

撒拉溪石漠化治理示范区土壤-作物系统中重金属含量特征

姚成斌, 周明忠, 熊康宁, 杨桦, 张迪, 杨连升, 王贵云

引用本文:

姚成斌, 周明忠, 熊康宁, 等. 撒拉溪石漠化治理示范区土壤-作物系统中重金属含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1256-1267.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1267>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

常规方法对新疆地方土壤元素空间分析及重金属风险评价

蒲佳, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 刘文

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1166-1176 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1284>

北京市平谷应急水源地周边农业土壤中重金属分布及风险评价

唐磊, 张会昌, 季宏兵, 冯金国, 姚俊, 闫广新

农业环境科学学报. 2015(10): 1897-1904 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.009>

三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评价——以青海省玉树县为例

何林华, 高小红

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1071-1080 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.008>

准东煤田周边农田土壤重金属污染生态风险评估与来源分析

李乔, 王淑芬, 曹有智, 王卫, 洪成林

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1537-1543 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1639>

沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价

安婧, 宫晓双, 陈宏伟, 魏树和

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 37-44 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

姚成斌, 周明忠, 熊康宁, 等. 撒拉溪石漠化治理示范区土壤-作物系统中重金属含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1256–1267.

YAO Cheng-bin, ZHOU Ming-zhong, XIONG Kang-ning, et al. Characteristics analysis of heavy metal content in the soil-crop system in the rocky desertification control demonstration area in Salaxi, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1256–1267.



开放科学 OSID

撒拉溪石漠化治理示范区土壤-作物系统中重金属含量特征

姚成斌¹, 周明忠^{1*}, 熊康宁², 杨桦¹, 张迪^{1,3}, 杨连升¹, 王贵云¹

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001; 3. 昭通学院地理科学与旅游学院, 云南 昭通 657000)

摘要:为揭示喀斯特高原山地石漠化治理示范区土壤和农作物系统中重金属(V、Sb、Mo、Tl、U和Mn)污染特征及来源,通过采集毕节市七星关区撒拉溪示范区土壤和农作物(玉米、马铃薯、刺梨、青菜、核桃和大蒜)样品进行重金属含量分析,采用地累积指数法和潜在生态风险评价法评价了土壤中重金属的污染风险;并运用地统计分析和GIS相结合的方法得出示范区重金属的空间分布与成土母岩、煤矿开采及铅锌矿冶炼之间的关系。结果表明:林地土壤Mo平均含量略高于背景值,其余均在背景值以下;旱地土壤V、Mo和Mn平均含量与背景值相当,Sb、Tl和U均低于背景值。林地土壤Mo和旱地土壤V为轻度污染,其他均无污染。农作物中Mn和V平均含量显著高于其他元素,特别是马铃薯,平均Mn含量高达314.20 mg·kg⁻¹,存在一定风险。农作物中Mn和Mo的富集系数高于其他元素,U的富集系数最低。潜在生态风险评价结果表明,示范区土壤重金属Mo单项潜在生态危害指数为22.64,存在中等生态危害;综合潜在生态危害均为轻微生态危害,危害等级较低。主成分分析将示范区重金属来源分为2类,Sb、V、Mn、Tl和U主要来源于成土母岩的风化,部分受铅锌矿冶炼影响,Mo主要来源于煤矿开采,同时受母岩风化影响;从空间分布来看,各重金属元素含量值空间分布特征与主成分分析结果基本一致。

关键词:土壤重金属;农作物;多元统计分析;空间分布;生态风险

中图分类号:S154.4;X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2021)06-1256-12 **doi:**10.11654/jaes.2020-1267

Characteristics analysis of heavy metal content in the soil-crop system in the rocky desertification control demonstration area in Salaxi, Guizhou Province, China

YAO Cheng-bin¹, ZHOU Ming-zhong^{1*}, XIONG Kang-ning², YANG Hua¹, ZHANG Di^{1,3}, YANG Lian-sheng¹, WANG Gui-yun¹

(1. School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. School of Karst Science, Guizhou Normal University/State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China; 3. School of Geographic Science and Tourism, Zhaotong University, Zhaotong 657000, China)

Abstract: To explore the pollution characteristics and sources of heavy metals (V, Sb, Mo, Tl, U, and Mn) in agricultural soils and crops in the Karst rocky desertification control demonstration area of the Karst Plateau-Gorge, soil and crop (maize, potato, *Rosa sterilis*, pakchoi, walnut, and garlic) samples from Salaxi, Bijie, Guizhou Province were collected and analyzed. The geoaccumulation index and potential ecological risk were calculated to assess the pollution risk of soils. Furthermore, geostatistical analysis and GIS were used to evaluate the distribution characteristics of the heavy metals in soils affected by the natural parent materials, coal mining, and lead-zinc smelting. The

收稿日期: 2020-11-03 录用日期: 2021-02-22

作者简介: 姚成斌(1993—), 男, 贵州威宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为喀斯特地区土壤重金属生态风险评价。E-mail: 1980020043@qq.com

*通信作者: 周明忠 E-mail: mingzhongzhou@126.com

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题(2016YFC0502601); 贵州省研究生教育创新计划项目(GZSJ2016J04)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China in the 13th Five-year Plan (2016YFC0502601); The Postgraduate Education Innovation Program of Guizhou Province (GZSJ2016J04)

results showed that: The average content of Mo in forest soil was slightly higher than the background value, and the rest of the heavy metals were below the background value. The average V, Mo, and Mn content in upland soil was equivalent to the background value, while Sb, Tl, and U were lower than the background values. The forest were slightly polluted by Mo, and the dryland soils were slightly polluted by V, respectively, whereas the other soils were not polluted. The average content of Mn and V in crops was significantly higher than that of other elements, particularly in potatoes, with a concentration of $314.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ on a dry weight basis. The enrichment coefficients of Mn and Mo in crops were higher than other metals, and U had the lowest. The potential ecological risk assessment results showed that the single potential ecological risk index of Mo in the demonstration area's soil was 22.64, indicating a medium ecological hazard; the comprehensive potential ecological risk of heavy metals in the demonstration area's soil was minor, and the risk level was extremely low. The sources of heavy metals were mainly classified into two categories according to a principal component analysis: Sb, V, Mn, Tl, and U, classified in PC1, mainly originated from natural parent material, partly affected by lead-zinc smelting; Mo in PC2, was mainly affected by coal mining and also by weathering of the parent rock. From a spatial distribution perspective, each heavy metal's spatial distribution characteristics were consistent with the principal component analysis results.

Keywords: soil heavy metals; crops; multivariate statistical analysis; spatial distribution; ecological risk

农业土壤重金属元素污染对粮食安全和土壤环境质量的影响引起了世界范围内的广泛关注^[1-4],尤其在发展中国家,土壤污染较为严重^[5-6]。重金属主要通过母质风化和人类不合理的生产活动进入生态系统,然后通过食物链进入人体并不断在人体中累积,对于人类健康和区域生态系统平衡具有较大的影响^[7-10]。重金属具有持久性和非生物降解性的特点,因而具有较高的生物毒害作用^[11-12]。

高地质背景区母岩的风化可能使其形成的土壤具有显著的重金属富集特征^[13]。畅凯旋等^[14]的研究发现,喀斯特地区由于其特殊的地貌及成土母质,土壤重金属含量显著高于其他非喀斯特地区。杨奇勇等^[15]利用经典统计学和普通克里格法对云南广南县典型喀斯特地区土壤重金属含量的空间变异性进行了分析,结果显示喀斯特地区土壤重金属含量显著高于非喀斯特地区,各重金属元素之间具有显著的相关性。孙子媛等^[16]采用内罗梅综合污染指数法对贵州罗甸县喀斯特碳酸盐岩区土壤重金属污染状况进行评估,结果表明,碳酸盐岩区石灰土重金属元素超标程度严重,而碳酸盐岩和泥质岩风化的地带性黄壤重金属元素超标程度不显著。由此可见,喀斯特碳酸盐岩地区土壤重金属污染问题普遍存在,开展喀斯特地貌区土壤重金属污染评价显得尤为必要。

毕节撒拉溪石漠化治理示范区是西南地区典型的轻度-中度石漠化地区,示范区地表破碎,人地矛盾突出,生态环境脆弱。针对示范区生态环境的改善已有了大量的研究,例如,王璐等^[17]对示范区不同经济树种及对应土壤中C、N、P和K含量及生态化学计量特征研究发现,凋落物中生态化学计量最高,其次

是叶片,根区土壤最低;熊康宁等^[18]在对示范区石漠化演变机制、地下漏失阻控、资源优化调控、植被群落生态修复和生态产业协同耦合机制研究的基础上,对示范区石漠化综合治理与混农林业复合经营、生态经济集约经营、生态产业规模经营、生物医药、生物能源和山地旅游的研究取得了突破性进展。最近,研究者们评估了该区土壤-农作物中Cr、Co、Cu、Cd、Pb、Zn、As和Ni的污染程度^[19]。而目前对示范区耕地土壤、石漠化治理衍生产业经济作物及区内居民自种蔬菜中重金属(V、Sb、Mo、Tl、U和Mn)污染状况调查和评价的研究尚未见到,这些元素的积累同样具有潜在危害。示范区原有零星的煤矿开采和铅锌矿冶炼,煤矿开采产生的围岩碎石及铅锌矿冶炼后产生的废渣被随机堆放于耕地附近,可能对示范区生态环境造成影响。因此,本研究运用地统计分析和GIS相结合的方法得出示范区重金属的空间分布与成土母岩、煤矿开采及铅锌矿冶炼之间的关系,掌握示范区耕地土壤及农作物重金属污染状况,为示范区衍生产业布局、土地资源合理利用和生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

撒拉溪示范区位于贵州省毕节市西部的撒拉溪镇和野角乡境内,属六冲河流域支流区,地理坐标为 $105^{\circ}02'01'' \sim 105^{\circ}08'09''\text{E}$ 、 $27^{\circ}11'36'' \sim 27^{\circ}16'51''\text{N}$,距离毕节市约30 km,海拔在1 500~2 200 m。示范区总面积8 627.19 hm^2 ,喀斯特地貌占示范区总面积的78%。气候类型属于北亚热带湿润季风气候,年平均降雨量为984.40 mm,年平均气温12.8 $^{\circ}\text{C}$ 。土壤类型

以黄壤、黄棕壤和石灰岩土为主。在地质构造上,撒拉溪示范区位于扬子准地台西缘黔北台隆的遵义断拱毕节地区北东-南西向构造变形区,区内北东-南西西向褶皱和断裂构造发育,出露地层主要为二叠系栖霞组和茅口组,部分出露的有二叠系梁山组。区内二叠系栖霞组和茅口组岩性以泥晶生屑灰岩和生屑泥晶灰岩为主,梁山组岩性为黏土岩、石英砂岩及含煤岩系^[20]。示范区内居民点呈散状分布,示范区北部主要生长的植物有马尾松、杉、蒿类、狗尾草、野菊等,且具有较丰富的煤炭资源,已有数十年的开采历史,矿点主要分布于茅坪村铁匠寨附近,开采出的煤矸石被随机堆放于矿坑周边的森林及耕地附近;南部以旱地种植玉米、马铃薯、豆类、核桃和刺梨为主^[21]。示范区中部偏南区域原有一铅锌矿冶炼厂,冶炼后的废渣被随机堆放于耕地附近,可能对当地生态环境造成污染。

1.2 样品采集与分析

采样前查阅示范区相关文献,了解示范区土地利用类型及主要农作物类型,采样采用多点混合采样方法,随机选择1 m²的样地范围内按“梅花形”于样地的四周和中间布设5个采样点,5个子样组合为一个样

品,用木铲采集(0~20 cm)表层土壤子样,将采集的土样充分混合,初步去除明显的杂物,采用四分法取500 g土壤作为一个样品,装入样品袋中依次进行编号。共采集表土壤样品59个(图1),其中林地土壤11个,旱地土壤48个。于部分土壤样品采样点上采集马铃薯样品8个、玉米样品3个、青菜样品3个、大蒜样品2个、核桃样品7个、刺梨样品4个,农作物样品共27个,每个样品质量1~2 kg。

土壤样品经室内自然风干,剔除杂物(植物根系和石块)后,采用玛瑙研磨机研磨后过200目尼龙筛备用。采用HNO₃-HCl-HClO₄-HF四酸消解法进行前处理并进行适当稀释。使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,型号Agilent 7900,美国)测试样品中V、Sb、Mo、Tl、U和Mn含量。测试过程中加入空白,采用平行样品,重复3次测定,相对标准偏差控制在5%以下,并采用国家一级土壤标准物质GSS-26(GBW07455)进行质量控制,检出限为0.01 mg·kg⁻¹,达到《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)检出要求,各重金属的回收率均大于85%。农作物样品带回实验室先用自来水冲洗去除其表面污物,然后用去离子水冲洗3次,

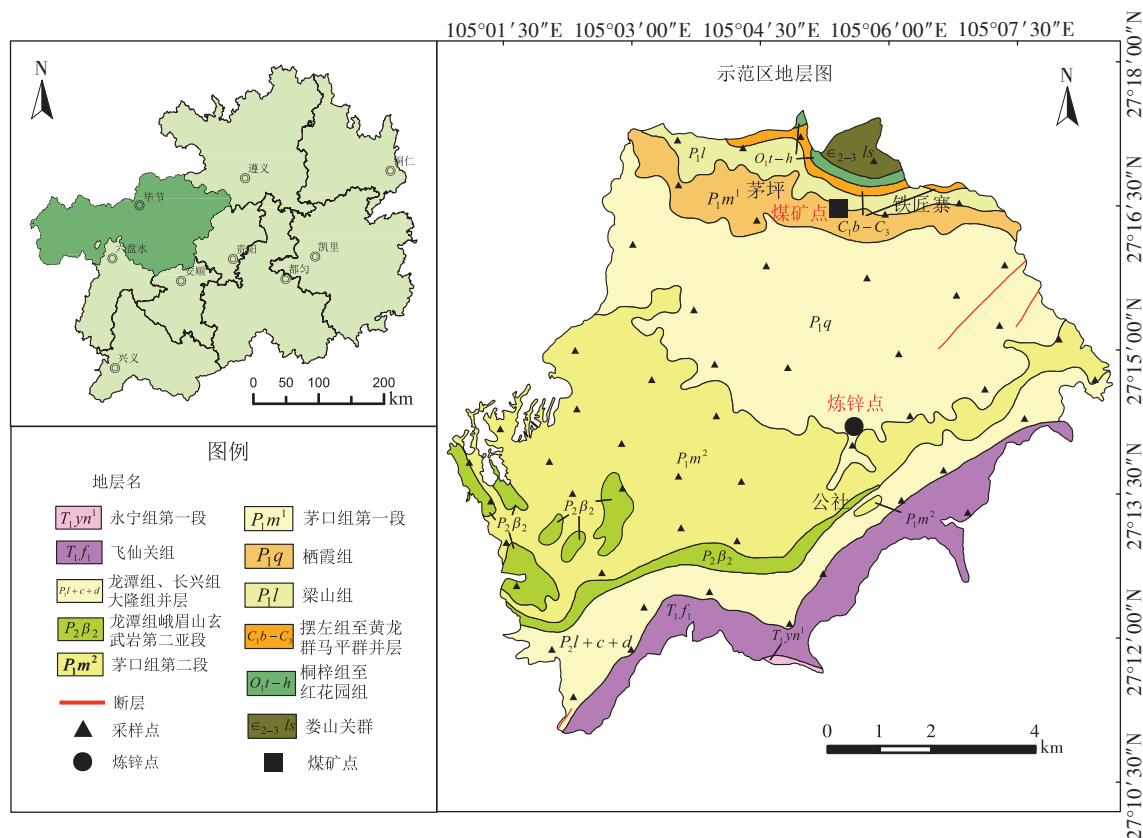


图1 示范区地质概况及采样点分布

Figure 1 Geology of demonstration area and sampling sites of the soils and crops

沥去水分后在室温下自然晾干,再在110℃杀青机内杀青0.5 h,然后在70℃恒温箱内烘24 h,最后将烘干的样品研磨后过100目尼龙筛。每个样品精确称取0.5 g,采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ ($V:V=2:1$)消解后,用ICP-MS(Agilent VISTA,美国)测定样品中V、Sb、Mo、Tl、U和Mn含量。为了保证分析结果的准确性,进行样品测试时,每批样品设置空白试验和平行样品,利用GSB-24(GBW10046)进行质量控制。采用国家标准植物样品(CSV-3)进行回收,回收率范围为95%~100%,符合分析质量控制要求。土壤和农作物样品分析实验均在澳实分析检测(广州)有限公司澳实矿物实验室完成。

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法由德国科学家Muller于1969年提出,当时主要用于水环境沉积物重金属污染物评价^[22],后来在土壤重金属污染研究领域得到广泛应用^[23-24]。其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \text{Log}_2 \frac{C_i}{k \times B_i} \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重金属 i 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_i 为所测元素 i 的土壤环境背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; k 为各地成岩作用可能引起背景值变化的修正系数,一般为1.5,本研究亦取1.5。Muller地累积指数分为7个等级,分别为: $I_{\text{geo}} \leq 0$,无污染; $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$,轻度污染; $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$,中度污染; $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$,中度污染-重度污染; $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$,重度污染; $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$,重度-极度污染; $I_{\text{geo}} > 5$,极度污染。土壤重金属 i 的 I_{geo} 值越大,表明污染越严重。

1.3.2 潜在生态风险指数法

该生态风险模型由研究者Hakanson提出,根据重金属毒性和环境响应评估土壤污染等级^[25]。它的主要功能是识别污染物的种类,确定污染研究的重点。计算公式如下所示:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_f^i), C_f^i = C_i^i / C_0^i \quad (2)$$

式中: RI 为土壤中重金属所有风险值总和; E_r^i 为单项生态风险值; T_r^i 为重金属的毒性响应系数,V、Sb、Mo、Tl、U和Mn的毒性响应系数^[26-30]分别为2、1、15、9、20和1, C_f^i 为单一重金属的污染系数; C_0^i 为该元素的参比值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本研究采用贵州省土壤环境背景值作为参照标准^[31]; C_i^i 为土壤重金属含量实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; n 为重金属数量。大多数学者在应用该方法对土壤重金属污染进行评价时,直接应用其等级划分标准,没

有考虑重金属的种类和毒性大小对等级划分标准的影响。本研究根据Hakanson的研究结合徐争启等^[26]和李一蒙等^[32]的调整方法对潜在生态风险指数(E_r^i)和综合潜在生态风险指数(RI)的风险等级划分标准进行调整。调整方法如下:根据Hakanson的研究, E_r^i 值风险分级的第一级上限值由非污染的污染系数($C=1$)与参评污染物中最大毒性系数相乘得到,其他风险级别的上限值分别用上等级的分级值乘2得到。U的毒性系数最大(20),得到本研究 E_r^i 的轻微风险分级标准为 <20 ,其余依次乘2得到分级标准(表1)。 RI 的轻微风险(150)除以8种污染物的毒性系数总值(133),得到单位毒性系数的 RI 分级值(1.13);将 RI 分级值(1.13)乘以本研究6种重金属的毒性系数总值(48),得到 RI 第一级界限值($1.13 \times 48 = 54.24 \approx 54$);其他级别的分级值分别用上等级的分级值乘2得到分级标准(表1)。

表1 潜在生态风险指数与危害程度分级关系

Table 1 Relationship between potential ecological risk index and hazard degree classification

单项生态风险值(E_r^i) Single ecological risk values	潜在生态风险等级 Potential ecological risk levels	综合生态风险指数(RI) Comprehensive ecological risk index	潜在生态风险等级 Potential ecological risk levels
<20	轻微生态危害	$RI < 54$	轻微生态危害
20~40	中等生态危害	$54 \leq RI < 108$	中等生态危害
40~80	强生态危害	$108 \leq RI < 216$	强生态危害
80~160	很强生态危害	$RI \geq 216$	很强生态危害
>160	极强生态危害	—	极强生态危害

2 结果与讨论

2.1 示范区土壤重金属含量分析

示范区林地土壤和旱地土壤重金属描述性统计结果见表2。由表2可见,林地土壤和旱地土壤重金属V、Sb、Mo、Tl、U、Mn含量的平均值分别为125.18、1.50、4.68、0.59、4.16、232.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和241.25、1.98、3.38、0.71、5.02、1 056.35 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中林地土壤Mo的平均含量和旱地土壤V、Mo、Mn的平均含量与贵州省土壤环境背景值相接近,而林地土壤V、Sb、Tl、U的平均含量和旱地土壤Sb、Tl和U的平均含量均低于贵州省土壤环境背景值。变异系数可以反映区域重金属元素的分布差异,示范区林地土壤和旱地土壤6种重金属的变异系数大小顺序为: $\text{Mn} > \text{Mo} > \text{Sb} > \text{U} > \text{Tl} > \text{V}$ 和 $\text{Mn} > \text{Mo} > \text{V} > \text{Tl} > \text{U} > \text{Sb}$,其中林地土壤Mn、Mo的变异系

数分别为1.06和0.69,属于中等至高等变异,含量分布不均匀,变异性较强;旱地土壤Mn、Mo和V的变异系数分别为0.57、0.45和0.40,属于中等变异,离散性较强,可能受外界干扰^[33-34]。从偏度和峰度值来看,2种类型土壤Mn和Mo偏度和峰度值均较高,表明土壤Mn和Mo呈现高累积状态。与张建等^[35]报道的喀斯特地区(遵义虾子镇与贵阳花溪区)的Mn(805.00 mg·kg⁻¹)含量相比,示范区土壤Mn含量与其较接近。由此可见,喀斯特地貌区发育的土壤普遍存在Mn富集现象。对于Mo元素,示范区土壤Mo含量略高于王玉军等^[36]对江苏省徐州市农田土壤重金属研究给出的Mo含量(0.71 mg·kg⁻¹)和Domingo等^[37]报道的亚洲水稻土壤中Mo含量(2.91 mg·kg⁻¹)。总体而言,研究区土壤V、Sb、Tl、U和Mn的含量特征为旱地>林地,原因可能是林地土壤主要受到多年前零星煤矿开采影响,且林地土壤森林较为茂密,土壤有机质含量较高,可促进重金属从土壤中向植物体内迁移^[38],从而降低土壤重金属含量;旱地土壤可能受铅锌矿冶炼产生的废气、废渣和废水的直接排放影响,由于喀斯特山区土地贫瘠,大量化肥农药的投入施用以及农业活动导致母岩的风化程度较大,从而导致旱地土壤和林地土壤中重金属含量差异,呈现出旱地土壤高于林地土壤的含量特征。林地土壤Mo平均含量大于旱地土壤,可能是由于土壤粒度和质地对元素含量有一定影响,黏质土壤Mo含量高于砂质土壤^[39]。对示范区单一重金属污染现状总体评价发现:2种类型土壤Sb含量均低于世界卫生组织(WHO)推荐的土壤中Sb的最大允许浓度3.50 mg·kg⁻¹^[40],处于安全水平,我国土壤中Sb

的背景含量范围为0.38~2.98 mg·kg⁻¹^[41],研究区表层土壤Sb含量在其范围内。

2.2 示范区土壤重金属地累积指数评价

以贵州省土壤环境背景值为评价标准,计算示范区林地土壤和旱地土壤6种重金属的地累积指数(图2)。示范区林地土壤和旱地土壤地累积指数大小依次为Mo>V>Tl>U>Sb>Mn和V>Mo>Mn>Tl>U>Sb,其中林地土壤Mo和旱地土壤V的地累积指数(I_{geo})分别为0.13和0.10,对应的污染程度评价等级为轻度污染,其他重金属地累积指数(I_{geo})均小于0,污染程度评价等级为无污染。地累积指数还考虑到各种重金属的累积程度^[42],由图2可知,林地土壤Mn的地累积指数(I_{geo})分布在-1.09~1.89,其他重金属的地累积指数(I_{geo})均小于0,属无污染;地累积指数污染评价结果表明旱地土壤V、Mo和Mn存在轻微污染,分别占旱地土样品数的52.1%、33.3%和41.7%,其他重金属的地累积指数(I_{geo})均小于0,属无污染。总体来看,示范区土壤V、Sb、Mo、Tl、U和Mn的地累积指数(I_{geo})均小于0,表明示范区没受到这6种重金属的污染,土壤环境质量较好。

2.3 示范区土壤重金属潜在生态风险评价

选取贵州表层土壤元素背景值为参比值,计算示范区土壤重金属潜在生态危害指数(表3)。由表3可知,示范区土壤V、Sb、Mo、Tl、U和Mn单项潜在生态危害指数变化范围为1.07~6.57、0.47~1.48、9.38~83.13、2.87~9.44、8.46~31.54和0.07~3.39;平均值分别为3.16、0.84、22.64、5.80、18.69和1.14,单项潜在生态风险按顺序排列为Mo>U>Tl>V>Mn>Sb;表层土壤

表2 示范区土壤重金属描述性统计(mg·kg⁻¹)

Table 2 Descriptive statistics of soil heavy metals of the demonstration area(mg·kg⁻¹)

土壤类型 Soil types	元素 Elements	样本数 Sample group number	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient	偏度 CS	峰度 CE
林地土壤	V	11	102.00	161.00	125.18	20.39	0.16	0.64	-0.93
	Sb	11	1.05	2.09	1.50	0.32	0.21	0.32	-0.56
	Mo	11	1.69	13.30	4.68	3.23	0.69	2.11	5.45
	Tl	11	0.43	0.77	0.59	0.11	0.19	0.55	-0.74
	U	11	3.00	5.70	4.16	0.82	0.20	0.48	-0.52
	Mn	11	52.00	727.00	232.18	245.74	1.06	1.60	1.10
旱地土壤	V	48	74.00	456.00	241.25	97.27	0.40	0.57	-0.55
	Sb	48	1.14	3.31	1.98	0.46	0.23	0.47	0.21
	Mo	48	1.50	9.36	3.38	1.52	0.45	1.73	4.19
	Tl	48	0.34	1.12	0.71	0.21	0.30	-0.13	-0.88
	U	48	2.20	8.20	5.02	1.28	0.26	-0.05	0.00
	Mn	48	153.00	2 690.00	1 056.35	603.62	0.57	0.52	0.27

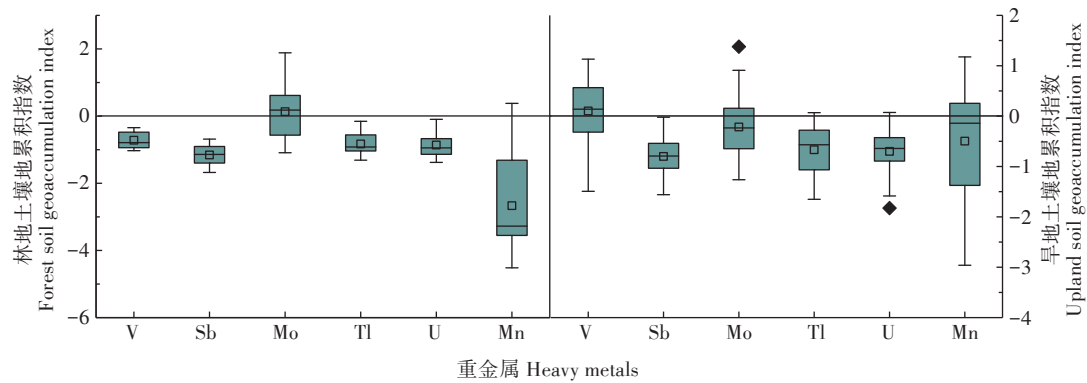


图2 耕地土壤重金属元素地累积指数

Figure 2 Geoaccumulation factors of heavy metals in soil

中危害最大的重金属元素是Mo,其中有28个样点(占样品总数的47.5%)存在中等生态危害;元素U存在25个样点(占样品总数的42.4%)存在中等生态危害,其他4种重金属元素所有样点潜在危害指数均未超过20,处于轻微生态危害。示范区耕地土壤综合潜在生态风险指数为52.28,小于多元素生态危害指数的最小值(54),处于轻微生态危害。总体来看,示范区土壤重金属污染风险较小,但因前期煤矿零星开采和铅锌矿冶炼存在一定程度的点源污染,应引起重视。

表3 示范区土壤重金属单因子生态危害和综合潜在生态危害
Table 3 Single factor ecological risk level and potential ecological risk level of heavy metals in soil

	元素 Elements	极小值 Minimum	极大值 Maximum	平均值 Mean	危害等级 Potential risk levels
E_i	V	1.07	6.57	3.16	轻微生态危害
	Sb	0.47	1.48	0.84	轻微生态危害
	Mo	9.38	83.13	22.64	中等生态危害
	Tl	2.87	9.44	5.80	轻微生态危害
	U	8.46	31.54	18.69	轻微生态危害
	Mn	0.07	3.39	1.14	轻微生态危害
RI			52.28		轻微生态危害

2.4 示范区农作物重金属含量分析

对示范区农作物重金属含量进行描述性统计分析结果见表4。由表4可知,6种农作物样品中Mn的含量最高,其次是V,Mo次之,Sb、Tl和U含量在不同种农作物中无规律变化。Sb在农作物中的平均含量从大到小依次为玉米>马铃薯>刺梨>青菜>核桃=大蒜;Tl为马铃薯>青菜>玉米>核桃>刺梨=大蒜;U为玉米>马铃薯>青菜=核桃=刺梨>大蒜。Mn、V和Mo在6种农作物中的含量相对较其他重金属高,与土壤具有相似特征,即土壤中重金属元素的含量越高,农作物中重金属的含量亦高。Mo在青菜中的平均含量为 $1.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,6种农作物中处于最大。农作物Mo耐性极强,一般情况下大多数农作物并无不良反应^[43]。重金属V在玉米和马铃薯中的含量显著高于其他农作物,呈现出粮食类农作物V高于蔬菜类的特征,张迪等^[44]报道了遵义松林地区可食用农作物(水稻、玉米、甘薯、白菜、辣椒和萝卜)中V的平均含量为: 20.38 、 22.09 、 21.50 、 16.30 、 $18.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $19.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于本研究区农作物中V的平均含量。对于Tl元素,Schoer^[45]报道了生长于未受污染土壤上的植物中的Tl含量变化范围为 $0.01\sim0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,示范

表4 示范区农作物重金属分布特征($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 Distribution of selected heavy metals of crop plants in demonstration area($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

元素 Elements	马铃薯 Potato			玉米 Maize			青菜 Pakchoi			大蒜 Garlic			核桃 Walnut			刺梨 Rosa sterilis		
	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值
	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Mean
V	0.20	7.60	5.00	4.20	9.20	6.90	0.80	2.40	1.40	0.80	1.10	0.95	0.20	8.00	1.39	0.60	0.80	0.68
Sb	0.02	0.11	0.08	0.08	0.14	0.10	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.10	0.03	0.04	0.06	0.05
Mo	0.09	1.10	0.72	0.38	0.98	0.65	0.76	1.75	1.26	0.69	0.77	0.73	0.09	0.48	0.31	0.05	0.34	0.15
Tl	0.10	0.21	0.14	0.04	0.07	0.05	0.06	0.14	0.11	0.02	0.03	0.03	0.01	0.10	0.04	0.02	0.03	0.03
U	0.00	0.16	0.09	0.05	0.16	0.10	0.01	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.11	0.02	0.01	0.03	0.02
Mn	178.50	459.00	314.19	124.50	184.50	154.00	39.80	86.90	61.77	22.60	26.30	24.45	75.80	376.00	185.03	79.10	168.00	108.50

区马铃薯、玉米、青菜、大蒜、核桃和刺梨中Tl含量分别为:0.14、0.05、0.11、0.03、0.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和0.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均在0.01~0.25 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。农作物中Mn、V和Mo较高含量值与土壤中这3种重金属含量较高有关,土壤中重金属由根系转运至植株上部过程中,受到不同作物转运能力、迁移距离、根际环境、植物重金属螯合肽等多重影响因素控制^[46]。

2.5 土壤-农作物系统中重金属元素富集特征

土壤中重金属元素向农作物中迁移富集,人体通过摄食农作物而摄入重金属,这是人体接触重金属最主要的途径^[47]。生物富集系数(BCF)能够表征农作物从土壤中吸收富集重金属元素的能力, $\text{BCF} = C_{\text{农作物}} / C_{\text{根系土}}$, $C_{\text{农作物}}$ 为元素在农作物中的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $C_{\text{根系土}}$ 为元素在农作物对应根系土中的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图3为示范区农作物中重金属元素的生物富集系数。重金属元素在叶菜类(青菜和大蒜)中平均生物富集系数大小顺序为 $\text{Mo} > \text{Tl} > \text{Mn} > \text{Sb} > \text{V} > \text{U}$,在马铃薯和核桃中平均生物富集系数大小顺序为 $\text{Mn} > \text{Mo} > \text{Tl} > \text{Sb} > \text{V} > \text{U}$,在玉米和刺梨中 Mo 、 Mn 、 Tl 和 Sb 均呈规律变化,平均生物富集系数大小顺序为 $\text{Mo} > \text{Mn} > \text{Tl} > \text{Sb}$,V和U平均生物富集系数则相反,在玉米中为V大于U,在刺梨中为U大于V。研究发现,6种农作物中Mn和Mo的富集系数相对较高,这可能与土壤中Mn和

Mo含量较高以及Mn和Mo是农作物生长所必需的重金属元素有关^[48]。本研究中玉米中V的平均生物富集系数为0.03,与张迪等^[44]对遵义松林Ni-Mo多金属矿区周边农作物(玉米)微量金属元素V的平均生物富集系数0.04较接近。对不同农作物中重金属元素富集系数的分析发现,Mo在青菜中的富集系数最大,为0.37,可能是由于叶类蔬菜叶片等器官末端的蒸发量较大且较易受到大气粉尘中重金属的污染^[49]。Tl在青菜中的富集系数仅次于Mo,Jia等^[50]对Tl在甘蓝中的分配特征研究发现,叶菜类蔬菜的叶是Tl的主要储存组织。

2.6 土壤重金属主成分分析

主成分分析是通过正交变换将多个具有相关性的变量转换为具有一定载荷值的线性不相关综合变量的多元统计方法,它可以发现数据复杂体系中各分量的贡献值,是判别土壤中重金属来源的可靠方法^[51-52]。表5和图4为土壤重金属因子载荷矩阵及因子载荷空间分布,其中前两个主成分特征值均大于1且累计贡献率达74.62%,故将6种重金属分为2个主成分。

第一主成分的特征值为3.21,方差贡献率为53.44%,V、Sb、Tl、U和Mn金属元素载荷值均大于0.6,撒拉溪示范区70%以上为喀斯特地貌,成土母质

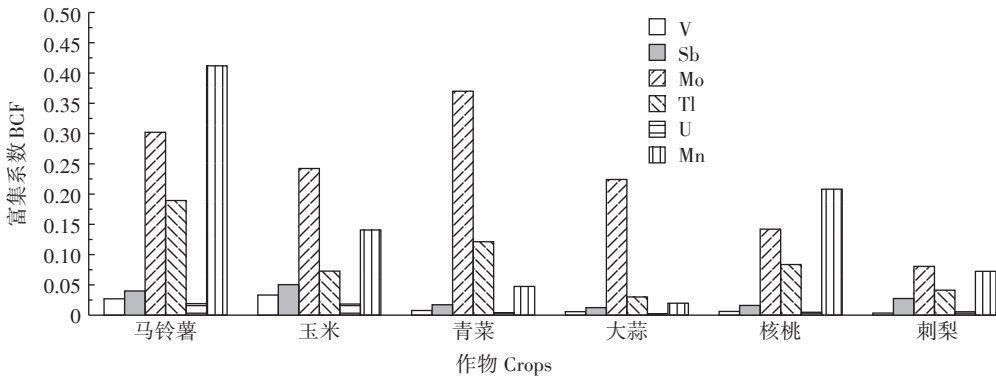


图3 示范区农作物重金属元素富集系数

Figure 3 Biological absorption coefficients heavy metals of crop plants in demonstration area

表5 土壤金属元素因子载荷和特征值

Table 5 Factors matrix and eigenvalues of metal elements in soil

成分 Components		特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution/%	累积方差贡献 Cumulative variance contribution/%	V	Sb	Mo	Tl	U	Mn
初始因子 载荷	主成分1	3.28	54.63	54.63	0.732	0.876	0.266	0.789	0.886	0.703
	主成分2	1.20	19.99	74.62	0.164	0.02	0.898	-0.218	0.191	-0.531
旋转后因 子载荷	主成分1	3.21	53.44	53.44	0.689	0.857	0.095	0.816	0.836	0.790
	主成分2	1.27	21.18	74.62	0.297	0.182	0.931	-0.068	0.352	-0.391

类型主要为碳酸盐岩,土壤中重金属元素受碳酸盐岩化学风化影响较大,V、Sb、Tl、U和Mn等重金属元素会高于其他部分母质发育土壤中的含量,王锐等^[53]对重庆市黔江区典型喀斯特区土壤Mn富集特征研究发现,Mn元素来源于二叠系碳酸盐岩的风化。研究区土壤V、Sb、Tl、U和Mn含量与贵州省土壤环境背景值相当,因此判断第一主成分主要受到成土母质的控制,V、Sb、Tl、U和Mn元素在土壤中为自然来源。第二主成分方差贡献率为21.18%,金属元素Mo的因子载荷值为0.931。以背景值为参照标准,Mo元素大于背景值的样点数占样点总数的76.3%,由于示范区北部有多年的煤矿开采历史,开采的围岩碎石被随机堆放于森林及耕地附近,在雨水淋溶作用下围岩及矿坑里的废水易流向海拔较低的耕地,导致Mo元素在土壤中富集。研究区废弃煤矿坑周边林地土壤Mo含量($4.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)高于南部旱地土壤Mo含量($3.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),由此可见土壤Mo主要来源于梁山组含煤岩系及茅口组和栖霞组铅锌矿床以碳酸盐岩为主的赋矿围岩。

2.7 土壤重金属含量空间分布特征

图5为示范区6种重金属含量的空间分布,从图中可以看出各元素含量值空间分布特征与上述主成分分析结果大致相同,表明克里金插值法在土壤重金属污染风险评价方面具有一定的可靠性^[54]。总体来看,示范区土壤重金属空间分布呈中东部污染风险较高,西部逐渐下降的趋势。其中重金属元素Tl、Sb和U的空间分布特征基本一致,最高值集中分布于示范区中东部区域,可能一定程度上受铅锌矿冶炼的影响,而铅锌矿冶炼产生的废渣废水只能导致局部小区域含量升高,该3种重金属含量平均值均低于贵州省土壤背景值,存在污染风险的可能性较小。重金属V

和Mn在示范区分布较为均匀,除示范区北部较小部分地区外,区域内含量分异较小,主要受到成土母岩风化控制,与区内碳酸盐岩分布相吻合,进一步证实第一主成分为自然来源。土壤Mo元素含量最高值主要分布于示范区北部,其他区域呈递减趋势,这与示范区北部废弃煤矿点分布规律非常一致。综上所述,本课题组认为示范区土壤重金属空间规律主要与成土母岩(碳酸盐岩)的分布格局大致相同,局部区域受人类活动影响呈带状分布。

3 结论

(1)示范区林地土壤和旱地土壤重金属V、Sb、Mo、Tl、U和Mn平均含量分别为125.18、1.50、4.68、0.59、4.16、232.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和241.25、1.98、3.38、0.71、5.02、1 056.35 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,林地土壤Mo和旱地土壤V存在富集现象,污染程度最高,为轻度污染,其余元素含量均低于背景值,处于安全警戒范围。

(2)农作物重金属元素V、Sb、Mo、Tl、U和Mn平均含量分别为2.93、0.06、0.58、0.08、0.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和182.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Mn的累积程度最高,Sb和U在农作物中含量相对较低。马铃薯和玉米中Sb、V和U富集系数显著高于其他农作物,叶类蔬菜(青菜和大蒜)中Tl富集系数较高,Mn和Mo富集系数无明显规律。

(3)潜在生态风险评价结果显示,重金属Mo处于中等生态危害,其他均处于轻微生态危害;6种重金属综合潜在生态危害指数为52.28,均处于轻微生态危害。

(4)土壤中V、Sb、Tl、U和Mn的富集主要受成土母岩影响,Mo主要受到煤矿开采影响,同时受母质控制。总体来看,整个示范区土壤重金属含量空间分布与成土母质的分布格局基本一致,局部点源污染受人类活动影响。

参考文献:

- [1] Adimalla N, Qian H, Wang H. Assessment of heavy metal (HM) contamination in agricultural soil lands in northern Telangana, India: An approach of spatial distribution and multivariate statistical analysis[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(4): 1-15.
- [2] Rinklebe J, Antoniadis V, Shaheen S M, et al. Health risk assessment of potentially toxic elements in soils along the Central Elbe River, Germany[J]. *Environment International*, 2019(126): 76-88.
- [3] Sonne C, Dietz R, Alstrup A K O, et al. Response to comments on "Factors affecting global flow of scientific knowledge in environmental sciences" by Pourret[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 136528.

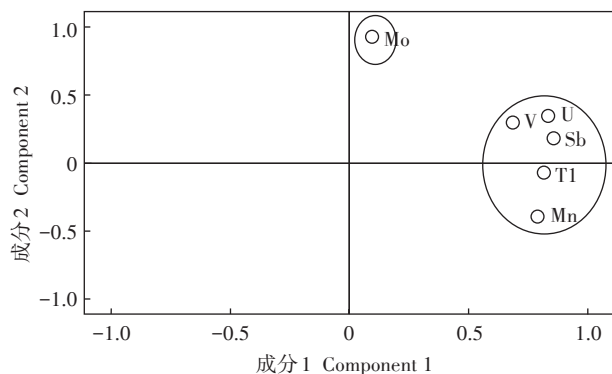


图4 土壤重金属元素空间载荷

Figure 4 Factors matrix of metal elements in soil

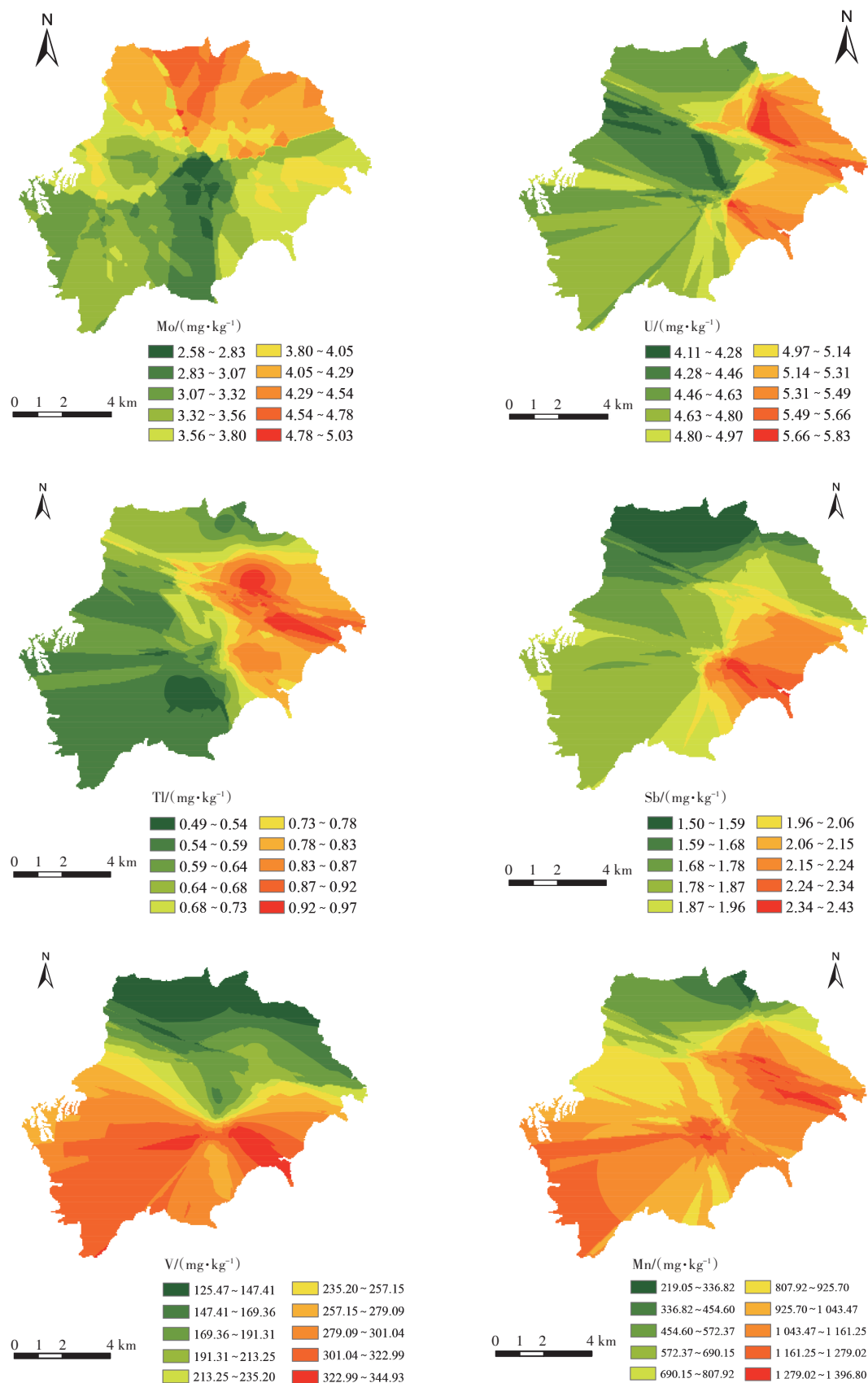


图5 土壤重金属含量空间分布

Figure 5 Spatial distribution of heavy metals in soil

- [4] Ha H, Olson J R, Bian L, et al. Analysis of heavy metal sources in soil using Kriging interpolation on principal components[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(9):4999-5007.
- [5] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2):750.
- [6] 章海波, 骆永明, 李远, 等. 中国土壤环境质量标准中重金属指标的筛选研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(3):429-438. ZHANG Hai-bo, LUO Yong-ming, LI Yuan, et al. Screening of criteria for heavy metals for revision of the national standard for soil environmental quality of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3):429-438.
- [7] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, 39(12):5628-5638. LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12):5628-5638.
- [8] 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 Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, 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.
- [9] Jallad K N. Heavy metal exposure from ingesting rice and its related potential hazardous health risks to humans[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(20):15449-15458.
- [10] 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 Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, 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.
- [11] Ali W, Mao K, Zhang H, et al. Comprehensive review of the basic chemical behaviours, sources, processes, and endpoints of trace element contamination in paddy soil-rice systems in rice-growing countries[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020:122720.
- [12] Wuana R A, Okieimen F E. Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation[J]. *Isrn Ecology*, 2011, 2011:1-20.
- [13] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1):449-459. MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, et al. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1):449-459.
- [14] 杨凯旋, 叶丽丽, 陈永山, 等. 广西喀斯特地区土壤多金属胁迫对水稻重金属积累及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1):27-35. CHANG Kai-xuan, YE Li-li, CHEN Yong-shan, et al. Impact of high concentrations of heavy metals in agricultural soil on heavy metals accumulation and physiological characteristics of rice (*Oryza sativa* L.) in Karst areas in Guangxi, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1):27-35.
- [15] 杨奇勇, 谢运球, 罗为群, 等. 基于地统计学的土壤重金属分布与污染风险评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12):248-254. YANG Qi-yong, XIE Yun-qiu, LUO Wei-qun, et al. Spatial distribution and soil pollution risk evaluation of soil heavy metal content based on geostatistics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12):248-254.
- [16] 孙子媛, 文雪峰, 吴攀, 等. 喀斯特地区典型风化剖面重金属超标程度及元素迁移特征研究[J]. 地球与环境, 2019, 47(1):50-56. SUN Zi-yuan, WEN Xue-feng, WU Pan, et al. Excessive degrees and migration characteristics of heavy metals in typical weathering profiles in Karst areas[J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(1):50-56.
- [17] 王璐, 喻阳华, 邢容容, 等. 喀斯特高寒干旱区不同经济树种的碳氮磷钾生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(15):5393-5403. WANG Lu, YU Yang-hua, XING Rong-rong, et al. Ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus, and potassium of different economic tree species in the Karst frigid and arid area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15):5393-5403.
- [18] 熊康宁, 朱大运, 彭韬, 等. 喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22):7109-7113. XIONG Kang-ning, ZHU Da-yun, PENG Tao, et al. Study on ecological industry technology and demonstration for Karst rocky desertification control of the Karst Plateau-Gorge[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22):7109-7113.
- [19] 姚成斌, 周明忠, 熊康宁, 等. 喀斯特高原石漠化治理示范区土壤和农作物重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1):316-326. YAO Cheng-bin, ZHOU Ming-zhong, XIONG Kang-ning, et al. Contents of heavy metals in soils and crops in the demonstration area of Karst rocky desertification control of the Karst Plateau-Gorge[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1):316-326.
- [20] 兰叶芳, 黄树光, 任成明, 等. 黔西北毕节地区中二叠统碳酸盐岩成岩作用[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(5):507-516. LAN Ye-fang, HUANG Shu-guang, REN Shu-ming, et al. Diagenesis of middle permian carbonate rocks in Bijie Area, Northwestern Guizhou[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(5):507-516.
- [21] 肖华, 熊康宁. 小流域石漠化综合治理技术空间优化配置——以毕节撒拉溪示范区为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(增刊2):236-239. XIAO Hua, XIONG Kang-ning. Spatial optimization allocation for comprehensive control technology in catchment: With a special reference to Bijie Salaxi Rocky Desertification Control Demonstration Area[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(Suppl 2):236-239.
- [22] Muller G. Index of geoaccumulation in sediment of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2:108-118.
- [23] 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 Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, 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.
- [24] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5):2086-2094. YU Zhi, CHEN Feng, ZHANG Jun-fang, et al. Contamination and risk of

- heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(5):2086-2094.
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [26] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115. XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [27] Rehman, Inayat, Ur, et al. Enrichment, spatial distribution of potential ecological and human health risk assessment via toxic metals in soil and surface water ingestion in the vicinity of Sewakht mines, district Chitral, Northern Pakistan[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2018, 154:127-136.
- [28] 向龙, 刘平辉, 李欣. 基于GIS的华东某铀矿区水冶厂周边稻米中重金属的污染评价及分布差异[J]. 中国科技论文, 2017, 12(3):312-318, 326. XIANG Long, LIU Ping-hui, LI Xin. GIS-based spatial variability and pollution evaluation of heavy metal in surrounding of hydrometallurgy plant area of a uranium mining area, East China[J]. *China Science Paper*, 2017, 12(3):312-318, 326.
- [29] 金昭贵, 周明忠. 遵义松林Ni-Mo矿区耕地土壤铊污染及潜在生态风险初步评价[J]. 地球与环境, 2013, 41(3):274-280. JIN Zhao-gui, ZHOU Ming-zhong. Preliminary assessment on contamination and potential ecological risk of thallium in cultivated soils around the Ni-Mo mining area in Songlin, Zunyi[J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(3):274-280.
- [30] 张伟, 葛建团, 张吉平. 某铋矿区土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(4):781-783. ZHANG Wei, GE Jian-tuan, ZHANG Ji-ping. Heavy metal pollution in the soil and potential ecological risk assessment of an antimony mine[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(4):781-783.
- [31] 国家环境保护局. 中国土壤环境背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. State Bureau of Environmental Conservation. Soil environmental background values in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [32] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015(3):1037-1044. LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China[J]. *Environmental Science*, 2015(3):1037-1044.
- [33] 冯艳红, 郑丽萍, 应蓉蓉, 等. 黔西北炼锌矿区土壤重金属形态分析及风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(2):142-149. FENG Yan-hong, ZHENG Li-ping, YING Rong-rong, et al. Forms of heavy metals in soils of zinc mining area in Northwestern Guizhou Province and their environmental risks[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(2):142-149.
- [34] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J]. 地球与环境, 2015, 43(1):92-97. RUAN Yu-long, LI Xiang-dong, LI Ting-yu, et al. Heavy metal pollution in agricultural soils of the Karst areas and its harm to human health[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(1):92-97.
- [35] 张建, 杨瑞东, 陈蓉, 等. 贵州喀斯特地区土壤-辣椒体系重金属元素的生物迁移积累特征[J]. 食品科学, 2017, 38(21):175-181. ZHANG Jian, YANG Rui-dong, CHEN Rong, et al. Bioconcentration of heavy metals in soil-Capsicum annuum L. system in Karst areas of Guizhou Province[J]. *Food Science*, 2017, 38(21):175-181.
- [36] 王玉军, 欧名豪. 徐州农田土壤养分和重金属含量与分布研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(6):1438-1450. WANG Yu-jun, OU Ming-hao. Contents and distribution of soil nutrients and heavy metal elements in farmlands of Xuzhou[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(6):1438-1450.
- [37] Domingo L E, Kyuma K. Trace elements in tropical Asian paddy soils: I. Total trace element status[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1983, 29(4):439-452.
- [38] 胡梦凌, 曾和平, 董达诚, 等. 腐殖质改良植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3):273-280. HU Meng-ling, ZENG He-ping, DONG Da-cheng, et al. Humic substances amendments for improving phytoremediation of heavy metal polluted soils: A review[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(3):273-280.
- [39] 王增辉, 谢颂诗, 王红晋, 等. 山东省巨野县土壤B和Mo地球化学特征及有效态的周期变化[J]. 山东国土资源, 2016, 32(4):51-55. WANG Zeng-hui, XIE Song-shi, WANG Hong-jin, et al. Geochemical characteristics and periodic bioavailability change of B and Mo in soil of Juye County in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 2016, 32(4):51-55.
- [40] Chang A C, Pan G X, Page A L, et al. Developing human health-related chemical guidelines for reclaimed water and sewage sludge application in agriculture[R]. World Health Organization: Division of Environmental Health, 2002:1-94.
- [41] 齐文启, 曹杰山. 锑(Sb)的土壤环境背景值研究[J]. 土壤通报, 1991, 22(5):209-210. QI Wen-qi, CAO Jie-shan. Study on soil environmental background value of antimony (Sb)[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1991, 22(5):209-210.
- [42] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(6):2822-2833. CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6):2822-2833.
- [43] 刘鹏. 钼胁迫对植物的影响及钼与其他元素相互作用的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2002, 21(3):276-278. LIU Peng. Effects of stress of molybdenum on plants and interaction between molybdenum and other elements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2002, 21(3):276-278.
- [44] 张迪, 周明忠, 熊康宁, 等. 贵州遵义松林镍-钼多金属矿区土壤及农作物钒健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(7):824-830. ZHANG Di, ZHOU Ming-zhong, XIONG Kang-ning, et al. Health risk assessment of V in the soils and crops around the Ni-Mo polymetallic mining area in Songlin, Zunyi, Guizhou[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(7):824-830.

- [45] Schoer J. Thallium[M]//Hutzinger O. The handbook of environmental chemistry: V(3) part C. New York: Springer-Verlag, 1984: 143-214.
- [46] 李杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 43-52. LI Jie, ZHU Li-xin, KANG Zhi-qiang. Characteristics of transfer and their influencing factors of heavy metals in soil-crop system of peri-urban agricultural soils of Nanning, south China[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 43-52.
- [47] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 383(1/2/3): 81-89.
- [48] Sager M. Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(6): 1383-1390.
- [49] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 389-398. CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1): 389-398.
- [50] Jia Y L, Xiao T F, Zhou G Z, et al. Thallium at the interface of soil and green cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata L.): Soil-plant transfer and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 450/451: 140-147.
- [51] 徐夕博, 吕建树, 徐汝汝. 山东省沂源县土壤重金属来源分布及风险评估[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 216-223. XU Xi-bo, LÜ Jian-shu, XU Ru-ru. Source spatial distribution and risk assessment of heavy metals in Yiyuan County of Shandong Province[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 34(9): 216-223.
- [52] 刘斌, 郭星, 朱宇恩. 基于随机森林模型的土壤重金属源解析——以晋中盆地为例[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 106-111. LIU Bin, GUO Xing, ZHU Yu-en. Analysis of soil heavy metal sources in Jinzhong basin based on random forest model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(1): 106-111.
- [53] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 941-951. WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, et al. Characteristics of cadmium enrichment and pollution evaluation of soil-crop system in typical Karst area[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2): 941-951.
- [54] 贾跃, 李志伟, 王冬清, 等. 城市表层土壤重金属污染分析优化模型[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(2): 202-206. JIA Yue, LI Zhi-wei, WANG Dong-qing, et al. Optimization model for analysis of heavy metals pollution in urban topsoil[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2017, 57(2): 202-206.