

尹国庆, 江 宏, 王 强, 等. 安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 96–104.

YIN Guo-qing, JIANG Hong, WANG Qiang, et al. Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 96–104.

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

(安徽农业大学资源环境与信息技术研究所, 合肥 230036)

摘 要:为探讨安徽省南部山区农用地土壤重金属含量特征和污染成因,以安徽省南部某一典型区为研究区域,在农用地土壤上共布设 314 个点位,采集土壤样品并对其中 Cd、Hg、As、Pb 和 Cr 5 种重金属元素进行检测,运用多元统计分析、PMF(正定矩阵因子分解)模型、地统计分析等方法,对研究区农用地土壤重金属的含量水平、污染成因、空间特征进行系统分析。结果表明:研究区农用地土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr 的含量平均值分别为 0.32、0.1、14.38、49.44、87.42 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超标率分别为 26.93%、3.81%、23.47%、3.35%、2.23%;Cd、As 在洪积物和冲积物成土母质中含量较高,Hg、Cr 在洪积物成土母质中含量较高。研究表明,研究区农用地土壤重金属来源为:工矿污染源贡献率 39.6%,交通污染源和大气沉降综合污染源贡献率 42.3%,成土母质源贡献率 18.1%。

关键词:农用地;土壤;重金属;多元统计;地统计;PMF 模型

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)01-0096-09 doi:10.11654/jaes.2017-0911

Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province

YIN Guo-qing, JIANG Hong, WANG Qiang, NIE Jing-ru, MA You-hua*, HU Hong-xiang

(Institute of Resource Environment and Information Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To explore soil heavy metals concentrations and pollution sources in farmland from the southern mountain area in Anhui Province, 314 soil samples were collected from a typical area in Anhui Province to analyze Cd, Hg, As, Pb, and Cr in soils. The concentrations, sources, and spatial characteristics of soil heavy metals from the study area were analyzed with multivariate statistical analysis, positive matrix factorization (PMF) model, and geostatistical analysis. The results showed that the average concentrations of Cd, Hg, As, Pb, and Cr in farmland soils were 0.32, 0.1, 14.38, 49.44 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and 87.42 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, with 26.93%, 3.81%, 23.47%, 3.35%, and 2.23% over standard rates. The Cd and As concentrations were higher in diluvium and alluvium parent materials, while Hg and Cr concentrations were higher in diluvium parent material. According to the PMF model, the sources of heavy metals in farmland soil were industrial and mining activities (39.6%), traffic pollution and comprehensive atmospheric deposition pollution sources (42.3%), and parent material sources (18.1%).

Keywords: agricultural land; soil; heavy metals; multivariate statistical analysis; geostatistical; PMF model

近年来,随着城市化、工业化、农业集约化的飞速发展,越来越多含重金属的污染物通过各种途径进入农用地土壤中。与其他有机化合污染物不同,重金属在土壤中具有较强的富集性、持久性和不可逆性,因

此将在很长一段时间影响着农用地的正常生产与使用^[1-3],而且重金属还可能通过食物链转移到动物和人体内,严重危害动物、人体健康^[4]。因此,近些年农用地土壤重金属在污染评价、空间分布、特征分析、来源解

收稿日期:2017-06-27 录用日期:2017-09-27

作者简介:尹国庆(1993—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向为土地信息技术及管理。E-mail: 1243698400@qq.com

*通信作者:马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

基金项目:农业部农业生态环境保护重大专项(农科教发[2012]3号);国家重大研发计划项目(2016YFD0801100)

Project supported: Key-special Projects for Agricultural Ecological Environment Protection from the Ministry of Agriculture (Agriculture, Science and Education, [2012]No.3); The Project of Key National Research and Development (2016YFD0801100)

析等方面的研究受到了广泛关注^[5-13]。

研究区位于安徽省南部山区一个农用地土壤重金属污染典型区域,地势南高北低,南部高山峭拔,中北部多为丘陵,土地总面积为 1 180.6 km²,农用地面积为 864.13 km²,占总面积的 78.41%。研究区内水系发达,长 10 km 以上的河流有 16 条,矿产资源蕴藏丰富,已探明的共有 7 类 36 种。研究区内分布着 20 余家矿业企业,常年进行露天开采工作,除此之外还有 50 余家化工、制药等企业,产生大量废气、污水、固体废物等,且大多分布在河流旁,对周围河流造成了一定的污染,进而通过灌溉影响农用地土壤环境质量。

学者们对安徽省矿区土壤重金属污染情况已经做了相关的研究^[14-16],但对安徽省南部丘陵山地的农用地土壤重金属污染状况的研究还未见报道,且传统的污染成因分析方法(相关性分析、主成分分析等)不结合定量分析方法会存在一定的局限性^[17]。本研究以安徽省南部山区重金属污染典型区域为研究对象,通过研究农用地土壤重金属的污染成因及空间分布特征,旨在揭示研究区农用地土壤重金属污染现状,为农用地土壤重金属污染成因探究、治理和修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析方法

1.1.1 采样点布设与样品采集

首先确定三类疑似区域,即通过查阅资料、专家论证、实地考察的方法划定工矿企业周边、污水灌溉区、大中城市郊区这三类区域作为疑似污染区域,在此区域密集布点,每 0.1 km² 布一个点,另划定了无明显污染源的一般农区,每 1~10 km² 布一个点。研究区内农用地的成土母质包括坡积物、洪积物、冲积物和残积物,土类包括水稻土、黄棕壤、黄褐土和潮土等,主要农作物有水稻、蔬菜、油菜等,共布设 314 个点,要求覆盖所有成土母质类型、所有土壤类型和主要种植作物,采样点具体位置分布情况见图 1。采用梅花形采样法对土壤样品进行采集,采样深度为 0~20 cm,分样点为 5~10 个,四分法后剩余约 2 kg 封装带回。

1.1.2 分析测试方法

采集的土壤样品通过室内风干、研磨、过筛制成 50 g 样品,采用聚四氟乙烯坩埚全消解法进行前处理,且每批土壤样品消解至少含 1 个平行样、2 个平行空白样和 2 个平行质控样。Cd、Pb、Cr 采用电感耦

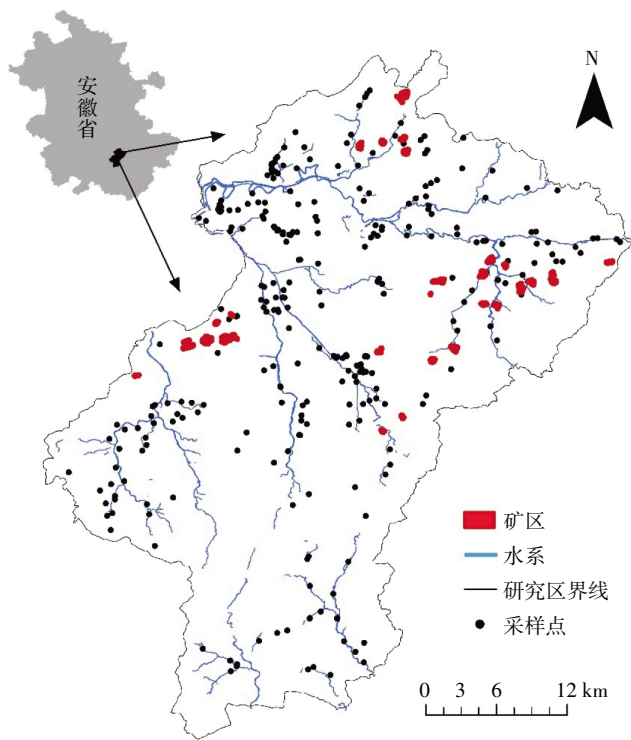


图 1 研究区采样点分布示意图

Figure 1 Distribution of sampling sites in the research area

合等离子质谱法,Hg、As 采用原子荧光光谱法,pH 采用电位法,CEC 采用乙酸铵提取法。

1.2 研究方法 with 评价标准

1.2.1 箱线图

箱线图即用一个简单的组合图形直观地表现出数据的形状,利用数据中的 5 个统计量:最小值、上四分位数、中位数、下四分位数与最大值来反映一组或多组连续型定量数据分布的中心位置和散布范围等信息^[18]。将采样点位按照不同成土母质进行分类,见表 1。

1.2.2 单因子污染指数法与内梅罗综合污染指数法

单因子污染指数法^[19-20]主要是运用单一因子对研究区域进行污染评价,如公式(1)所示。

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

式中: P_i 表示每个采样点 i 重金属元素的单污染指

表 1 研究区内不同成土母质的土壤样品数

Table 1 Soil samples of different soil parent materials in study area

成土母质	样品个数	比例/%
坡积物	74	23.57
洪积物	51	16.24
冲积物	172	54.78
残积物	17	5.41

数; C_i 为每个采样点*i*重金属元素的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为*i*重金属元素的评价标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,本研究采用的评价标准是 1995 年颁布的《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的土壤环境质量二级标准^[21]。

内梅罗综合污染指数法^[22-23]主要是从综合角度考虑研究区内土壤重金属的污染状况,并突出高含量污染元素对环境的影响。公式如下:

$$P_i = \sqrt{[(P_{\max})^2 + (P_{\text{ave}})^2] \times 0.5} \quad (2)$$

式中: P_i 为*i*采样点的综合污染指数; $P_{\max}$ 为*i*采样点中所有重金属元素单因子污染指数中的最大值; P_{ave} 为*i*采样点所有重金属元素单因子污染指数的平均值,上述计算过程中各参数均为无量纲。

1.2.3 正定矩阵因子分解模型

正定矩阵因子分解(PMF)模型是一种有效的因子分析类模型^[24]。其通过权重计算出污染物中各化学组分的误差,然后利用最小二乘法来确定出污染物的主要污染源及其贡献率。PMF 模型无需像化学质量平衡受体模型(CMB)那样输入详细的污染源成分谱^[25],它通过对大量受体数据进行分析,提取出一定量的因子,再通过分析各因子的化学组分,根据污染源的标识组分将模型提取出的因子识别为污染源类。

PMF 模型基本原理是将原始矩阵 $X(n \times m)$ 因子化^[26],分解为两个因子矩阵, $F(p \times m)$ 和 $G(n \times p)$, 以及一个残差矩阵 $E(n \times m)$, 如下式表示:

$$E_{nm} = X_{nm} - \sum_{j=1}^p G_{nj} F_{jm} \quad (3)$$

式中: X_{nm} 表示*n*个样品中的*m*个化学成分;*p*是解析出来的源的数目; G_{nj} 是源贡献矩阵; F_{jm} 是源成分谱矩阵。矩阵 G_{nj} 和 F_{jm} 中的元素都是正值,即都是非负限制的,上述计算过程中各参数均为无量纲。PMF 定义了一个目标函数 Q ,并使这个目标函数的值最小:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (E_{ij} / \sigma_{ij})^2 \quad (4)$$

PMF 模型的诊断指标 Q 值是 PMF 模型的诊断

指标之一,即模型结果必须满足模型计算的 Q 值接近理论 Q 值^[27]。

式中: E_{ij} 表示第*j*个样品中第*i*个化学成分的残差, σ_{ij} 是第*j*个样品中第*i*个化学成分的不确定度,上述计算过程中各参数均为无量纲。不确定度计算方法如下:

当浓度值小于或等于相应的 MDL(浓度检测限)时:

$$U = 5/6 \times \text{MDL} \quad (5)$$

当浓度值大于相应的 MDL 时:

$$U = \sqrt{(s \times c)^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (6)$$

式中: U 为不确定度, s 为误差百分数; c 为指标浓度值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;MDL 为浓度检测限, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 数据处理

污染程度评价采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法;5 种重金属含量数据统计分析、相关性分析、主成分分析由 SPSS 20.0 完成;PMF 模型由美国 EPA 的 PMF 5.0 完成;点位布设、空间特征分析、采样点分布图、含量图由 ArcGIS 10.2 完成;箱线图由 Origin 8.0 完成;数据记录由 Excel 2013 完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属元素含量总体分布特征

研究区土壤中 5 种重金属含量描述性统计结果见表 2。研究区内农用地土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr 含量的平均值分别为 0.32、0.1、14.38、49.44、87.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;pH 范围在 4.6~8.7 之间,平均值为 5.88,呈弱酸性;变异系数是标准差与平均值之比,反映组间数据的波动情况,研究区 5 种重金属的变异系数由大到小为 Pb(1.58)>Hg(1.23)>Cd(0.81)=As(0.81)>Cr(0.42)。

通过单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对研究区内土壤重金属污染状况进行等级划分与评价,结果见表 3。研究区内农用地土壤 Cd、Hg、As、Pb、Cr 点位总污染率分别为 26.93%、3.81%、23.47%、

表 2 研究区域农用地土壤重金属含量统计分析

Table 2 Statistical analysis of heavy metals in agricultural land in study area

元素	平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	方差/ $\text{mg}^2\cdot\text{kg}^{-2}$	变异系数	中位数/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	众数/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	偏度	峰度	概率分布	全距/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	极小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	极大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Cd	0.32	0.26	0.07	0.81	0.24	0.17	2.57	7.32	偏态分布	1.49	0.05	1.53
Hg	0.1	0.12	0.01	1.23	0.06	0.04	6.53	57.86	偏态分布	1.23	0.02	1.25
As	14.38	11.69	136.68	0.81	9.69	10.6	1.63	3.72	偏态分布	75.19	2.11	77.3
Pb	49.44	78.14	6 105.68	1.58	34.2	29.9	8.6	91.78	偏态分布	1 019.3	21.7	1041
Cr	87.42	36.96	1 366.4	0.42	79	147	1.25	2.07	正态分布	201.3	32.7	234

表 3 研究区各重金属不同等级污染点位占比

Table 3 The proportion of different levels of heavy metals in the study area

元素	点位总污染率/%	不同等级污染点位比例/%				
		清洁($P \leq 0.7$)	警戒限($0.7 < P \leq 1$)	轻度污染($1 < P \leq 2$)	中度污染($2 < P \leq 3$)	重度污染($P > 3$)
Cd	26.93	47.35	25.72	17.25	6.12	3.56
Hg	3.81	92.26	3.93	3.24	0	0.57
As	23.47	70.62	5.91	22.25	0.87	0.35
Pb	3.35	94.81	1.84	1.42	1.52	0.41
Cr	2.23	92.36	5.41	2.23	0	0
内梅罗综合	38.46	36.73	24.81	30.36	4.23	3.87

注: P 为污染指数。

3.35%、2.23%, 污染程度依次为 $\text{Cd} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cr}$ 。从内梅罗综合污染指数来看, 所有点位中清洁的占 36.73%, 处于警戒限的占 24.81%, 受污染的占 38.46%, 其中轻度污染的占 30.36%, 中度污染的占 4.23%, 重

度污染的占 3.87%。

2.2 不同成土母质下土壤重金属含量差异性分析

通过箱线图分析方法对研究区 5 种重金属在不同成土母质下的差异性进行分析, 结果见图 2。从图 2

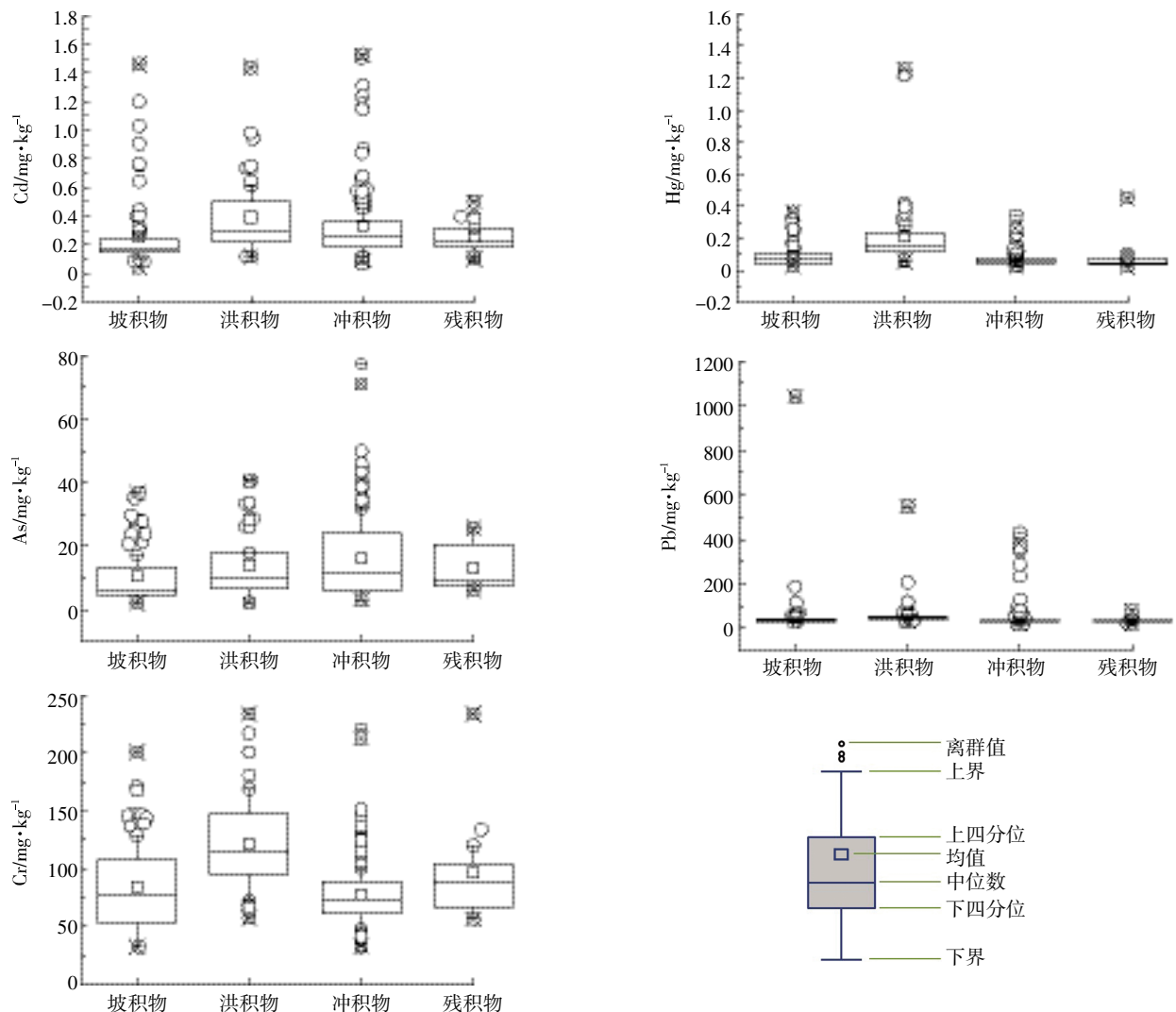


图 2 研究区不同成土母质土壤重金属含量箱线图

Figure 2 The boxplot of heavy metal concentrations from different soil parent materials in study area

中可以看出,Cd、As 在洪积物和冲积物的中位数和平均值均高于其他成土母质,其余类型差别不大,说明 Cd、As 在洪积物和冲积物这两种成土母质下含量较高;Hg、Cr 在洪积物的中位数、平均值和上四分位数均高于其他成土母质,其余类型差别不大,说明 Hg、Cr 在洪积物这种成土母质下含量较高;Pb 在几种成土母质下无明显含量差别。每种成土母质下的样品重金属含量均存在不等量的异常值,说明不同成土母质区域内重金属污染均受到了人为因素的影响。

2.3 土壤重金属污染成因分析

2.3.1 相关性分析和主成分分析

对研究区内农用地土壤 5 种重金属进行相关性分析,从表 4 各元素间的 Pearson 相关系数可知,Cd、As 和 Pb 3 个元素之间相关系数较大,呈显著正相关,说明这 3 个元素在污染源上可能存在一致性;部分元素之间存在一定的弱相关性,如 Cd 和 Hg、Cd 和 Cr、Hg 和 Cr,这几组元素在污染源上可能有一定的相似性。

为进一步探究研究区土壤重金属的污染成因,对 5 种元素进行主成分分析,结果见表 5。根据表 5 中的特征值看出,可以提取 2 个主成分,相应的特征值分别为 2.018 和 1.343,均大于 1,累积方差贡献率为 67.214%,能较好地解释数据信息。表 6 是通过旋转

后得到的因子载荷矩阵,可以明显看出:Cd、As、Pb 在 PC1 中有较高载荷,为第一主成分;Hg 和 Cr 在 PC2 中有较高载荷,为第二主成分。土壤重金属来源分为人为因素和自然因素两种^[28],因此认为 PC1 和 PC2 两个成分指的是人为因素污染源和自然因素污染源两大类。

2.3.2 PMF 受体模型的源解析结果分析

在使用 PMF 软件时,为了使模型计算的 Q 值接近理论 Q 值,需进行多次运行调试,最终实测值与预测值之间的拟合相关性结果如表 7 所示,其中 Cr 的拟合系数达到了 0.9 以上,其他元素的拟合系数也都在 0.7 以上,说明解析值准确,PMF 模型总体拟合效果好,所选因子能够准确解释原始数据信息。

本研究中 PMF 模型选取的因子数量为 3,源成分谱及源贡献率结果见表 8。Cd 在因子 1 中有较高的浓度值,贡献率达到了 78.6%。研究区分布大量化工企业,排放大量废水、废气、废渣,马涛等^[29]研究发

表 4 研究区农用地土壤重金属元素间 Pearson 相关系数
Table 4 Pearson's correlation coefficient of heavy metal concentrations in soil of the study area

元素	Cd	Hg	As	Pb	Cr
Cd	1				
Hg	0.253**	1			
As	0.594**	0.120*	1		
Pb	0.581**	0.176**	0.379**	1	
Cr	0.263**	0.302**	0.133**	0.194**	1

注:**表示在 0.01 水平(单侧)上显著相关;*表示在 0.05 水平(单侧)上显著相关。

表 5 研究区农用地土壤重金属元素含量主成分分析
Table 5 Principal component analysis of soil heavy metal concentrations in study area

成分	解释的总方差								
	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	贡献率/%	累积/%	合计	贡献率/%	累积/%	合计	贡献率/%	累积/%
1	2.272	45.443	45.443	2.272	45.443	45.443	2.018	40.354	40.354
2	1.089	21.771	67.214	1.089	21.771	67.214	1.343	26.86	67.214
3	0.698	13.955	81.169						
4	0.615	12.304	93.474						
5	0.326	6.526	100						

表 6 旋转成分矩阵 Table 6 Rotational component matrix		
元素	成分	
	PC1	PC2
Cd	0.861	0.228
Hg	0.096	0.803
As	0.818	-0.007
Pb	0.763	0.156
Cr	0.126	0.788

表 7 元素测定值与 PMF 模型预测值之间的关系 Table 7 Relationship of the measured concentrations and the predicted concentrations by PMF model					
元素	Cd	Hg	As	Pb	Cr
拟合系数 R^2	0.876	0.713	0.886	0.775	0.946
误差/%	2.65	5.364	7.896	12.365	1.233

现农用地中 Cd 主要来自于工业三废,韩仲宇等^[30]在研究陕西关中地区农田土壤重金属污染特征时发现,关中地区 Cd 污染较为突出,主要受到周边冶炼厂的污染。因此,因子 1 可解释为工矿污染源。

表 8 PMF 模型解析出的各源成分谱及其贡献率

Table 8 Source contribution for different elements by PMF model

元素	源成分谱/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			源贡献率/%		
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 1	因子 2	因子 3
Cd	0.25	0.04	0.03	78.6	12.1	9.3
Hg	0.003	0.008	0.09	2.6	8.3	89.1
As	3.39	9.33	1.65	23.6	64.9	11.5
Pb	13.99	31.34	4.11	28.3	63.4	8.3
Cr	11.81	9.72	65.92	13.5	11.1	75.4

As 和 Pb 在因子 2 中有较高的浓度值,贡献率分别达到了 64.9%和 63.4%,这与前文中相关性分析和主成分分析结果一致。研究区北部分布着大量燃煤、有色金属、非金属等矿区,且西北部有一个大型垃圾焚烧厂,常年采矿冶金、垃圾焚烧等活动排放的大量废气、烟尘随着大气沉降到土壤中^[31]。Nicholson 等^[32]认为大气沉降是导致土壤中重金属累积的重要原因,众所周知,含铅汽油的燃烧以及汽车尾气的排放明显增加了空气中 Pb 浓度^[33],秦先燕等^[34]在对环巢湖典型农区土壤重金属来源进行解析时,认为该区域 As 主要来自于大气沉降,有国外研究表明,比利时每 0.01 km^2 土壤中,每年就有约 250 g Pb 和 15 g As 来源于大气^[35]。因此,因子 2 可解释为交通污染源和大气沉降综合污染源。

Hg 和 Cr 在因子 3 中有较高的浓度值,贡献率分别达到了 89.1%和 75.4%,这与前文中相关性分析和主成分分析结果一致。由前文分析可知研究区内 Hg、Cr 含量平均值较低为 0.1 、 $87.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均与当地土壤背景值相近,且在洪积物这种成土母质下含量较为突出。有研究指出 Cr 由岩石风化进入成土母质中^[36],董騄睿等^[37]用 PMF 模型分析得出南京城郊农田中 Hg 主要来自于成土母质源,因此因子 3 可解释为成土母质源。

综上所述,研究区农用地土壤重金属累积主要受工矿污染源、交通污染源和大气沉降综合污染源以及成土母质源的综合影响。由 PMF 软件计算可得出,工矿污染源贡献率为 39.6%,交通污染源和大气沉降综合污染源贡献率为 42.3%,成土母质源贡献率为 18.1%。可以看出,研究区重金属污染主要受人为因

素的影响。

2.4 土壤重金属含量的空间分布特征

运用 ArcGIS 中地统计学模块的克里格插值法对研究区内农用地土壤各重金属元素含量进行插值,并制作出含量空间分布图。从图 3 中可以看出,研究区内 Cd、Hg、As、Pb、Cr 含量空间分布无明显递增递减趋势,均存在明显的高值区。其中 Cd 和 As 的含量在研究区北部普遍偏高,究其原因,研究区北部分布众多工业园区和矿区,导致“三废”的长期大量排放,且研究区地势南高北低、水系发达,大气沉降和污水灌溉情况较为严重。Pb 作为汽车尾气污染源的最主要元素,在研究区内交通较为发达的城区出现了相对高值区。Hg 含量在研究区内普遍较低,只有在研究区西北部有一个较小范围的高值区,该区域分布着一个轻纺工业园,可能是导致高值的原因。Cr 含量在研究区内普遍不高,可能受中西部矿区的影响,出现了相对高值区域。从含量的空间特征分析结果来看,与 PMF 模型解析结果相符。

3 结论

(1)研究区农用地土壤重金属元素有不同程度的富集,Cd、Hg、As、Pb、Cr 含量平均值分别为 0.32、0.1、14.38、49.44、87.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根据单因子污染指数结果得出污染程度为 $\text{Cd}>\text{As}>\text{Hg}>\text{Pb}>\text{Cr}$,研究区内 38.46%点位的内梅罗综合污染指数超过了 1。

(2)不同成土母质的土壤重金属含量有所不同,Cd、As 在洪积物和冲积物成土母质下的含量较高,Hg、Cr 在洪积物成土母质下的含量较高,Pb 在几种成土母质下无明显含量差别。

(3)Cd 含量主要来自于工矿污染源;Pb、As 含量主要来自于交通污染源和大气沉降综合污染源;Hg、Cr 含量主要来自于成土母质源,但在个别小范围区域已受到外源污染物的影响。

参考文献:

- [1] 王振中,张友梅,邓继福,等. 重金属在土壤生态系统中的富集及毒性效应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1948-1952.
WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei, DENG Ji-fu, et al. Enrichment and toxicity effect of heavy metals in soil ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1948-1952.
- [2] Bushoven J T, Jiang Z C, Ford H J, et al. Stabilization of soil nitrate by reseeding with perennial ryegrass following sudden turf death[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(5): 1657-1661.
- [3] Vulkan R, Mingel G U, Ben A J, et al. Copper and zinc speciation in the

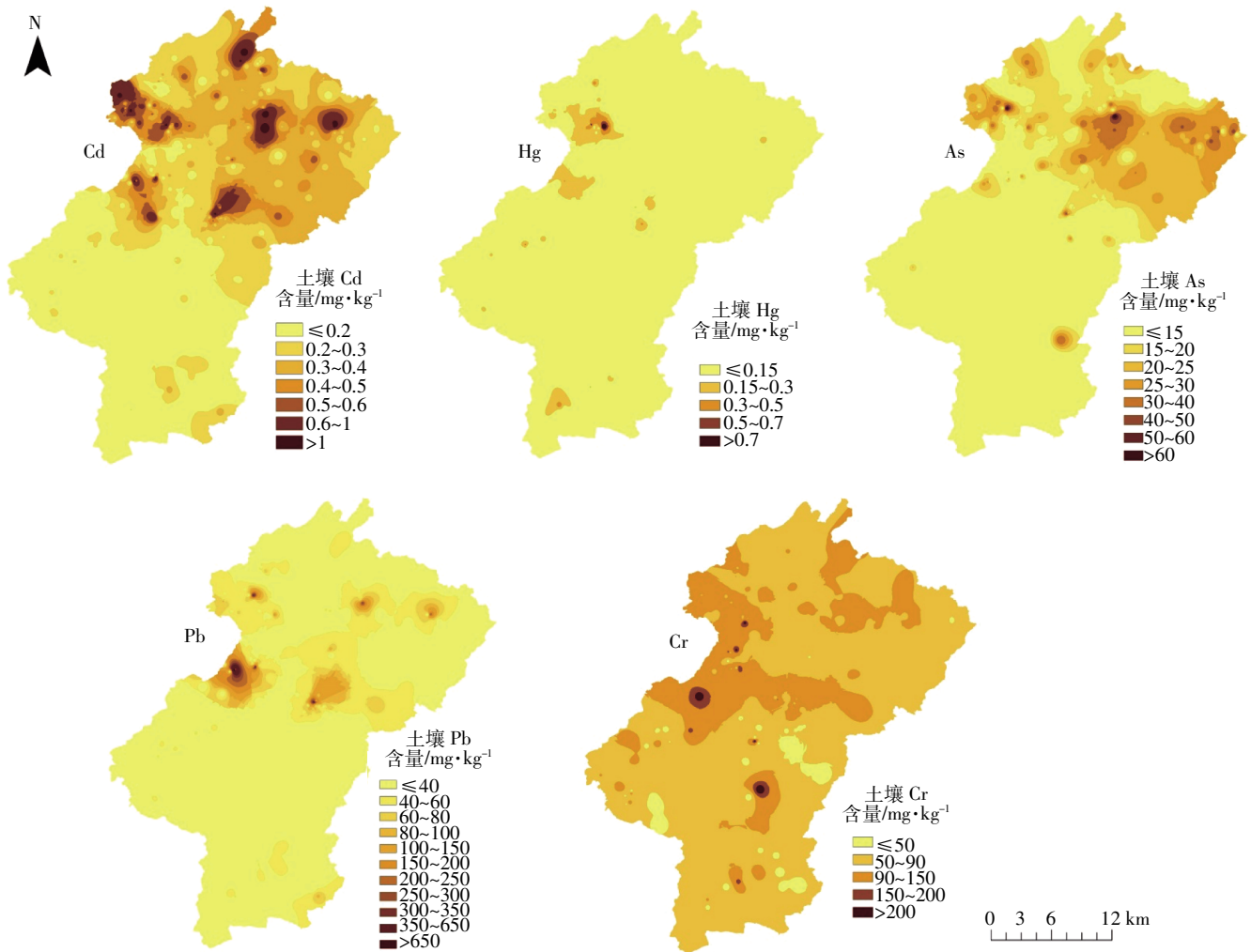


图3 研究区农用地土壤重金属含量空间分布

Figure 3 The spatial concentrations distribution of farmland soil heavy metal in the study area

- solution of a soil-sludge mixture[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(1):193-203.
- [4] 宋 伟, 陈百明, 刘 琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2):293-298.
SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2):293-298.
- [5] Meng F, Ding N, Sun Y J. Assessment of heavy metal pollution in Chinese suburban farmland[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2014, 23(6):2351-2358.
- [6] Wang Y Q, Bai Y R, Wang J Y. Distribution of soil heavy metal and pollution evaluation on the different sampling scales in farmland on Yellow River irrigation area of Ningxia: A case study in Xingqing County of Yinchuan City[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7):2714-2720.
- [7] Yang J, Liu H R, Yu X D, et al. Entropy-Cloud model of heavy metals pollution assessment in farmland soils of mining areas[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(3):1315-1322.
- [8] 宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 等. 细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):487-495.
- NING Cui-ping, LI Guo-chen, WANG Yan-hong, et al. Evaluation and source apportionment of heavy metal pollution in Xihe watershed farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):487-495.
- [9] 左 锐, 汪立娜, 曹 阳, 等. 基于正定矩阵分解的傍河水源土地土壤重金属污染源分析[J]. 地球与环境, 2017, 45(4):464-471.
- ZUO Rui, WANG Li-na, CAO Yang, et al. Sources apportionment of soil pollution of heavy metals in riverside water source field based on positive matrix factorization method[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(4):464-471.
- [10] 熊秋林, 赵佳茵, 赵文吉, 等. 北京市地表土重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6):2211-2221.
- XIONG Qiu-lin, ZHAO Jia-yin, ZHAO Wen-ji, et al. Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in topsoil of Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(6):2211-2221.
- [11] 李 娇, 陈海洋, 腾彦国, 等. 拉林河流域土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19):226-233.

- LI Jiao, CHEN Hai-yang, TENG Yan-guo, et al. Contamination characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Lalin River basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(19):226-233.
- [12] 李三中, 徐华勤, 陈建安, 等. 某矿区砷碱渣堆场周边土壤重金属污染评价及潜在生态风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6):1141-1148.
- LI San-zhong, XU Hua-qin, CHEN Jian-an, et al. Pollutions and potential ecological risk of heavy metals in soils around waste arsenic-containing alkaline sites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1141-1148.
- [13] 李玉梅, 李海鹏, 张连科, 等. 包头某铜厂周边土壤重金属分布特征及来源分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7):1321-1328.
- LI Yu-mei, LI Hai-peng, ZHANG Lian-ke, et al. Distribution characteristics and source analysis of heavy metals in soil around a copper plant in Baotou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7):1321-1328.
- [14] 李江遐, 张军, 黄伏森, 等. 铜矿区土壤重金属污染与耐性植物累积特征[J]. *土壤通报*, 2016, 47(3):719-724.
- LI Jiang-xia, ZHANG Jun, HUANG Fu-sen, et al. Heavy metal contamination of soil and its accumulation in tolerant plants in copper mine Tongling area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(3):719-724.
- [15] 张雪晴, 张琴, 程园园, 等. 铜矿重金属污染对土壤微生物群落多样性和酶活力的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(3):517-522.
- ZHANG Xue-qing, ZHANG Qin, CHENG Yuan-yuan, et al. The impact of heavy metal contamination on soil microbial diversity and enzyme activities in a copper mine[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(3):517-522.
- [16] 豆长明, 徐德聪, 周晓铁, 等. 铜陵矿区周边土壤-蔬菜系统中重金属的转移特征[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5):920-927.
- DOU Chang-ming, XU De-cong, ZHOU Xiao-tie, et al. Transfer of heavy metals in soil and vegetable systems nearby Tongling mining area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):920-927.
- [17] 林燕萍, 赵阳, 胡恭任, 等. 多元统计在土壤重金属污染源解析中的应用[J]. *地球与环境*, 2011, 39(4):536-542.
- LIN Yan-ping, ZHAO Yang, HU Gong-ren, et al. The application of multivariate statistical analysis in the pollution source recognition and analysis of heavy metals in soils[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(4):536-542.
- [18] 朱红霞, 赵淑莉, 阚海东. 2013年我国典型城市大气污染物浓度分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(6):227-233.
- ZHU Hong-xia, ZHAO Shu-li, KAN Hai-dong. Distribution characteristics of main atmospheric pollutants concentration in Chinese typical cities in 2013[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(6):227-233.
- [19] 李方舟, 章臻, 张昭天, 等. 厦门岛内不同功能区土壤与灰尘重金属污染的特征及评估[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(2):719-724.
- LI Fang-zhou, ZHANG Zhen, ZHANG Zhao-tian, et al. Analysis and evaluation of the soil and dust contamination by heavy metals in different functional zones on Xiamen[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(2):719-724.
- [20] 潘佳颖, 王建宇, 王超, 等. 贺兰山东麓葡萄主产区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(6):173-178.
- PAN Jia-ying, WANG Jian-yu, WANG Chao, et al. Distribution characteristics and pollution assessment for the main grape base soil heavy metals at the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(6):173-178.
- [21] 中华人民共和国环境保护部. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2006.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S]. Beijing:China Environmental Science Press, 2006.
- [22] 王瑜堂, 张军, 岳波, 等. 村镇生活垃圾重金属含量及其土地利用中的环境风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(8):1634-1639.
- WANG Yu-tang, ZHANG Jun, YUE Bo, et al. Heavy metal content of the rural solid waste and its land utilization environmental risk analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8):1634-1639.
- [23] 喻子恒, 黄国培, 张华, 等. 贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(8):2296-2301.
- YU Zi-heng, HUANG Guo-pei, ZHANG Hua, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in paddy soil in Danzhai Au-Hg mining area, Guizhou, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8):2296-2301.
- [24] 孙海峰, 张勇, 解静芳. 正定矩阵因子分解模型在环境中多环芳烃源解析方面的应用[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(4):25-33.
- SUN Hai-feng, ZHANG Yong, XIE Jing-fang. Applications of positive matrix factorization (PMF) for source apportionment of PAHs in the environment[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(4):25-33.
- [25] 宋娜, 徐虹, 毕晓辉, 等. 海口市PM_{2.5}和PM₁₀来源解析[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(10):1501-1509.
- SONG Na, XU Hong, BI Xiao-hui, et al. Source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ in Haikou[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(10):1501-1509.
- [26] 史国良. 大气颗粒物来源解析复合受体模型的研究和应用[D]. 天津:南开大学, 2010.
- SHI Guo-liang. The study and application of the combined receptor models for ambient particulate matter source apportionment[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [27] Callen M S, Cruz M T, Lopez J M, et al. Comparison of receptor models for source apportionment of the PM₁₀ in Zaragoza (Spain)[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(8):1120-1129.
- [28] 毛应明. 徐州市典型污染源周边土壤重金属污染特征及磁学响应研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2015.
- MAO Ying-ming. Experimental research on pollution characters and magnetic response to soil heavy metals in vicinities of typical pollution sources in Xuzhou, China[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology, 2015.
- [29] 马涛, 焉莉, 李彦姣, 等. 农田土壤中镉来源与治理方法[J]. *吉林农业*, 2012(4):87-88.

- MA Tao, YAN Li, LI Yan-jiao, et al. Methods of cadmium source and management in farmland soil[J]. *Agriculture of Jilin*, 2012(4):87-88.
- [30] 韩仲宇, 唐希望, 同延安. 陕西关中地区5个小冶炼厂周边农田土壤重金属污染特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(6):115-122.
- HAN Zhong-yu, TANG Xi-wang, TONG Yan-an. Characteristics of soil heavy metal pollution in farmlands near five small smelters in Guanzhong area, Shaanxi[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2017, 45(6):115-122.
- [31] 于瑞莲, 胡恭任, 袁 星, 等. 大气降尘中重金属污染源解析研究进展[J]. 地球与环境, 2009, 37(1):73-79.
- YU Rui-lian, HU Gong-ren, YUAN Xing, et al. Development in research on pollution source of heavy metals from atmospheric dust - recognition and analysis[J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(1):73-79.
- [32] Nicholson F A, Smith S R, Alloway B J, et al. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales[J]. *Sci Total Environ*, 2003, 311:205-219.
- [33] Viard B, Pihan F, Promeyrat S, et al. Integrated assessment of heavy metal(Pb, Zn, Cd) highway pollution; Bioaccumulation in soil, *Graminaceae* and land snails[J]. *Chemosphere*, 2004, 55(10):1349-1359.
- [34] 秦先燕, 李运怀, 孙 跃, 等. 环巢湖典型农业区土壤重金属来源解析[J]. 地球与环境, 2017, 45(4):455-463.
- QIN Xian-yan, LI Yun-huai, SUN Yue, et al. Source apportionment of soil heavy metals in typically agricultural region around Chaohu Lake, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(4):455-463.
- [35] 黄春雷, 宋金秋, 潘卫丰. 浙东沿海某地区大气干湿沉降对土壤重金属元素含量的影响[J]. 地质通报, 2011(9):1434-1441.
- HUANG Chun-lei, SONG Jin-qiu, PAN Wei-feng. Impact of dry and wet atmospheric deposition on content of heavy metals in soils along coastal areas of eastern Zhejiang Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011(9):1434-1441.
- [36] 邓红艳, 陈刚才. 铬污染土壤的微生物修复技术研究进展[J]. 地球与环境, 2012, 40(3):466-472.
- DENG Hong-yan, CHEN Gang-cai. Research progress on microbiological repair of chromium contaminated soil[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(3):466-472.
- [37] 董騷睿, 胡文友, 黄 标, 等. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田土壤重金属源解析[J]. 中国环境科学, 2015, 35(7):2103-2111.
- DONG Lu-rui, HU Wen-you, HUANG Biao, et al. Source appointment of heavy metals in suburban farmland soils based on positive matrix factorization[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(7):2103-2111.