

黑土区小流域土壤重金属生态危害与来源解析

刘媚媚 高凤杰* 韩晶 王鑫 郭欣欣

(东北农业大学 公共管理与法学院, 哈尔滨 150030)

摘要 为探明黑土区土壤重金属污染状况,以海沟河小流域为研究区域共采集 136 个土壤样品,分别测定土壤样品中重金属 Cu、Zn、Hg、As、Ni 和 Cr 的含量。采用潜在生态危害指数进行重金属污染评价,并通过主成分分析和正定矩阵因子分析的方法进行土壤重金属污染来源解析,结果表明:1)参照黑龙江省土壤背景值,该地区土壤中重金属 Cu、Zn、Hg、Ni 和 Cr 均存在超标现象,超标率分别为 16.2%、28.7%、93.4%、48.5%和 19.1%,且均处于中等变异程度,都受到人为因素的影响;2)潜在生态危害指数表明该地区土壤重金属整体处于低风险等级,除 Hg 外其他重金属元素也都处于低风险等级,而 Hg 元素处于中风险等级,具有潜在的生态危害性;3)通过源解析基本可以确定该地区重金属污染有 4 种来源,分别为自然源与大气沉降源、工业农业活动源、生活污染源和交通源,其中 Hg 的主要来源是燃煤活动,Cu 主要是由于化肥的过量施用,Zn、Ni 和 Cr 的累积主要与交通运输有关。

关键词 土壤重金属;生态危害;正定矩阵因子分析;源解析;黑土区小流域

中图分类号 X53 **文章编号** 1007-4333(2020)11-0012-10 **文献标志码** A

Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in a Mollisol watershed of China

LIU Meimei, GAO Fengjie*, HAN Jing, WANG Xin, GUO Xinjin

(School of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract To explore the potential ecological risk and pollution source of heavy metals, including Hg, As, Cr, Cu, Zn, and Ni in Mollisol water shed, a total of 136 samples were taken as study materials. The potential ecological risk index, correlation analysis, principal component analysis and PMF analysis were employed to reveal the heavy metal pollution situation and source. The main results were as follows: 1) The metal pollution of Cu, Zn, Hg, Ni and Cr have exceeded the soil background value of Heilongjiang Province, and the over standard rates were 16.2%, 28.7%, 93.4%, 48.5% and 19.1%, respectively. They all showed a moderate variation and were impacted by human activities; 2) The potential ecology risk index indicated that Hg was at a medium risk level and other elements were at a low risk level; 3) Pollution source analysis showed that the heavy metal pollution was mainly from 4 kinds of sources, e.g. natural and atmospheric subsidence source, industrial and agricultural activities source, domestic pollution source and transportation source. The main source of Hg was coal-fired activity, Cu pollution was mainly due to excessive application of chemical fertilizer, and the accumulations of Zn, Ni and Cr were mainly related to transportation.

Keywords soil heavy menta; ecological risk; positive matrix factorization; source analysis; a Mollisol watershed

近年来土壤污染治理问题也越来越成为社会关注的焦点,“十九大”关于生态文明建设中明确提出要强化土壤污染管控和修复,扎实推进土壤污染防治,2016年国务院印发的《“十三五”生态环境保护

规划》^[1]中也提出要全面实施《土壤污染防治行动计划》^[2],其中要求强化重点区域的土壤污染的防治。黑土是我国最肥沃的土壤之一,其养分含量丰富,十分适合植物生长。东北平原是世界上三大黑土区之

收稿日期:2019-10-22

基金项目:国家自然科学基金(31700407);黑龙江省自然科学基金(LH2019D003)

第一作者:刘媚媚,硕士研究生,E-mail:lmmmei@163.com

通讯作者:高凤杰,副教授,主要从事资源环境遥感研究,E-mail:gaojiecumt@126.com

一,是我国最重要的商品粮生产基地。但同时该地区由于长期的重工业发展,多种重金属元素通过大气粉尘沉降和污水排放等途径进入土壤,导致东北地区土壤中重金属累积含量较高,2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》也显示东北老工业基地的土壤污染问题较为严重^[3]。2017 年农业部会同国家发展和改革委员会、财政部、国土资源部、环境保护部和水利部联合发布《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)》^[4],旨在保护这片珍贵的土壤资源,提高黑土区发展的可持续性,保障国家粮食安全,提高我国农产品竞争力。

重金属污染是我国土壤环境污染的主要问题,严重影响我国的粮食生产安全以及人民的生命健康^[5-6],确定土壤重金属污染风险程度以及重金属污染来源能够有效为土壤污染风险治理提供科学依据。在对重金属进行源解析的研究中,国内外学者采用的研究方法主要包括多元统计方法、化学质量平衡模型、同位素比值法、正定矩阵因子分析法等,其中正定矩阵因子分析法(PMF)在进行源解析时不要求测定源成分谱,在求解过程中对因子载荷和得分做非负约束时,可对每个数据引入不确定性估计,使解析结果更具有实际意义,将 PCA(主成分分析)与 PMF 相结合定量分析各种污染因子对土壤重金属的贡献率,能够有效提取重金属污染的不同来源。当前,已有学者开展关于土壤重金属污染的相关研究,但大多都是基于行政区域范围。崔勇等^[7]对湖南省长沙市近郊的莲花镇开展重金属生态风险评价,刘瑞雪等^[8]就湖南省湘潭县农田进行生态风险评价。或是基于特定区域,杨磊等^[9]对新疆

维吾尔自治区准东煤田进行重金属来源解析与生态风险评价,王涛等^[10]对山西省内某钼矿区进行重金属评价。流域中的重金属空间分布受地形地貌、水文地质和土地利用等影响剧烈,且集工业点源污染、农业面源污染及快速城市化辐射的影响,重金属来源多样且交叉性很强,表现出复杂的空间分布格局。以流域为研究范围进行土壤重金属污染分析的研究鲜有报道。因此,本研究以黑土区小流域为研究区,依据潜在生态风险指数对土壤重金属进行生态危害评价,并结合主成分分析(PCA)和正定矩阵因子分析(PMF)的方法计算,旨在对该地区重金属污染来源进行解析,以期为该地区的土壤环境污染预警和治理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市阿城区的西北部,地理位置坐标介于 $45^{\circ}34'18'' \sim 45^{\circ}40'50''$ N、 $126^{\circ}55'45'' \sim 127^{\circ}10'05''$ E,总面积为 119.73 km^2 ,见图 1。研究区小流域内地形变化幅度较大,地势自西向东逐渐增高,西部为水田耕作区,中部为旱地耕作区,东部为低山丘陵林地景观。流域内土壤类型主要为黑土,气候为中温带大陆性季风气候,冬长夏短,四季分明,年平均降水量为 $500 \sim 600 \text{ mm}$ 。流域位于城市边缘,受城市发展带动,进入 21 世纪以来经济和交通等发展迅速。长期的农业开发及近 20 年经济建设活动,对土壤扰动剧烈,因此选取松嫩平原南端黑土带上城市近郊小流域作为研究区。

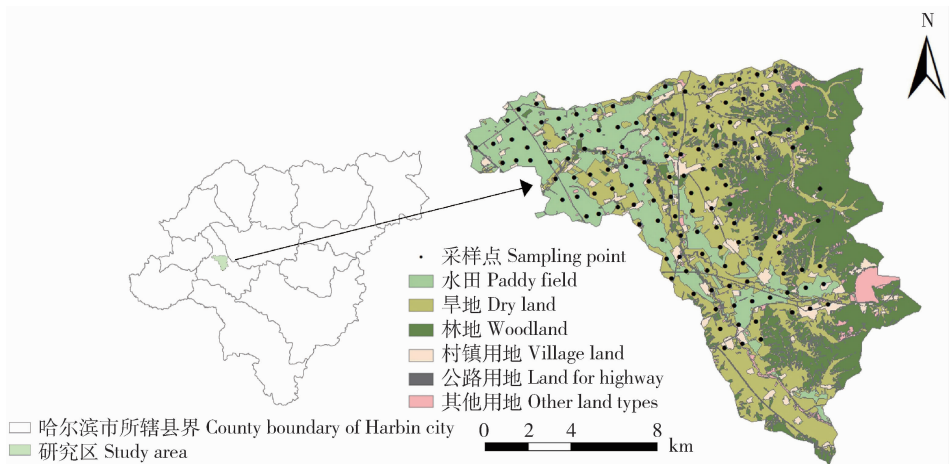


图 1 研究区及采样点分布示意图

Fig. 1 Location of study area and distribution of sampling sites

1.2 样品采集与数据处理

1.2.1 样品采集与测定

以经纬度每 40" 为间隔对研究区进行室内网格预布点,并在采样过程中通过手持 GPS 进行空间定位以保证点位的准确性。为减少随机误差影响,使用“五点法”等量收集主采样点附近分样点表层土壤,采样深度 0~20 cm,并将采样土壤磨细过筛以四分法提取均匀混合的土壤样品,采样同时记录经纬度坐标、耕作方式、秸秆还田、坡位、坡向、土地利用和前茬植被等信息,共采集 136 组土壤样品。

将装袋后的土壤样品委托第三方检测机构检测分析,实验室在去除样品杂质、恒温干燥箱干燥和研磨后,过 100 目尼龙筛混匀,依据《国家环境土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)^[11]对样品进行前处理,通过日立 Z-2000 型原子吸收分光光度计检测样品中的铜、锌、汞、镍和铬元素含量,砷元素通过原子荧光光谱仪(北京吉天仪器公司,AFS-820 型)采用原子荧光法进行检测。每个样品 3 次重复,取平均值。

1.2.2 数据处理

本研究主要采用 SPSS 25.0 软件对重金属数据进行描述性统计分析和正态分布检验,并通过 Minitab 软件对部分数据进行转换以符合正态分布的要求;重金属元素的污染来源分析包括主成分分析(PCA)和正定矩阵因子分析(PMF),主要在 SPSS 25.0 和 EPA PMF 5.0 软件中对数据进行处理。

1.3 研究方法

1.3.1 潜在生态危害指数

潜在生态危害指数法可以用于评价土壤或沉积物中重金属污染程度及其潜在生态危害^[12],不仅可以反映单因子重金属的污染情况,还能定量分析多种重金属的综合污染情况,其计算公式为:

$$E_i^r = T_i^r \times C_i^r = T_i^r \times \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^r \quad (2)$$

式中: E_i^r ,单个重金属的潜在生态危害指数; T_i^r ,元素 i 的毒性响应系数,用来反映重金属在水相、沉积固相和生物相之间的响应关系,参考用 Hakanson 制定的重金属标准毒性响应系数^[13] Cu、Zn、Hg、As、Ni 和 Cr 的毒性响应系数分别为 5、1、40、10、5、2; C_i ,重金属含量,mg/kg; S_i ,每种重金属元素的参比值,分别参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[14]中的农用地土壤污染风险筛选值和黑龙江省土壤背景值(表 1),探讨研究区在不同背景值下的潜在生态危害情况;RI,综合潜在生态危害指数,用于描述某一点多个污染物的潜在生态危害指数的综合值。由于 Hakanson 提出的评价指标基于 8 种重金属元素^[15],本试验研究的重金属元素为 6 种,根据重金属元素的毒性响应系数计算出调整后的潜在生态危害评价指标,见表 2。

表 1 潜在生态危害参评标准

Table 1 Evaluation standard of potential ecological risk assessment

参比值 Reference value	Cu	Zn	Hg	As	Ni	Cr
农用地土壤污染风险筛选值 Risk screening value of agricultural soil pollution	50.0	200.0	1.800	40.0	70.0	0.3
黑龙江省土壤背景值 Soil background value of Heilongjiang Province	19.7	68.4	0.033	6.3	21.6	58.5

1.3.2 正定矩阵因子分解(PMF)模型

PMF 模型是一种可应用于解析环境污染物的因子分析模型,将样品元素含量的数据矩阵分解为因子贡献矩阵和因子分布矩阵^[16], Q 为 PMF 中的目标函数,当 Q 值接近数据集的自由度时表示拟合结果较理想,基本公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (4)$$

表 2 潜在生态危害评价指标

Table 2 Indices of potential ecological risk assessment

潜在危害程度 Potential risk level	综合潜在生态危害指数 Potential ecological risk index		单项重金属 潜在生态危害 指数 E_i^r
	Hakanson 评价指标 Hakanson's evaluation Index	调整后评价指标 Evaluation index after adjustment	
低 Low	<150	<90	<40
中等 Middle	150~300	90~150	40~80
强 Strong	300~600	150~290	80~160
极强 Very strong	≥ 600	≥ 290	160~320
危险 Dangerous			≥ 320

式中： x_{ij} ，第 i 个样品中的第 j 个元素浓度，mg/kg； u_{ij} ，第 i 个样品中第 j 个元素的浓度不确定度； g_{ik} ，第 k 种来源对样品 i 的贡献； f_{kj} ，第 k 种来源中第 j 种元素浓度，mg/kg； e_{ij} ，残差矩阵，由目标函数 Q 的最小值计算。使用 PMF 法对重金属元素进行来源解析时，需要通过载入元素浓度和元素浓度不确定度，本研究中重金属浓度均大于方法检出限，不确定度的计算方法为：

$$\text{UNC} = \sqrt{(\sigma \times c)^2 + (\text{MDL})^2} \quad (5)$$

式中： σ ，相对标准偏差； c ，重金属元素浓度，mg/kg；MDL，方法检出限。PMF 法在计算过程中需提前设定因子数才能更好反映不同因子中重金属的贡献率情况，因子数量的过多与过少会对解析结果造成误差，主要通过寻找最小值 Q 来确定因子数量。经过因子数的多次调整与尝试，当因子数设置为 4 时，经过 20 次迭代运算，得到最小 Q 值为 4.5，残差数值均在 $[-2, 2]$ ，可以进行模型拟合。此时元素 Cu、Hg、Ni 和 Cr 的信噪比 S/N 均 > 1 ，元素 Zn 和 As 的信噪比 > 0.6 ，从模型的预测值与实测值的拟合效果来看，元素 Cu、Hg、Ni 和 Cr 的判定系数 r^2 均能达到 0.999，元素 Zn 和 As 的 $r^2 > 0.8$ ，说明该 PMF 模型的整体拟合效果较好，能充分解释原始数据中所包含的信息，其预测结果可以用于研究分析。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量统计特征分析

由表 3 可知，Cu、Zn、Hg、As、Ni 和 Cr 的重金属含量均值分别为 16.334、70.684、0.063、0.058、

21.775 和 49.649 mg/kg。6 种重金属元素的变异系数按从大到小表现为 $\text{Zn} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Cr}$ ，说明该区域重金属元素中 Zn 受外界因子影响最大，Cr 含量受影响最小。按照一般 CV 评估标准， $\text{CV} < 10\%$ 为弱变异性； $\text{CV}, 10\% \sim 100\%$ 为中等变异； $\text{CV} > 100\%$ 为强变异性。

由表 3 可知，这 6 种重金属元素含量的变异系数都属于中等变异程度。以黑龙江省土壤背景值为标准计算研究区土壤重金属元素的超标情况，结果显示，除 As 其他 5 种重金属元素都存在超标情况，其中 Hg 元素的超标更是达到 93.4%，表明该地区存在一定程度的重金属污染情况。

对 6 种重金属元素含量进行 K-S 检验后得出 Hg、Ni 和 Cr 符合正态分布，采用 Minitab 软件对 Cu、Zn 和 As 进行转换后也满足正态分布，可进行模型拟合，见表 4。

2.2 土壤重金属生态危害评价分析

由表 5 可知，分别以农用地土壤污染风险筛选值和黑龙江省土壤背景值参考依据，计算得出研究区土壤重金属潜在生态危害指数的结果具有较大差异。由图 2(a)可知，当以农用地土壤污染风险筛选值为参比值时，该小流域 6 种重金属元素 Cu、Zn、Hg、As、Ni 和 Cr 的单项潜在生态危害指数 E_i^r 均 < 40 ，属于轻微污染程度，该标准下的综合潜在生态危害指数 RI 也远远小于轻微污染的标准，表明研究区重金属元素的污染和对生态的危害风险较小，对比各单项潜在生态危害指数的平均值，生态危害从大到小分别为 $\text{Cu} > \text{Ni} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{As}$ 。

表3 土壤重金属含量描述性统计特征

Table 3 Descriptive statistics of soil heavy metal contents

元素 Element	均值/(mg/kg) Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation	背景值/(mg/kg) Background value	超标率/% Excessive rates
Cu	16.334	5.689	34.83	19.700	16.2
Zn	70.684	60.849	86.09	68.400	28.7
Hg	0.063	0.021	32.94	0.033	93.4
As	0.058	0.033	56.79	6.300	0
Ni	21.775	5.419	24.89	21.600	48.5
Cr	49.649	11.323	22.81	58.500	19.1

注:表中共计成列 136 个有效案数。

Note: Number of valid cases listed are 136.

表4 数据的 K-S 检验

Table 4 K-S test of data

元素 Element	P	转换后 P 值 Converted P value	概率分布 Probability distribution
Cu	0.000	0.200	正态
Zn	0.000	0.200	正态
Hg	0.079	无转换	正态
As	0.000	0.200	正态
Ni	0.200	无转换	正态
Cr	0.057	无转换	正态

由图 2(b)可知,以黑龙江省土壤背景值为参比值时,研究区的潜在生态危害指数除元素 Hg 以外的其他重金属元素最大单项指数均 <40 ,综合潜在生态危害指数也并未超过轻微污染的标准,但 Hg 元素的单项潜在生态危害指数平均值为 76.91,属于中等强度生态危害,且最大值 >160 具有极强程度的生态危害,该地区应特别关注 Hg 元素的来源并加以管控,着重加强 Hg 元素的土壤治理,以防止重金属产生进一步的污染与危害。以黑龙江省背景值为参比值进行计算的潜在生态危害从大到小分别为 $Hg>Ni>Cu>Cr>Zn>As$,这与以农用地土壤风险筛选值为标准计算的结果略有不同,表明在计算潜在生态危害时不同的参评标准会产生不同的结果,需要综合考虑实际情况进行选择。

表5 土壤重金属潜在生态危害指数

Table 5 The potential ecological risk index of soil heavy metals

评价标准 Evaluation standard	单项潜在生态危害指数 E_i						潜在生态危害指数 RI
	Cu	Zn	Hg	As	Ni	Cr	
农用地土壤风险筛选值	1.633	0.353	1.410	0.014	1.555	0.662	5.629
黑龙江省土壤背景值	4.146	1.033	76.910	0.092	5.040	1.697	88.919

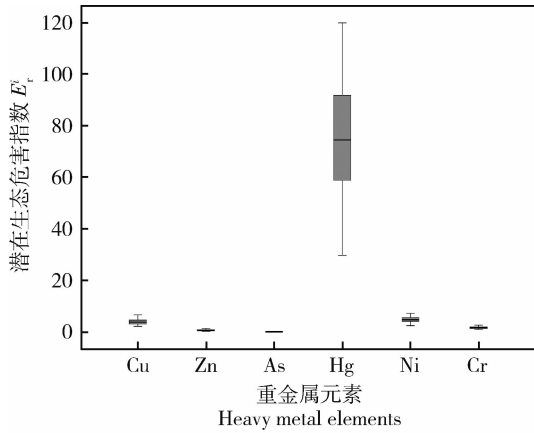
2.3 土壤重金属污染来源分析

2.3.1 主成分分析

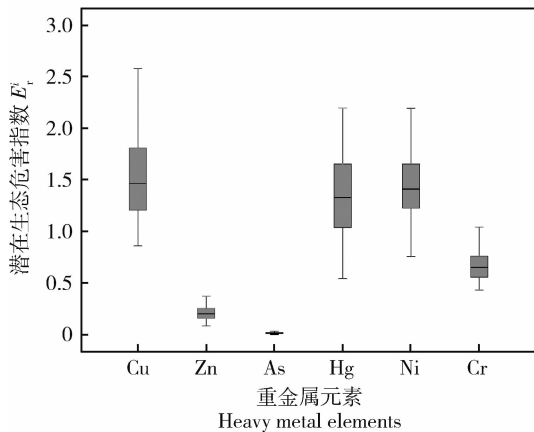
由表 6 可知,从研究区小流域土壤重金属元素中共提取出 4 个主成分,累计总贡献率达 88.70%,

基本可以全面反映重金属元素的来源情况。

第一主成分 PCA1 的贡献率达 36.78%,在 As 和 Cr 上具有较高的正载荷,通过统计特征分析发现研究区土壤中 As 并未超过土壤背景值,而 Cr 的



(a) 基于农用地土壤污染风险筛选值计算的潜在生态危害指数 E_p based on risk screening value of agricultural soil pollution



(b) 基于黑龙江省土壤背景值计算的潜在生态危害指数 E_p based on soil background value of Heilongjiang Province

图 2 流域重金属污染生态评价

Fig. 2 Ecological evaluation of heavy metals in the watershed

变异系数在几种重金属元素中最小为 22.81%，可以得出该主成分受成土母质的影响很大。已有研究表明，Cr 在土壤中的累积主要通过工业粉尘在大气中的沉积而形成^[17]，所以该主成分可以解释为由自然来源和大气沉降污染相结合的污染来源。

第二主成分 PCA2 在 Cu、Zn 和 Ni 上的载荷都超过 0.5，总贡献率为 24.15%，该主成分主要是由工业和农业活动导致的。农业生产过程中所使用的化肥农药特别是有机肥的大量施用，会造成 Cu 和 Zn 等在土壤中的积累。此外，工业生产过程中的废气排放及燃料的使用会释放出重金属 Ni 和 Zn，随大气沉降及地表径流进入土壤环境，故该主成分可解释为工业和农业的共同污染源。

第三主成分 PCA3 贡献率占比为 14.90%，Hg 的正载荷最高，一个主要来源是煤炭的燃烧^[21]，研究区位于我国高纬度地区，居民冬季采暖对煤炭的使用量很大，煤燃烧后产生的气体里含有大量汞颗粒可经沉降进入土壤，且研究区内 Hg 元素的样本超标率最高，达到 93.4%，这与研究区内居民点多且分散采暖方式有关，所以该主成分可解释为生活污染源。

第四主成分 PCA4 中以 Zn 为主导元素，贡献率为 12.87%，研究区位于城市边缘城区，近年来交通有很大发展，汽车的轮胎在磨损的过程中会产生 Zn 并通过大气粉尘进入周边土壤，该主成分可以解释为由交通运输引起的污染源。

表 6 主成分分析结果

Table 6 The result of principal component analysis

元素 Element	主成分 1 PCA1	主成分 2 PCA2	主成分 3 PCA3	主成分 4 PCA4
Cu	0.318	0.653	0.102	-0.531
Zn	0.363	0.575	-0.102	0.681
As	0.882	-0.434	-0.024	-0.012
Hg	0.477	0.223	0.781	0.058
Ni	0.445	0.522	-0.490	-0.149
Cr	0.877	-0.425	-0.147	-0.033
特征值	2.207	1.449	0.894	0.772
贡献率/%	36.780	24.153	14.893	12.869
累积贡献率/%	36.780	60.933	75.826	88.696

2.3.2 PMF 模型分析

由表 7 可知,源 1 主要的荷载元素为 As 和 Cr,与第一主成分的结果显示一致,为成土母质带来的自然源和大气沉降源相结合;源 2 中主要的荷载因子为 Zn、Ni 和 Cr,汽车轮胎磨损产生的 Zn 以及汽车在运行过程中尾气中的 Ni 和 Cr 会进入大气经过运移最终沉降到土壤中^[24],所以该因子可解释为交通源;源 3 中 Hg 的贡献率高达 85.3%,可解释为煤炭燃烧后产生的大量 Hg 元素,与第三主成分的结果一致,可解释为生活污染源;源 4 中 Cu、Zn 和 Ni 具有

较高贡献率,这与第二主成分分析的结果基本一致,化肥农药的过量施用与工厂污水废气的随意排放会造成这几种重金属在土壤中的大量累积,该因子的污染源为工业活动和农业活动共同引起的。PMF 模型的源解析结果与主成分分析的结果基本类似,研究区小流域土壤的污染来源基本确定为 4 种,按其对于研究区污染的贡献率排序,分别是以 As 和 Cr 为主导的由自然源和工业粉尘导致的大气沉降污染源,以 Cu、Zn 和 Ni 为主导的工业农业污染源,以 Hg 为主导的煤燃烧产生的生活污染源及以 Zn 为主导的交通污染源。

表 8 土壤重金属污染源贡献率

Table 8 The contribution rate of soil heavy metal pollution sources %

元素 Element	源 1 Source 1	源 2 Source 2	源 3 Source 3	源 4 Source 4
Cu	27.9	10.2	0.1	61.7
Zn	16.8	18.6	16.0	48.6
As	64.1	1.3	34.5	0.1
Hg			85.3	14.7
Ni	8.6	65.6	2.5	23.3
Cr	41.8	25.3	19.9	13.0

注:源 1 主要的荷载元素为 As 和 Cr,与第一主成分的结果显示一致,为成土母质带来的自然源和大气沉降源相结合;源 2 中主要的荷载因子为 Zn、Ni 和 Cr,汽车轮胎磨损产生的 Zn 以及汽车在运行过程中尾气中的 Ni 和 Cr 会进入大气经过运移最终沉降到土壤中^[24],所以该因子可解释为交通源;源 3 中 Hg 的贡献率高达 85.3%,可解释为煤炭燃烧后产生的大量 Hg 元素,与第三主成分的结果一致,可解释为生活污染源;源 4 中 Cu、Zn 和 Ni 具有较高贡献率,这与第二主成分分析的结果基本一致,化肥农药的过量施用与工厂污水废气的随意排放会造成这几种重金属在土壤中的大量累积,该因子的污染源为工业活动和农业活动共同引起的。

Note: The main load elements of source 1 are As and Cr, which are consistent with the results of the first principal component. The source 1 mainly comes from the combination of natural sources brought by the parent materials and atmospheric sedimentation sources. The main load factors in source 2 are Zn, Ni and Cr. Zn produced by automobile tire wear while Ni and Cr in the exhaust gas of the car during the operation^[24], so this factor can be interpreted as the traffic source. The contribution rate of Hg in source 3 is 85.3%, which can be interpreted as a large amount of Hg element produced after coal combustion and is consistent with the result the third of principal component. This factor can be interpreted as a source of domestic pollution. Cu, Zn, and Ni in source 4 have a higher contribution rate, which is the same as the result of the second main component analysis basically, the excessive application of fertilizers and pesticides and the random discharge of factory waste water will cause a large accumulation of these heavy metals in the soil. This factor is caused by industrial activities and agricultural activities.

3 讨论

本研究主要分析黑土区小流域土壤重金属污染情况,在进行潜在生态危害评价时采取 2 种标准进

行评价,结果具有一定差别。在以农用地土壤污染风险筛选值为标准进行评价时,研究区土壤重金属都处于较为安全的状态,但在以黑龙江省背景值为标准进行评价时重金属 Hg 具有中等生态危害。这

是由于土壤背景值相对《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[14]更为严格。在判断是否发生土壤重金属污染时,应该选择何种标准进行潜在生态风险评价,当发生重金属累积即土壤重金属含量超过土壤背景值时,需要在多大程度上进行人为干预和治理,值得做进一步探讨。

通过主成分分析及 PMF 模型对研究区小流域土壤重金属污染源成分谱进行测算,两种方法测算结果类似,即研究区土壤重金属主要有 4 种来源。Ar 未超过土壤背景值且空间变异系数较低,主要来源于成土母质;Cr 有较小的空间变异系数,除了成土母质来源外,交通运输中汽车尾气^[17]及工业粉尘排放^[18]也会造成 Cr 随大气沉降而迁移至土壤环境中;Cu 和 Zn 则主要为农业生产过程化肥农药施用造成其在土壤中的积累^[19],除了农业源外,工业燃料燃烧^[20]及交通中汽车轮胎磨损^[21]均会造成 Zn 在土壤中的累积;工业废气的排放随大气沉降及地表径流会造成 Ni 在土壤中的累积^[22];Hg 具有单一载荷且以黑龙江省土壤背景值为标准时表现超标情况及生态风险均较其他重金属严峻,这与研究区寒冷漫长的冬季散户取暖燃烧大量煤炭有直接关系^[23]。

研究结果基本符合研究区工农业生产背景,但单一的污染源成分谱不具有空间可视性,也无法判断具体的污染源。可将源解析受体模型与地统计学进行结合分析,得出可视化源贡献空间分布图,能够做出更为精准的来源识别,为土壤污染治理提供行之有效的决策依据。

4 结 论

1)通过对研究区土壤重金属含量的统计分析和潜在生态危害系数的计算,研究区小流域土壤重金属存在超标现象,但其对于环境的潜在生态危害基本处于较低的风险程度,以黑龙江省土壤背景值为参评标准,元素 Hg 的单个潜在生态危害指数已经达到中等生态危害风险阈值,需要针对 Hg 元素能够造成的生态危害采取一定措施进行预防和治理。

2)在对重金属进行来源解析过程中采取的 PCA 和 PMF 模型 2 种解析方法,得出的分析结果基本吻合。PMF 模型的判定系数 $r^2 > 0.8$,模型实测值与预测值拟合度较好,所选因素能够充分解释原始数据中包含的信息,所得来源解析结果较为合理。

3)通过研究区土壤重金属的来源解析基本可以明确研究区土壤重金属主要污染源有 4 种,按其贡献率大小依次为自然源和大气沉降污染源 > 工业农业污染源 > 生活污染源 > 交通污染源,其中 Hg 的累积主要与燃煤活动有关;Cu、Zn 和 Ni 的累积主要由工农业活动引起;As 和 Cr 主要与成土母质等自然要素相关;交通的发展也对 Ni、Cr 与 Zn 的累积产生了影响,可以得出该地区土壤重金属的累积主要由重工业和农业的迅速发展以及冬季生活取暖需求引起。

参考文献 References

- [1] 国务院. 国务院关于印发“十三五”生态环境保护规划的通知[EB/OL]. (2019-09-24). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm
State Council. Circular of the State Council on printing and distributing the “Thirteenth Five-Year Plan” for ecological environmental protection [EB/OL]. (2019-09-24). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-12/05/content_5143290.htm (in Chinese)
- [2] 国务院. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知[EB/OL]. (2019-05-28). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm
State Council. Notice of the State Council on printing and distributing the action plan for the prevention and control of soil pollution[EB/OL]. (2019-05-28). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm (in Chinese)
- [3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2019-04-17). http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of the national survey of soil pollution [EB/OL]. (2019-04-17). http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm (in Chinese)
- [4] 农业部, 国家发展改革委, 财政部, 国土资源部, 环境保护部, 水利部. 关于印发《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》的通知[EB/OL]. (2019-06-15). http://journal.crnw.net/nybg/2017n/dqq/xygh/86820_20180131023745.html
Ministry of Agriculture, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, Ministry of Land and Resources, Ministry of Environmental Protection, Ministry of

- Water Resources. Notice on issuing the outline of northeast black land protection planning (2017—2030)[EB/OL]. (2019-06-15). http://journal.crnnews.net/nygbg/2017n/dqq/xygh/86820_20180131023745.html (in Chinese)
- [5] 陈晓杰, 何政伟, 薛东剑. 基于模糊综合评价的土壤环境质量研究:以九龙县里伍铜矿区为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 130-133
- Chen X J, He Z W, Xue D J. Study on soil environmental quality based on fuzzy comprehensive evaluation: A case study of Liwu copper area in Jiulong Country[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(1): 130-133 (in Chinese)
- [6] 杨军, 陈同斌, 雷梅, 刘洪禄, 吴文勇, 周军. 北京市再生水灌溉对土壤、农作物的重金属污染风险[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 209-217
- Yang J, Chen T B, Lei M, Liu H L, Wu W Y, Zhou J. Assessing the effect of irrigation with reclaimed water: The soil and crop pollution risk of heavy metals[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(2): 209-217 (in Chinese)
- [7] 崔勇, 柏连阳, 龙岳林, 杨凯钦. 长沙市近郊莲花镇土壤重金属生态风险评价[J]. 环境工程, 2020, 38(5): 202-209
- Cui Y, Bai L Y, Long Y L, Yang K Q. Ecological risk assessment of heavy metals in soils of Lianhua Town in the suburbs of Changsha[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(5): 202-209 (in Chinese)
- [8] 刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 安毅, 霍莉莉. 湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1523-1530
- Liu R X, Qiao D Y, Wang P, An Y, Huo L L. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in farmland soils located in Xiangtan County in Hunan Province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1523-1530 (in Chinese)
- [9] 杨磊, 熊黑刚. 新疆准东煤田土壤重金属来源分析及风险评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 273-281
- Yang L, Xiong H G. Soil heavy metal sources analysis and risk evaluation of Zhundong coal mine in Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 273-281 (in Chinese)
- [10] 王涛, 司万童, 欧阳琰, 李海东, 沈渭寿. 陕西某钼矿区土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(4): 440-446
- Wang T, Si W T, Ouyang Y, Li H D, Shen W S. Characteristic and evaluation of soil heavy metals pollution in the molybdenum mine area in Shaanxi [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(4): 440-446
- [11] GB 15618-1995, 国家土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 1995
- GB 15618-1995, Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Environment Press, 1995 (in Chinese)
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment ecological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(2): 975-1001
- [13] 周永超, 孙慧兰, 陈学刚, 周玲, 吴珊珊. 绿洲城市伊宁市表层土壤重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 127-133
- Zhou Y C, Sun H L, Chen X G, Zhou L, Wu S S. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface soil of Yining in Oasis City[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2): 127-133 (in Chinese)
- [14] GB 15618-2018, 国家土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018
- GB 15618-2018, Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Environment Press, 2018 (in Chinese)
- [15] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 张成江. 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(2): 112-115
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, Zhang C J. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008(2): 112-115 (in Chinese)
- [16] 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰. 基于PMF模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3789-3797
- Wang C L, Zhou X Q, Zhao Y F, Li B J. Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze River, China: Based on PMF[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10): 3789-3797 (in Chinese)
- [17] 任伟, 张思冲, 王春光, 张立会, 崔可瑜. 哈尔滨交通干道两侧土壤重金属潜在生态危害评价[J]. 北方园艺, 2012(6): 141-143
- Ren W, Zhang S C, Wang C G, Zhang L H, Cui K Y. Evaluation on the potential ecological hazards of heavy metals in soil on both sides of the main road in Harbin[J]. *Northern*

- Horticulture, 2012(6): 141-143
- [18] 高杨, 范必威. 大气降尘与土壤中重金属铬的形态分布规律[J]. 生态环境, 2008(4): 1438-1441
- Gao Y, Fan B W. The modality distribution of the chromium in the atmospheric dustfall and soil [J]. *Ecology and Environment*, 2008(4): 1438-1441 (in Chinese)
- [19] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 孙建兵. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(2): 223-227
- Chen L H, Ni W Z, Li X L, Sun J B. Investigation of heavy metal concentrations in commercial fertilizers commonly-used [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2009, 26(2): 223-227 (in Chinese)
- [20] Lee C S L, Li X D, Zhang G, Li J, Ding A J, Wang T. Heavy metals and Pb isotopic composition of aerosols in urban and suburban areas of Hong Kong and Guangzhou, South China-Evidence of the long-range transport of air contaminants[J]. *Atmospheric Environment*, 2007(41): 432-447
- [21] 龙红艳, 邓双, 黄妍, 都基峻, 张凡. 大气细颗粒物 PM_{2.5}的源解析技术[J]. 能源与环境, 2012(6): 46-49
- Long H Y, Deng S, Huang Y, Du J J, Zhang F. Source analysis of PM_{2.5} in the atmosphere [J]. *Energy and Environment*, 2012(6): 46-49 (in Chinese)
- [22] 孙超. 崇明岛农田土壤重金属的分布与累积特征[D]. 上海: 华东师范大学, 2010
- Sun C. Distribution and accumulation characteristics of heavy metals in farmland soil of Chongming Island [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010 (in Chinese)
- [23] 陈福莘. 汞的环境地球化学研究进展[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(7): 198
- Chen F S. Advances in environmental geochemistry of mercury [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2017, 43(7): 198 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅