

基于GIS和PMF的铜仁植烟土壤重金属污染特征与来源解析

陈雪, 刘鸿雁, 吴攀, 孟伟, 胡菁, 李学先

引用本文:

陈雪, 刘鸿雁, 吴攀, 孟伟, 胡菁, 李学先. 基于GIS和PMF的铜仁植烟土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 794–801.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0779>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析

曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 滕浪, 吴康, 谢挺, 何腾兵

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 102–113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0665>

细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析

宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 李波, 田莉, 王世成

农业环境科学学报. 2017, 36(3): 487–495 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1222>

基于PMF和Pb同位素的农田土壤中重金属分布及来源解析

陈锦芳, 方宏达, 巫晶晶, 林锦美, 蓝伟斌, 陈进生

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1026–1035 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1170>

安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析

尹国庆, 江宏, 王强, 聂静茹, 马友华, 胡宏祥

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 96–104 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0911>

基于APCS-MLR受体模型的农田土壤重金属源解析

霍明珠, 高秉博, 乔冬云, SainbuyanBayarsaikhan, 安毅, 霍莉莉

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 978–986 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1277>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈雪, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 基于GIS和PMF的铜仁植烟土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 794–801.

CHEN X, LIU H Y, WU P, et al. Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in tobacco-planting soils in Tongren County based on GIS and PMF methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4): 794–801.



开放科学 OSID

基于GIS和PMF的铜仁植烟土壤重金属污染特征与来源解析

陈雪¹, 刘鸿雁¹, 吴攀^{2,3}, 孟伟⁴, 胡菁⁵, 李学先^{1,3*}

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 3. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025; 4. 贵州省地质调查院, 贵阳 550005; 5. 贵州科学院, 贵阳 550001)

摘要: 植烟土壤重金属污染不仅影响烟叶品质, 同时会对吸烟者的健康构成潜在危害, 研究植烟土壤重金属污染现状及来源贡献对于保障烟叶安全生产具有重要意义。为定性、定量分析贵州铜仁地区植烟土壤重金属污染特征及来源贡献, 采集主要植烟区土壤样品 267 份, 测定 8 种重金属元素 (Cu、Ni、Pb、Zn、As、Hg、Cr、Cd) 含量, 采用单因子污染指数 (P_i)、污染负荷指数 (PLI) 结合地统计分析对重金属污染特征进行评价, 并运用正定矩阵因子模型 (PMF) 解析其重金属的来源及贡献率。结果表明: 植烟土壤 Hg 和 Pb 累积明显, 均值分别是贵州省土壤背景值的 2.27 倍和 1.74 倍; P_i 表明 Cd、As、Pb 的污染程度较高, 高值区分布与区域矿冶活动分布密切相关。PMF 计算结果显示, 植烟土壤重金属来源主要有自然源、铅锌矿业源、交通和铅锌冶炼混合源、汞矿和煤矿源以及农业源 5 种类型, 贡献率分别为 25.38%、20.41%、16.60%、14.56%、23.05%。研究区植烟土壤重金属综合污染水平较低, 重金属来源复杂, 应重点加强 Hg、Cd、Pb 的源头控制, 以降低其污染风险。

关键词: 重金属; 植烟土壤; 正定矩阵因子模型 (PMF); 源解析

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)04-0794-08 doi:10.11654/jaes.2021-0779

Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in tobacco-planting soils in Tongren County based on GIS and PMF methods

CHEN Xue¹, LIU Hongyan¹, WU Pan^{2,3}, MENG Wei⁴, HU Jing⁵, LI Xuexian^{1,3*}

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, China; 4. Geological Survey Institute of Guizhou Province, Guiyang 550005, China; 5. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)

Abstract: Heavy metals contamination of soils used for growing tobacco not only affects the quality of tobacco leaves but also poses potential health hazards to smokers. Thus, it is important to study the current situation of heavy metals contamination in these soils and the contributions of sources to ensure safe production of tobacco leaves. The purpose of this study was to assess qualitatively and quantitatively the pollution status and source contributions of heavy metals in soils used for growing tobacco in Tongren, Guizhou Province, China. For

收稿日期: 2021-07-07 录用日期: 2021-10-14

作者简介: 陈雪 (1998—), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 从事土壤重金属污染与修复研究。E-mail: 2398257663@qq.com

*通信作者: 李学先 E-mail: xxli5@gzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金委员会-贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目 (U1612442); 贵州省科技计划项目 (黔科合平台人才[2016]5664, 黔科合支撑[2020]4Y020); 贵州省地质矿产勘查开发局项目 (黔地矿科合[2014]07)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China-Guizhou Provincial People's Government Karst Science Research Center Project (U1612442); The Science and Technology Project of Guizhou Province ([2016]5664, [2020]4Y020); The Guizhou Geological and Mineral Exploration and Development Bureau Project ([2014]07)

this purpose, 267 soil samples were collected systematically to determine the Cu, Ni, Pb, Zn, As, Hg, Cr, and Cd concentrations. The single factor pollution index method (P_i), pollution load (PLI), and geostatistical analysis were used to evaluate the soil heavy metal pollution status in the study area. Furthermore, positive matrix factorization (PMF) was applied to quantify the pollution sources and contribution rates. The results showed that Hg and Pb accumulated most significantly in the soils. Their mean values were 2.27 and 1.74 times of the background values of soils in Guizhou Province. The P_i evaluation results indicated that Cd, As, and Pb had the highest contamination levels, and the distribution of high value areas was closely related to the distribution of regional mining and metallurgical activities. The PMF calculations revealed that there were five main types of heavy metal sources affecting the soils: natural sources, lead and zinc mining sources, mixed-traffic and lead and zinc smelting sources, mercury and coal mining sources, and agricultural sources, with contributions of 25.38%, 20.41%, 16.60%, 14.56%, and 23.05%, respectively. Heavy metal pollution of the tobacco-planting soils in the study area was low, and the sources of heavy metals were complex. However, source control of Hg, Cd, and Pb should be emphasized to reduce the pollution risk.

Keywords: heavy metal; tobacco; soil; positive matrix factorization (PMF); source apportionment

土壤是人类赖以生存和发展的重要资源之一,其环境质量对于保障农产品质量和农业可持续发展起着至关重要的作用^[1]。随着人口、资源和环境之间的竞争压力加大,土壤环境质量不断退化,特别是土壤重金属污染已成为全球关注的焦点^[2-3]。土壤重金属主要来源于成土母质^[4],但工矿活动、交通以及农业施肥灌溉等人类活动也会造成土壤重金属的累积^[5-7],不仅影响作物生产,还通过食物链对自然生态系统和人类健康造成潜在威胁^[8-9]。因此,明确土壤中重金属的污染来源,从源头上加以控制,对于土壤重金属污染防治及土壤环境管理具有重要意义。目前,用于分析土壤重金属来源常用的方法主要有相关性分析、主成分分析(PCA)、正定矩阵因子分析模型(PMF)、主成分多元线性回归(ACPS-MLR)等^[1,10-12]。PMF模型是定量识别不同污染来源及贡献的有效方法,近年来在环境污染物源识别研究中得到了广泛应用^[1,5,7]。

烟草作为一种重要的经济作物,在世界许多国家和地区广泛种植^[10,13-15]。我国烟叶年产量约占世界烟草供应量的1/3^[16],在国民经济发展中占有重要的地位。土壤作为烟草生长的必要物质基础,也是烟叶中重金属的主要来源。烟草根系易于吸收和富集土壤中的重金属,并通过转运的方式将其从根系转运到烟叶中^[17-18]。重金属一方面影响着烟叶的品质,另一方面通过主流烟的途径进入人体,对吸烟者的身体健康造成危害^[3,10]。因此,烟叶中的重金属含量与其生长的土壤重金属含量密切相关,因而植烟土壤中重金属的污染及来源备受关注。有研究者分别对遵义地区^[10]、山东省^[4]、江西省^[13]的植烟土壤中重金属的污染程度和生态风险进行了研究,结果均显示植烟土壤中存在不同程度的重金属污染,其中以Cd、Hg污染最为严重。

贵州铜仁作为贵州省特色优质烟叶开发的主要试点之一,年种植烤烟面积约 $1.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[19],为铜仁地区的经济发展作出了巨大贡献。大量研究表明,研究区农田土壤受到了不同程度的Cd、Hg、As污染^[20-22],但目前关于植烟土壤重金属的含量水平及污染状况,能获取的资料非常有限。本文以铜仁主要植烟区土壤为研究对象,对重金属Cu、Ni、Pb、Zn、As、Hg、Cr、Cd的污染特征、空间分布以及污染来源进行研究,以期为铜仁地区的植烟土壤重金属污染防控提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省东北部($107^{\circ}44' \sim 109^{\circ}28' \text{ E}$, $27^{\circ}08' \sim 29^{\circ}05' \text{ N}$),总面积 $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,是贵州省烤烟主产区之一。区内属中亚热带季风湿润气候,年平均气温 $16.23 \sim 17.63^{\circ}\text{C}$,年降雨量 $1\,095.82 \sim 1\,421.67 \text{ mm}$,无霜期长、热量温度偏高,适宜烟草种植。境内矿产资源丰富,可开采矿种达40多种,其中汞矿和锰矿最为丰富,主要分布于研究区东部的万山区、碧江区、松桃等县(区)。长期的矿产资源开发利用给该地区遗留下了潜在的环境污染源,其中以Cd、Hg、As的污染最为严重^[21-23]。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 土壤样品采集

根据研究区烤烟种植分布情况,在主要植烟的7个县(区)共采集了267份植烟土壤样品(图1)。用木铲取耕作层(0~20 cm)土壤作为检测样品,参考土壤环境监测技术规范(HJ/T 166—2004),采样时根据烟田形状设置“梅花”布点或进行“S”形采样(采样时避开肥堆等有明显污染地方)。土样经充分混合,按四

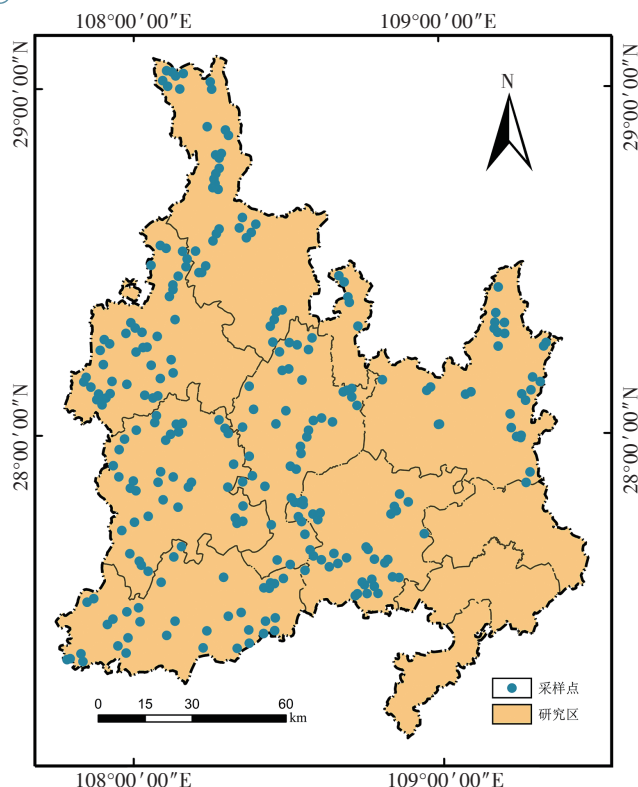


图1 研究区采样点分布图

Figure 1 Distribution map of sampling points in study area

分法去除杂质后保留 1.0 kg 样品。采样过程中详细标注采样时间、地点、样品编号以及经纬度。样品带回实验室,在室内自然风干后去除植物根系、石块等杂质,充分研磨,过 100 目尼龙网筛以供测定土壤的 pH、有机质和重金属含量。

1.2.2 测定项目及方法

土壤 pH 采用电位法(水土比为 2.5:1)(HJ 962—2018)测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾—硫酸滴定法测定。土壤中 Cu、Ni、Pb、Zn、Cr、Cd 含量的测定:用电子天平准确称量 0.100 0 g 样品置于 10 mL 聚四氟乙烯消解罐中,加入 3 mL HNO₃(优级纯)和 1 mL HF(优级纯),密封置于不锈钢钢套内,拧紧后置于 180 °C 烘箱加热 48 h,冷却后取出置于电热板 120 °C 赶酸至黏稠,用 2% 稀硝酸稀释定容 50 mL,静置 1 h,取上清液用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定。土壤中 As、Hg 含量的测定:用电子天平准确称量 0.200 0 g 过 100 目筛的土壤样品,用王水水浴消解后,采用原子荧光光度计(AFS-230E)测定。测定过程中,采用空白和国家标准物质(GSS-5)进行质量控制,标准样品重金属 Cu、Ni、Pb、Zn、Cr、Cd 的平均回收率为 90%~105%,As、Hg 的平均回收率为 95.7%~

102.3%。同时每 20 个样品进行平行样测定,相对误差在±5%以内。

1.3 重金属污染评价方法

采用单因子污染指数法评价土壤中某一重金属的污染程度^[24],其公式为:

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

式中: P_i 为土壤中重金属*i*的污染指数; C_i 为土壤中重金属*i*的实测浓度,mg·kg⁻¹; S_i 为土壤中重金属*i*的评价标准,mg·kg⁻¹,选用土壤样品不同 pH 标准下的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中风险筛选值为评价标准,单因子污染指数分级标准为: $P_i \leq 0.7$ 为安全; $0.7 < P_i \leq 1.0$ 为警戒线; $1.0 < P_i \leq 2.0$ 为轻度污染; $2.0 < P_i \leq 3.0$ 为中度污染; $P_i > 3.0$ 为重度污染。

污染负荷指数法是 TOMLINSON 等^[25]提出的能够反映不同污染物对总体污染情况贡献程度的污染评价方法,其计算公式为:

$$PLI = \sqrt[n]{P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n} \quad (2)$$

式中: PLI 为某点污染负荷指数; n 为重金属元素个数;污染负荷指数评价标准为: $PLI \leq 0.7$ 为安全; $0.7 < PLI \leq 1.0$ 为警戒线; $1.0 < PLI \leq 2.0$ 为轻度污染; $2.0 < PLI \leq 3.0$ 为中度污染; $PLI > 3.0$ 为重度污染。

1.4 正定矩阵因子模型(PMF)

PMF 是一种多元因子分析工具,被广泛用于环境污染源解析^[1,7],其计算公式为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} \times f_{kj} + e_{ij} \quad (3)$$

式中: X_{ij} 为第*i*个土壤样品中*j*元素的含量,mg·kg⁻¹; g_{ik} 为元素*j*在源*k*中的含量,mg·kg⁻¹; f_{kj} 为源*k*对第*i*个土壤样品的贡献; e_{ij} 为残差矩阵。 e_{ij} 根据定义目标函数计算得到。目标函数 Q_i 计算公式为:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (4)$$

式中: Q_i 为目标函数, u_{ij} 为*j*元素在第*i*个土壤样品中的不确定度。当各元素的含量小于或等于相应的方法检出限(MDL)时,不确定度按式(5)计算:

$$u_{ij} = \frac{5}{6} \times MDL \quad (5)$$

当各元素的含量大于相应的 MDL 时,不确定度按式(6)计算:

$$u_{ij} = \sqrt{(\delta \times C)^2 + \frac{1}{4} MDL^2} \quad (6)$$

式中: δ 为相对偏差,取 5%^[26], C 为元素含量,mg·kg⁻¹;

MDL为方法检出限,Cu、Ni、Pb、Zn、As、Hg、Cr、Cd的检出限分别为1、2、2、4、1、0.000 5、5、0.03 mg·kg⁻¹。

1.5 数据分析

土壤重金属含量数据采用Excel和SPSS 19.0进行统计分析,数据通过正态分布检验后分别统计最大值、最小值、算术平均值、标准差和变异系数。利用EPA PMF 5.0模型对研究区植烟土壤的重金属进行来源解析,使用ArcMap 10.5软件绘制采样图和土壤重金属含量空间分布图,采用克里金插值法对Hg进行空间插值,并绘制成图。其他图表使用Origin绘制。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属元素含量特征

研究区土壤pH平均值为6.29,表明大部分植烟土壤呈弱酸性。由表1可知,研究区植烟土壤中重金属除Cu、Ni、Cd、Cr未超贵州省土壤背景值外,Hg、Pb、Zn、As平均含量分别是贵州省土壤背景值的2.27、1.74、1.13、1.13倍,累积明显。变异系数的大小反映了各样点重金属含量分布的差异,其大小与人类活动强度有关,CV≤16%为弱变异性,16%<CV≤36%为中等变异性,CV>36%为高度变异性^[13]。8种重金属含量的变异系数在22.40%~92.42%之间,整体属于中高度变异性,表明这8种重金属受人为因素影响较大。8种重金属中Pb、As、Cd分别有8.61%、13.10%、88.76%的点位超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的风险筛选值,与风险管制值相比,只有Cd存在超标现象,超标率为1.12%。说明铜仁市植烟土壤存在Pb、As、Cd污染,其中Cd污染较为严重。

2.2 土壤重金属污染评价

植烟土壤中重金属污染指数和污染负荷评价结果如图2所示,植烟土壤中除Hg外,其余7种重金属均受到不同程度污染,Cd受污染的样点占89%,其中处于轻度、中度、重度污染样品分别占土壤样品数的

56%、21%、12%。有9%、13%的土壤样点受到Pb和As的污染,其中处于中度污染及以上的样品分别占2%、1%。P_i污染评价结果表明,Cd的污染最严重,研究区内矿业活动频繁,且区域内的矿业活动会导致周边土壤中Cd的累积^[21-23]。污染负荷指数(PLI)显示有9%的样点处于警戒线,1%的点位处于轻度污染,表明植烟土壤中部分样点的个别重金属污染已经致使该样点的土壤出现一定程度的污染。研究区整体污染情况并不严重,但仍需要加以重视并做好防御工作。

2.3 植烟土壤重金属来源解析

各元素间的相关性可以反映其来源或者富集特征等地球化学行为的相似性^[7]。如表2所示,Cu、Ni、Cr两两之间存在显著正相关性($P<0.01$),说明这3种元素很可能具有同一来源,Pb、Zn之间存在显著的正相关($P<0.01$),相关系数为0.802,两者具有高度的同源性。

为进一步明确研究区植烟土壤中各重金属的来源贡献,采用正定矩阵因子模型(PMF)对8种重金属元素进行定量源解析。本研究基于EPA PMF 5.0软件,将

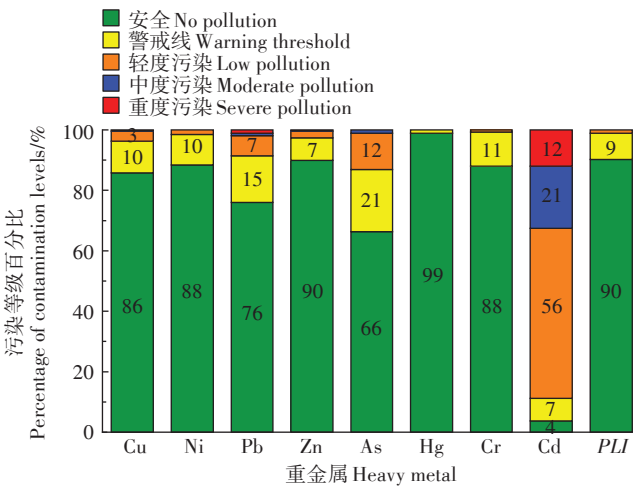


图2 研究区植烟土壤重金属污染等级百分比
Figure 2 The percentage of heavy metals contamination levels in tobacco-planting soils in the study area

表1 研究区植烟土壤重金属含量描述性统计(n=267)

项目 Item	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Cr	Cd
最大值/(mg·kg ⁻¹)	141	95	671	486	77.5	1.55	186	3.39
最小值/(mg·kg ⁻¹)	13	18	12	54	3.55	0.05	52	0.13
算术平均值/(mg·kg ⁻¹)	31	37.24	61.29	112.77	22.63	0.25	90.54	0.62
标准差/(mg·kg ⁻¹)	14.56	12.48	56.23	47.81	12.04	0.19	20.16	0.43
变异系数/%	46.96	33.81	92.42	42.71	53.23	77.31	22.40	70.71
贵州省土壤背景值/(mg·kg ⁻¹) ^[27]	32	39.1	35.2	99.5	20	0.11	95.9	0.66

表2 植烟土壤重金属含量相关性分析

Table 2 The correlation analysis of heavy metals content in tobacco-planting soils

项目 Item	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Cr	Cd	pH	OM
Cu	1									
Ni	0.816**	1								
Pb	0.383**	0.328**	1							
Zn	0.418**	0.490**	0.802**	1						
As	0.382**	0.326**	0.399**	0.282**	1					
Hg	0.096	0.043	0.249**	0.237**	0.357**	1				
Cr	0.498**	0.598**	0.120	0.246**	0.030	0.106	1			
Cd	0.073	0.205**	0.196**	0.327**	-0.020	0.101	0.405**	1		
pH	0.073	0.004	0.069	0.025	0.158**	-0.032	-0.080	0.080	1	
OM	0.044	-0.034	-0.134*	-0.043	-0.095	0.000	0.072	0.279**	0.110	1

注: *在0.05水平(双侧)上显著相关; **在0.01水平(双侧)上显著相关。

Note: * significant correlation at level 0.05(bilateral); ** significant correlation at level 0.01(bilateral).

元素浓度和不确定度导入PMF模型,在PMF拟合计算过程中,分别尝试不同的因子,当因子个数设定为5时, r^2 在0.59~1.00之间, Q_{robust} 和 Q_{true} 之间的值最小,残差在-3~3之间,表明所设定的因子数目能较好地解释原始数据的信息^[1,4]。

PMF来源解析结果如图3所示。因子1载荷比较大的重金属元素有Cu、Ni、Zn、Cr,贡献率分别为47.24%、49.43%、36.69%、48.53%。Cu、Ni、Zn、Cr的变异系数均相对其他元素较低,由相关性分析Cu、Ni、Cr具有同一起来源的可能性很大,且污染评价结果表明4种重金属均属于无污染水平。对土壤污染程度较低的重金属元素一般被认为与土壤母质成分有关^[4,13]。因此,推测因子1为自然源。

因子2主要载荷因子是Cd,贡献率为80.58%。研究区植烟土壤中Cd累积明显,其中88.76%的点位超过农用地土壤污染风险筛选值,且Cd含量变异系数较大(70.71%),说明Cd的含量主要受到人为活动的影响。研究区内铅锌矿产资源丰富^[21-23],Cd一般伴生于铅锌矿石中,铅锌冶炼过程中Cd作为废弃物排放进入环境中,导致土壤中Cd的富集^[28-30]。因此推测因子2主要为铅锌矿业源。

Pb在因子3中的贡献率高达73.29%,其次为Zn,载荷为29.98%。研究区植烟土壤中Pb和Zn相关性显著,具有高度同源性。此外,Pb和Zn的平均含量均超出贵州省土壤背景值(表1),表明这两种元素含量主要受人为活动的影响。Pb和Zn是交通排放的主要标志^[9,31],交通工具中含Pb汽油的燃烧、汽车引擎以及轮胎摩擦产生含Pb和Zn的污染物,会通过大气沉降和空气粉尘吸附作用在周边土壤中积累^[2,8]。采样时发现,大部分植烟土壤沿着交通道路分布,可能导

致大量的Pb和Zn在周边土壤中累积。此外,研究区内有着丰富的煤矿、铅锌矿以及锰矿资源^[28-29],特别是铅锌矿的开采和冶炼可能导致研究区土壤受Pb、Zn污染严重^[7,30]。因此,因子3可解释为交通和铅锌冶炼的混合源。

因子4上主要载荷元素为Hg,贡献率为80.70%,研究区内具有丰富的汞矿和煤矿资源,汞矿有着超过600 a的开采冶炼历史^[20],汞矿资源的开采和燃煤是我国两个最大的人为Hg释放源,其年均释放量是总释放量的80%,其中约40%的Hg以大气沉降的方式进入土壤^[4,12]。由图4可以看出,Hg浓度的高值区分布在汞矿和煤矿附近,因此研究区植烟土壤中重金属Hg的含量可能受到汞矿和煤矿开采燃烧的影响,推测因子4主要为汞矿和煤矿源。

因子5的主要载荷元素为As,其贡献率为79.05%。As的变异系数为53.23%,表明植烟土壤中As受到人为活动影响,具有高度变异性。已有大量研究表明,土壤中As含量与施用农药、化肥等农业活动有关^[1,5,11]。我国是农业种植大国,但农药、化肥的利用率只有30%^[32],大量含As农药和肥料施用导致农业土壤中As富集明显。有研究表明,植烟土壤中常用的砷酸铅、砷酸钙、亚砷酸钠和三氧化二砷等含As农药以及氮肥、磷肥、钾肥等烟草专用肥的施用,所剩余的残留物滞留在土壤中逐渐积累,造成As污染^[10,33-34]。此外,有农户用家养牲畜排放的粪便给烟田土壤施肥,由于养殖牲畜的饲料中有如洛克沙肿等含As的化合物添加剂^[35],这类饲料经动物吸收代谢和粪便排放而进入土壤中,也会造成土壤中As的积累。因此因子5可解释为农业源。

综上分析,研究区植烟土壤重金属主要有5种来

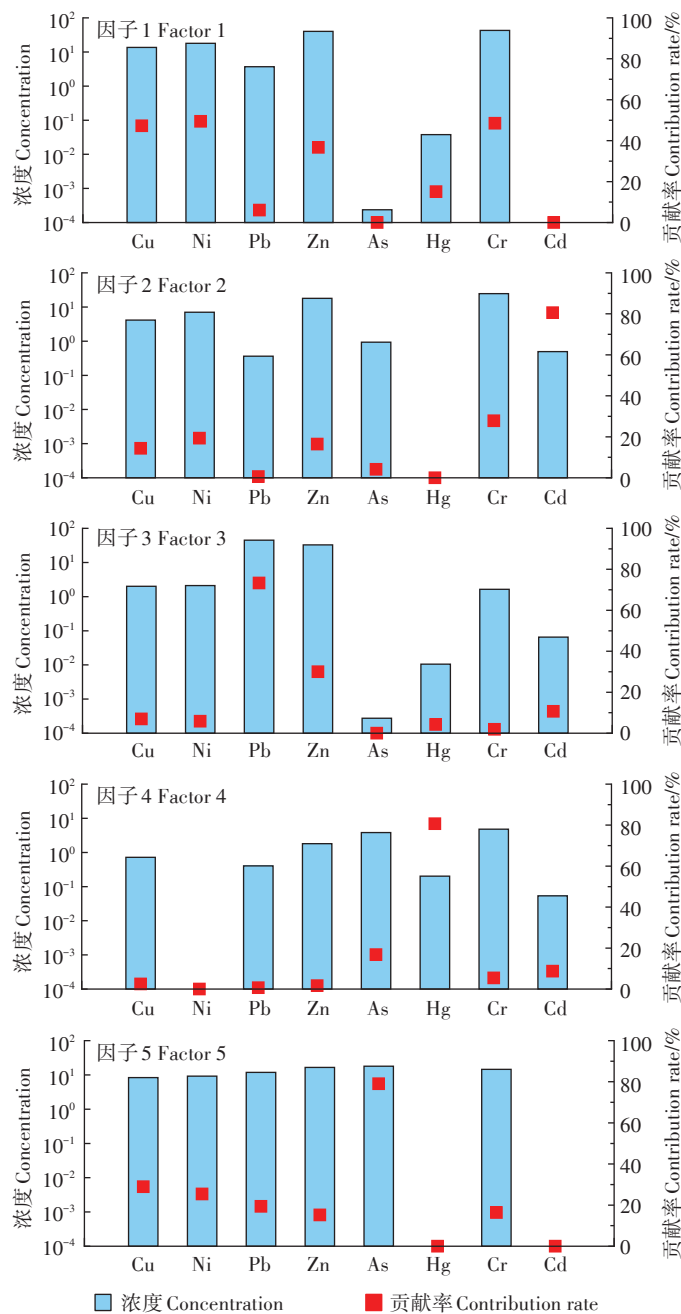


图3 研究区植烟土壤重金属污染源解析贡献图

Figure 3 The contribution map of heavy metals pollution source apportionment in tobacco-planting soils in study area

源,即自然来源、铅锌矿业源、交通和铅锌冶炼混合源、汞矿和煤矿源、农业源,其来源贡献率分别为25.38%、20.41%、16.6%、14.56%、23.05%。其中矿业和农业活动是研究区植烟土壤中重金属污染的主要来源,应加强源头管理和控制。

3 结论

(1)研究区植烟土壤重金属中,Cu、Ni、Cr、Cd的均值未超贵州省土壤背景值,Hg、Pb、Zn、As平均含量

分别为贵州省背景值的2.27、1.74、1.13、1.13倍,Pb、Zn、As、Cd与风险筛选值相比的超标率分别为8.58%、2.61%、13.06%、88.43%,表明这些重金属在植烟土壤中均存在一定的污染。

(2)污染评价结果表明,研究区植烟土壤中Cd污染较严重,其次是Pb和As,Cd、Pb、As处于中度污染及以上分别占土壤样品数的33%、2%、1%。污染负荷指数评价结果显示大部分植烟土壤整体处于无污染范畴。

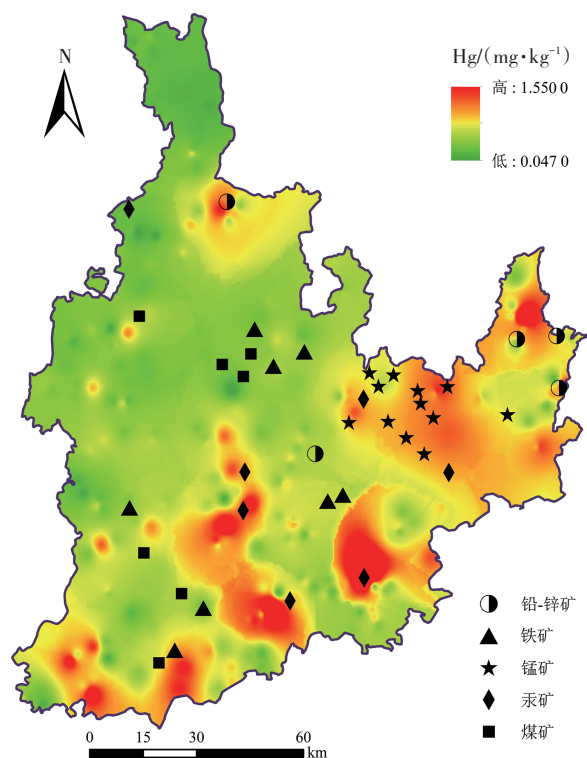


图4 研究区植烟土壤汞含量及矿点的空间分布

Figure 4 The spatial distribution of Hg content and mineral spots in tobacco-planting soils in the study area

(3) 正定矩阵因子模型(PMF)解析结果表明, Cu、Ni、Zn、Cr主要来源于成土母质, 贡献率为25.38%; Cd主要受铅锌矿业源的影响, 贡献率为20.41%; Pb以交通源和铅锌矿业源为主, 贡献率为16.60%; Hg以汞矿和煤矿源为主, 贡献率为14.56%; As主要受农业源的影响, 贡献率为23.05%。农业和矿业对研究区内植烟土壤重金属累积的贡献比较明显, 在今后烟草种植上应合理施用达标的农药和化肥, 以保证烟草的安全生产, 此外还应考虑矿业活动、交通活动对植烟土壤重金属的影响, 注意烟草种植的布局, 以减少污染来源, 降低污染排放量。

参考文献:

- [1] FEI X F, LOU Z H, XIAO R, et al. Contamination assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soil through the synthesis of PMF and GeogDetector models[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 747:141293.
- [2] ALSBOU E M E, AL-KHASHMAN O A. Heavy metal concentrations in roadside soil and street dust from Petra region, Jordan[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 190(1):48.
- [3] BANDERIA C M, ALMEIDA A Á, CARTA C F L, et al. Tobacco influence in heavy metals levels in head and neck cancer cases[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(27):27650-27656.

- [4] LIU H W, ZHANG Y, ZHOU X, et al. Source identification and spatial distribution of heavy metals in tobacco-growing soils in Shandong Province of China with multivariate and geostatistical analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(6):5964-5975.
- [5] WANG Y T, GUO G H, ZHANG D G, et al. An integrated method for source apportionment of heavy metal(oids) in agricultural soils and model uncertainty analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 276:116666.
- [6] CHAI L, WANG Y H, WANG X, et al. Quantitative source apportionment of heavy metals in cultivated soil and associated model uncertainty[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 215:112150.
- [7] 王乔林, 宋云涛, 王成文, 等. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8):3693-3703. WANG Q L, SONG Y T, WANG C W, et al. Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in western Yunnan[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8):3693-3703.
- [8] MEN C, LIU R M, WANG Q R, et al. The impact of seasonal varied human activity on characteristics and sources of heavy metals in metropolitan road dusts[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637-638:844-854.
- [9] CUI Z W, WANG Y, ZHAO N, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in paddy soils of Yongshuyu irrigation area from Songhua River basin, northeast China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(5):797-809.
- [10] WU H W, LIU Q Y, MA J, et al. Heavy metal(oids) in typical Chinese tobacco-growing soils: Concentrations, influence factors and potential health risks[J]. *Chemosphere*, 2020, 245:125591.
- [11] 霍明珠, 高秉博, 乔冬云, 等. 基于APCS-MLR受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(5):978-986. HUO M Z, GAO B B, QIAO D Y, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soil based on the APCS-MLR model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5):978-986.
- [12] 伍海闻, 罗婷, 马瑾, 等. 基于PCA和地统计的西南烟田土壤重金属源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5):1010-1018. WU H W, LUO T, MA J, et al. Principal component analyses and geostatistical analyses to estimate source apportionment of heavy metal(oids) in tobacco-growing soils in the southwest region of China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5):1010-1018.
- [13] LIU H W, WANG H Y, ZHANG Y, et al. Risk assessment, spatial distribution, and source apportionment of heavy metals in Chinese surface soils from a typically tobacco cultivated area[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(17):16852-16863.
- [14] SAHA N, RAHMAN M S, JOLLY Y N, et al. Spatial distribution and contamination assessment of six heavy metals in soils and their transfer into mature tobacco plants in Kushtia district, Bangladesh[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(4):3414-3426.
- [15] WU H W, LIU Q Y, MA J, et al. Heavy metal(oids) in typical Chinese tobacco-growing soils: Concentrations, influence factors and potential health risks[J]. *Chemosphere*, 2020, 245:125591.
- [16] LIN W, LIU J, FENG Y, et al. First report of tobacco bacterial hollow stalk caused by *Dickeya chrysanthemi* (syn. *Erwinia chrysanthemi*) in

- Nanping, China[J]. *Plant Dis*, 2020, 104(12): 3248.
- [17] PROSHAD R, ZHANG D, UDDIN M, et al. Presence of cadmium and lead in tobacco and soil with ecological and human health risks in Sichuan Province, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(15): 18355–18370.
- [18] 胡鑫, 罗真华, 谢会雅, 等. 土壤性质对烟叶中铅、镉含量的影响及预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 449–454. HU X, LUO Z H, XIE H Y, et al. Soil property effects on and prediction models of lead and cadmium concentrations in tobacco leaves[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 449–454.
- [19] 王建波, 李明海, 史训瑶, 等. 铜仁烤烟糖含量特征及空间分布[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2018, 30(1): 30–32. WANG J B, LI M H, SHI X Y, et al. Characteristics and spatial distribution of sugar content in flue-cured tobacco in Tongren[J]. *Journal of Hunan University of Arts and Science(Science and Technology)*, 2018, 30(1): 30–32.
- [20] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 474–480. ZHAN T L, HUANG Y, TENG Y, et al. Pollution characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan mining areas, Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2): 474–480.
- [21] 周浪, 张云霞, 徐启翀, 等. 铜仁市土壤-玉米重金属含量及其健康风险[J]. 环境化学, 2021, 40(1): 213–222. ZHOU L, ZHANG Y X, XU Q C, et al. Concentrations and health risk assessments of heavy metal contents in soil-corn system of Tongren, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(1): 213–222.
- [22] 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 等. 铜仁土壤-水稻重金属积累效应与安全种植区划[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5988–5996. ZHU L L, WU Y, ZHOU L, et al. Heavy metal accumulation effect and safe planting zoning of soil and rice in Tongren[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 5988–5996.
- [23] 蒋宗宏, 陆凤, 马先杰, 等. 贵州铜仁典型锰矿区土壤及蔬菜重金属污染特征及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 293–300. JIANG Z H, LU F, MA X J, et al. Characteristics and health risk assessments of heavy metals in soils and vegetables in manganese mining areas in Tongren County, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 293–300.
- [24] 贾佳瑜, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 汾河流域下游农田土壤重金属空间分布特征与污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(8): 132–137. JIA J Y, LIU X F, ZHAO Y G, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in the lower reaches of Fenhe River basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(8): 132–137.
- [25] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, 33(1): 566–575.
- [26] 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.
- [27] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 329–368. China National Environmental Monitoring Centre. China's soil element background values[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 329–368.
- [28] 田景银, 孙科, 周颖. 刍议贵州铜仁卜口-松桃地区铅锌矿找矿方向[J]. 冶金与材料, 2019, 39(4): 155–157. TIAN J Y, SUN K, ZHOU Y. Discussion on prospecting direction of Pb Zn deposit in Bukou Songtao area, Tongren, Guizhou[J]. *Metallurgy and Materials*, 2019, 39(4): 155–157.
- [29] 于玉帅, 刘阿睢, 戴平云, 等. 贵州铜仁塘边铅锌矿床成矿时代和成矿物质来源——来自Rb-Sr同位素测年和S-Pb同位素的证据[J]. 地质通报, 2017, 36(5): 885–892. YU Y S, LIU A S, DAI P Y, et al. The metallogenic epoch and ore-forming material source of the Tang bian Pb-Zn deposit in Tongren, Guizhou Province: Evidence from Rb-Sr dating of sphalerites and S-Pb isotope[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(5): 885–892.
- [30] 朱晓丽, 薛博倩, 李雪, 等. 基于PMF模型的宝鸡铅锌尾矿库周边农田土壤重金属源解析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 43–53. ZHU X L, XUE B Q, LI X, et al. Sources apportionment of heavy metals in farmland soil around lead-zinc tailings reservoir based on PMF model[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(1): 43–53.
- [31] XU Z, MI W B, MI N, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in desert steppe soil related to transportation and industrial activities[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(31): 38835–38848.
- [32] JIANG H H, CAI L M, WEN H H, et al. Characterizing pollution and source identification of heavy metals in soils using geochemical baseline and PMF approach[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 6460.
- [33] 穆青, 刘洋, 展彬华, 等. 我国植烟土壤主要问题及其防控措施研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 16–20. MU Q, LIU Y, ZHAN B H, et al. Research progress on main problems and control measures of tobacco growing soil in China[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(21): 16–20.
- [34] LIU H W, ZHANG Y, ZHOU X, et al. Source identification and spatial distribution of heavy metals in tobacco-growing soils in Shandong Province of China with multivariate and geostatistical analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(6): 5964–5975.
- [35] 李银生, 曾振灵, 陈杖榴, 等. 洛克沙砷对养猪场周围环境的污染[J]. 中国兽医学报, 2006, 26(6): 665–668. LI Y S, ZENG Z L, CHEN Z L, et al. Contamination of roxarsone to the environment around pig farm[J]. *China Veterinary Journal*, 2006, 26(6): 665–668.

(责任编辑:叶飞)