]和水资源管理^[53]等,以减少土壤中的 Cd 含量.

表 5 研究区下渗水中 Cd 质量浓度及年输出通量密度

Table 5 Concentration of Cd and annual output flux density in leachate in the study area

区域	样品数 /件	$\rho(\text{Cd})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	体积 /L	年输出通量密度 / $\text{g}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$
矿区	2	1.0	2.20	4.59
对照区	1	0.8	3.49	5.69

2.4 耕层土壤Cd年净通量密度

经计算(表6),矿区和对照区耕层土壤Cd年净输入通量分别为 $-3.05 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $-4.05 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,整体表现为Cd淋失状态,且部分农作物籽实样品中Cd含量超过国家标准,仍存在潜在生态风险.矿区和对照区Cd外源年输入总通量密度分别为 $3.04 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $2.52 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,矿区略高但整体差异不大.矿区和对照区大气干湿沉降、化肥、灌溉水输入通量密度占比分别为61.5%、25.7%、12.8%和60.3%、25.0%、14.7%,输入方式均以大气干湿沉降为主.因此,降低土壤Cd等重金属累积首先应治理大气环境质量,特别在矿业开采区,人类活动会引起土壤Cd累积与环境

质量下降.矿区和对照区土壤Cd年输出总通量密度分别为 $6.09 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $6.57 \text{ g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,对照区略高.矿区和对照区中农作物收割及农田水下渗输出通量密度占比分别为24.6%、75.4%和13.4%、86.6%,农田水下渗将Cd带出土壤的年通量密度远大于农作物收割,这一结果与Hou等^[18]和Xia等^[54]研究的结果一致,表明农田水下渗是Cd迁移出耕层土壤的主要途径.由于降雨、土壤质地、土壤pH等因素影响,对照区土壤中Cd活性更高,更不易残留在土壤中.此外,Cd在土壤中的积累不仅受各种过程与因素的影响,还受到许多不确定复杂参数的控制,因此仍需要对矿区Cd的环境健康风险进行长期监测.

表6 研究区土壤Cd输送通量密度统计值

Table 6 Statistical values of soil Cd transport flux density in the study area

区域	Cd年输入通量密度 $/\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	输入方式占比/%			Cd年输出通量密度 $/\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	输出方式占比/%		年净通量密度 $/\text{g} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$
		大气沉降	施肥	灌溉		农作物收割	农田水下渗	
矿区	3.04	61.50	25.70	12.80	6.09	24.60	75.40	-3.05
对照区	2.52	60.30	25.00	14.70	6.57	13.40	86.60	-4.05

3 结论

(1)研究区Cd的主要输入途径为大气干湿沉降、化肥和灌溉水,主要输出途径为农作物收割和地下水.其中,矿区和对照区输入途径均以大气干湿沉降为主,占比分别为61.5%和60.3%;输出途径均以下渗水为主,占比分别为75.4%和86.6%.

(2)从整体上看,研究区耕层土壤Cd年净输入通量为负,表现为Cd损失.但矿区较对照区大气干湿沉降Cd年输入通量密度高,由农田水下渗方式带出的Cd则较少,从而使更多的Cd在耕层土壤中积累.

(3)大气干湿沉降Cd年输入通量密度高值点和农作物籽实Cd含量超标采样点主要分布在矿区周边,说明在矿区内人类活动是影响土壤Cd累积与生物活性的主要因素.

(4)在部分水稻籽实样品Cd超标的情况下,所有玉米籽实样品Cd均未超标,表明不同作物品种对Cd的积累能力存在差异,可以通过种植结构调整降低农作物可食部分潜在危害.

致谢:对广西壮族自治区地质矿产勘查开发局为本论文样品和原始数据采集提供的帮助,广西地质调查院对野外工作的大力支持,广西壮族自治区分析测试研究中心对实验提供的帮助,以及所有为之付出努力的参与者表示由衷的感谢.

参考文献:

[1] 王锐,胡小兰,张永文,等.重庆市主要农耕地土壤Cd生物有效性及影响因素[J].环境科学,2020,41(4):1864-1870.

Wang R, Hu X L, Zhang Y W, et al. Bioavailability and influencing factors of soil Cd in the major farming areas of Chongqing [J]. Environmental Science, 2020, 41 (4): 1864-1870.

[2] 唐启琳,刘秀明,刘方,等.贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价[J].环境科学,2019,40(10):4628-4636.

Tang Q L, Liu X M, Liu F, et al. Cd accumulation and risk assessment for arable soils in the karst region of northern Luodian, Guizhou [J]. Environmental Science, 2019, 40 (10): 4628-4636.

[3] Li C, Yang Z F, Yu T, et al. Study on safe usage of agricultural land in karst and non-karst areas based on soil Cd and prediction of Cd in rice: a case study of Heng county, Guangxi [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111505.

[4] Yang Y Y, Li C, Yang Z F, et al. Application of cadmium prediction models for rice and maize in the safe utilization of farmland associated with tin mining in Hezhou, Guangxi, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 285, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117202.

[5] Qu S Y, Wu W H, Nel W, et al. The behavior of metals/metalloids during natural weathering: a systematic study of the mono-lithological watersheds in the upper Pearl River basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 708, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134572.

[6] Gu Q B, Yang Z F, Yu T, et al. Application of ecogeochemical prediction model to safely exploit seleniferous soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 177: 133-139.

[7] 王锐,邓海,严明书,等.重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J].环境科学,2020,41(10):4749-4756.

Wang R, Deng H, Yan M S, et al. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in southern Youyang county, Chongqing [J]. Environmental Science, 2020,

- 41(10): 4749-4756.
- [8] Wen Y B, Li W, Yang Z F, *et al.* Evaluation of various approaches to predict cadmium bioavailability to rice grown in soils with high geochemical background in the karst region, southwestern China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113645.
- [9] 杨琼, 杨忠芳, 张起钻, 等. 中国广西岩溶地质高背景区土壤-水稻系统 Cd 等重金属生态风险评价[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, **51**(8): 1317-1331.
Yang Q, Yang Z F, Zhang Q Z, *et al.* Ecological risk assessment of Cd and other heavy metals in soil-rice system in the karst areas with high geochemical background of Guangxi, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **64**(7): 1126-1139.
- [10] 杨善谋. 铜陵金属矿集区土壤中 Cu、Cd 元素污染评价及其缓变型地球化学灾害研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
Yang S M. Pollution assessment and delayed geochemical hazard research of heavy metal Cu and Cd in Tongling mining soil [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [11] Puttiwongrak A, Suteerasak T, Mai P K, *et al.* Application of multi-monitoring methods to investigate the contamination levels and dispersion of Pb and Zn from tin mining in coastal sediments at Saphan Hin, Phuket, Thailand[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **218**: 108-117.
- [12] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区 As 等元素大气干湿沉降通量及来源研究[J]. *地学前缘*, 2007, **14**(3): 213-222.
Tang Q F, Yang Z F, Zhang B R, *et al.* A study of elements flux and sources from atmospheric bulk deposition in the Chengdu economic region [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, **14**(3): 213-222.
- [13] 余飞, 王佳彬, 王锐, 等. 基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2838-2848.
Yu F, Wang J B, Wang R, *et al.* Source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in the arable soil at the geological high background, based on the township scale [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2838-2848.
- [14] 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.
- [15] 涂宇. 黔西北喀斯特小流域农田土壤镉的输入输出通量和质量平衡[D]. 贵州: 贵州大学, 2020.
TU Y. Input-output fluxes and mass balance of Cd in farmland soils in a small karst watershed, northwestern Guizhou province, China [D]. Guizhou: Guizhou University, 2020.
- [16] Li C, Zhang C S, Yu T, *et al.* Annual net input fluxes of cadmium in paddy soils in karst and non-karst areas of Guangxi, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, **241**, doi: 10.1016/j.gexplo.2022.107072.
- [17] Sterckeman T, Gossiaux L, Guimont S, *et al.* Cadmium mass balance in French soils under annual crops: scenarios for the next century[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 1440-1452.
- [18] Hou Q Y, Yang Z F, Ji J F, *et al.* Annual net input fluxes of heavy metals of the agro-ecosystem in the Yangtze River delta, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 68-84.
- [19] Wu W H, Qu S Y, Nel W, *et al.* The impact of natural weathering and mining on heavy metal accumulation in the karst areas of the Pearl River basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **734**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139480.
- [20] Ji W B, Yang Z F, Yu T, *et al.* Potential ecological risk assessment of heavy metals in the Fe-Mn nodules in the karst area of Guangxi, southwest China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, **106**(1): 51-56.
- [21] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
Zhang F G, Peng M, Wang H Y, *et al.* Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, southwestern, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4197-4209.
- [22] Jiang W, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Annual input fluxes of heavy metals in agricultural soil of Hainan Island, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(13): 7876-7885.
- [23] 刘文龙, 袁奎荣. 广西新路—水岩坝锡矿床的矿质来源与锡的萃取机制[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1989, **9**(3): 283-291.
Liu W L, Yuan K R. On the source of ore-forming materials and tin enrichment mechanism of Xinlu-Shuiyanba tin deposits, Guangxi [J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 1989, **9**(3): 283-291.
- [24] 顾晟彦, 华仁民, 戚华文. 广西新路-水岩坝锡矿田的成因探讨[J]. *矿床地质*, 2007, **26**(3): 265-276.
Gu S Y, Hua R M, Qi H W. A genetic study of Xinlu-Shuiyanba W-Sn Orefield, northeast Guangxi [J]. *Mineral Deposits*, 2007, **26**(3): 265-276.
- [25] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [26] DZ/T 0289-2015, 区域地球化学评价规范[S].
- [27] Yi K X, Fan W, Chen J Y, *et al.* Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 67-76.
- [28] 姜伟. 北部湾周边地区农田土壤潜在有害元素生态地球化学评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Jiang W. Potential hazardous element geochemistry in agro-ecosystem of areas around Beibu Gulf [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- [29] 王锐. 典型富硒区硒镉来源与土地安全区划研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
Wang R. Study on selenium and cadmium sources and land safety zoning in typical Se-enriched areas [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [30] 杨焯宇. 广西贺州锡矿区土壤镉地球化学特征与土地安全利用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
Yang Y Y. Geochemical characteristics of soil Cd and zoning of land safety use in Hezhou tin mining area of Guangxi [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [31] DZ/T 0258-2014, 多目标区域地球化学调查规范(1: 250 000)[S].
- [32] 杨忠芳, 成杭新, 奚小环, 等. 区域生态地球化学评价思路及建议[J]. *地质通报*, 2005, **24**(8): 687-693.
Yang Z F, Cheng H X, Xi X H, *et al.* Regional ecological geochemical assessment: ideas and prospects [J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, **24**(8): 687-693.
- [33] 冯梦, 许成, 王睿, 等. 南岭西段姑婆山-花山花岗岩基差异剥蚀机理与风化矿床分布特征[J]. *大地构造与成矿学*,

- 2015, **39**(4): 670-679.
- Feng M, Xu C, Wang R, *et al.* Differential erosion of the Guposhan-huashan batholith in western Nanling mountains and distribution of weathered ore deposits [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, **39**(4): 670-679.
- [34] 刘睿, 黄艺, 王丽, 等. 西南典型矿业城市土壤及近地表大气尘中重金属污染特征及评价-以攀枝花市为例[J]. *矿物岩石*, 2019, **39**(3): 111-119.
- Liu R, Huang Y, Wang L, *et al.* Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in soil and near-surface atmospheric dust of typical mining city in southwest China—a case study for Panzhihua city[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2019, **39**(3): 111-119.
- [35] 吴桂容, 解庆林, 曲芬霞, 等. 广西水岩坝钨锡矿废弃地重金属污染与生态修复[J]. *贵州农业科学*, 2012, **40**(1): 171-174.
- Wu G R, Xie Q L, Qu F X, *et al.* Soil heavy metal pollution and ecological restoration in the abandoned land of tungsten/stannum mine in Shuiyanba, Guangxi[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2012, **40**(1): 171-174.
- [36] 张敏, 王美娥, 陈卫平, 等. 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1425-1430.
- Zhang M, Wang M E, Chen W P, *et al.* Characteristics and inputs of Cd contamination in paddy soils in typical mining and industrial areas in Youxian county, Hunan province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1425-1430.
- [37] 陶美娟, 周静, 梁家妮, 等. 大型铜冶炼厂周边农田区大气重金属沉降特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(7): 1328-1334.
- Tao M J, Zhou J, Liang J N, *et al.* Atmospheric deposition of heavy metals in farmland area around a copper smelter[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(7): 1328-1334.
- [38] GB/T 23349-2009, 肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标[S].
- [39] 陈雪, 杨忠芳, 陈岳龙, 等. 广西中东部9县区农田土壤Cd输入通量研究[J]. *物探与化探*, 2020, **44**(4): 820-829.
- Chen X, Yang Z F, Chen Y L, *et al.* Selenium input flux in farmland soil of 9 counties in the middle east of Guangxi [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, **44**(4): 820-829.
- [40] Atafar Z, Mesdaghinia A, Nouri J, *et al.* Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **160**(1-4): 83-89.
- [41] Smolders E. Scientific aspects underlying the regulatory framework in the area of fertilisers-state of play and future reforms [EB/OL]. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2016/595354/IPOL_IDA\(2016\)595354_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2016/595354/IPOL_IDA(2016)595354_EN.pdf), 2023-03-06.
- [42] Huang Q Q, Yu Y, Wan Y A, *et al.* Effects of continuous fertilization on bioavailability and fractionation of cadmium in soil and its uptake by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **215**: 13-21.
- [43] GB 5084-2021, 农田灌溉水质标准[S].
- [44] 陈强, 马明杰, 游远航, 等. 广东大宝山矿区附近农田土壤镉元素输入通量研究[J]. *华南地质与矿产*, 2020, **36**(2): 147-152.
- Chen Q, Ma M J, You Y H, *et al.* Cadmium input flux in farmland soil near the Dabaoshan mining area of Guangdong province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2020, **36**(2): 147-152.
- [45] 刘洪微. 太行山山前平原土壤环境中Cd、Hg、Pb地球化学背景及通量研究[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2010.
- Liu H W. Research on geochemical background and flux for cadmium, mercury and lead in soil environment in the piedmont region of Taihang mountain [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics, 2010.
- [46] 汤奇峰, 杨忠芳, 张本仁, 等. 成都经济区农业生态系统土壤镉通量研究[J]. *地质通报*, 2007, **26**(7): 869-877.
- Tang Q F, Yang Z F, Zhang B R, *et al.* Cadmium flux in soils of the agroecosystem in the Chengdu economic region, Sichuan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, **26**(7): 869-877.
- [47] 李海华, 刘建武, 李树人, 等. 土壤-植物系统中重金属污染及作物富集研究进展[J]. *河南农业大学学报*, 2000, **34**(1): 30-34.
- Li H H, Liu J W, Li S R, *et al.* The present progress of research on heavy metal pollution and plant enrichment in soil-plant system [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2000, **34**(1): 30-34.
- [48] GB 2762-2017, 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].
- [49] 王锐, 余京, 李瑜, 等. 地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4190-4198.
- Wang R, Yu J, Li Y, *et al.* Zoning and safe utilization method of heavy metal contaminated cultivated land at block scale [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4190-4198.
- [50] Duan Y R, Yang Z F, Yu T, *et al.* Geogenic cadmium pollution in multi-medians caused by black shales in Luzhai, Guangxi [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.enpol.2019.113905.
- [51] 丁园, 敖师营, 陈怡红, 等. 4种钝化剂对污染水稻土中Cu和Cd的固持机制[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 4037-4044.
- Ding Y, Ao S Y, Chen Y H, *et al.* Immobilization mechanism of four types of amendments on Cu and Cd in polluted paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 4037-4044.
- [52] 伍港繁, 周航, 唐棋, 等. 肥料调控强化象草对重度Cd污染农田修复效果[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5761-5768.
- Wu G F, Zhou H, Tang Q, *et al.* Effects of strengthening *Pennisetum purpureum* Schumach with fertilizer application strategy on remediation of severely cadmium-polluted farmland [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5716-5768.
- [53] 李晓曼, 李青青, 杨洁, 等. 上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5687-5697.
- Li X M, Li Q Q, Yang J, *et al.* Compound pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soil and groundwater of typical industrial lands in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5687-5697.
- [54] Xia X Q, Yang Z F, Cui Y J, *et al.* Soil heavy metal concentrations and their typical input and output fluxes on the southern Song-nen plain, Heilongjiang province, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, **139**: 85-96.

CONTENTS

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