

宋 佳,徐长春,罗映雪,等. 准东煤区土壤重金属环境风险及空间分布特征[J]. 江苏农业科学,2019,47(24):241-247.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.24.056

# 准东煤区土壤重金属环境风险及空间分布特征

宋 佳,徐长春,罗映雪,杨媛媛

(新疆大学资源与环境科学学院,新疆乌鲁木齐 830046)

**摘要:**以准东煤矿区为研究靶区,利用单因子污染指数法、地累积指数法和环境风险指数法对准东煤区 2014 年和 2017 年土壤重金属砷(As)、汞(Hg)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)元素含量进行分析。研究结果表明,(1)2017 年土壤重金属中 Zn 和 Hg 元素含量比 2014 年减少,其中 Hg 元素 CV(变异系数)是 184%,属于高等变异。2017 年 6 种元素的 CV 比 2014 年有所下降。(2)通过 SOM(自组织特征映射神经网络)分析可知,As 和 Cu 的来源具有一定的关系,Pb 和 Zn 的来源差异性不大,而其他重金属元素之间相似度较低。(3)通过污染分析可知,2017 年土壤 Hg 和 As 元素比 2014 年含量增加且出现污染状况。由地累积指数可知,2014 年土壤中 As 元素出现污染状况,污染程度达中度水平。2017 年土壤重金属 As、Pb、Cr、Zn 和 Cu 均出现污染状况,其中 As 与 Pb 污染水平达重度水平。(4)从环境风险测度可得,2014 年与 2017 年样品中无风险比例分别为 61.2% 和 66.98%,低风险比例分别为 10.34% 和 11.0%,中等风险比例分别为 24.56% 和 16.74%,高风险比例分别为 0.86% 和 1.91%,极高风险比例分别为 3.01% 和 3.34%。2014—2017 年无风险频率有所增加,但不明显,中等环境风险频率有所下降,其余环境风险频率变化不大。从空间分布可以看出,Zn 和 Cu 空间分布趋势基本一致,Hg 重金属的重污染区主要位于研究区东部,As 元素含量的最高值分布在五彩湾煤区偏南部和五彩湾工业带北部。研究结果为准东地区生态环境预警提供了科学依据。

**关键词:**准东煤区;重金属污染;环境风险测度;空间分布特征

**中图分类号:**S151.9<sup>+</sup>3;X825

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2019)24-0241-07

土壤是人类赖以活动生存的环境因素之一,能直接或间接改变人类的生活质量及生活方式<sup>[1]</sup>。土壤中的重金属绝大部分来源于人类活动,如土壤侵蚀、交通运输、农药的使用、工业“三废”、矿山开采及大气颗粒物的沉降等一系列活动<sup>[2]</sup>。重金属是具有毒素的元素类型之一,在土壤环境中能长时间保留在土壤中,很难被降解<sup>[3-4]</sup>,积累在土壤中的重金属,经过雨水的冲刷进而进入水体,从而严重危害动物、人体健康<sup>[5]</sup>。因此,近几年土壤重金属在污染评价、空间分布、特征分析、来源解析等方面的研究受到了广泛关注<sup>[6-9]</sup>。

新疆准东煤矿是新疆的重要资源之一,自煤矿开采以来,生态环境受到了极大的胁迫,直接影响到该地区的生态经济环境。由于常年进行采矿活动,煤炭中的重金属污染物以不同的途径进入土壤,大气环境污染严重,植被退化,从而增加了土壤重金属环境风险的概率。因此准东煤田土壤重金属环境风险及生态修复迫在眉睫。

国内众多学者已对新疆准东煤区的土壤重金属来源及污染状况进行了研究,其中刘巍等对准东煤田露天煤区土壤重金属采用主成分分析法和内梅罗指数法、地累积指数法( $I_{geo}$ )等方法,进行了污染现状评价与来源分析,并分析了准东煤区周边土壤重金属与降尘重金属的关系及污染风险<sup>[10-11]</sup>。前人主要对当地的重金属污染状况和来源进行解

析,对土壤生态环境问题进行评价,但对该地区的环境风险评价研究较少,因此笔者拟用单因子、地累积和环境风险指数法对新疆准东煤区重金属进行研究,为新疆准东煤区的生态治理提供合理的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆准噶尔盆地东部,海拔 300~600 m,主要位于阜康地区,地处古尔班通谷沙漠北部。由于研究区常年进行煤炭开采活动,生态环境极为脆弱且植被覆盖度较少。研究区属大陆性温带沙漠气候,蒸降比大。矿区内植被类型少,覆盖度较低。植被生长矮小,大多为干旱性植被。常年风沙较大,土壤盐渍化较为严重。

### 1.2 土壤样品采集及处理

2014 年 7 月和 2017 年 6 月对准东煤矿进行总体调查,准东煤区布设了 27 个采样点,采集土壤样点时,用手持式 GPS(全球定位系统)仪器对采样点进行定位,采样点分布情况见图 1。每个采样点取表层 0~10 cm 的土壤,采样点主要布置在煤田开采区周边、工厂附近农田、工业区周边,以及生活区和办公区周围等。对野外采集回的土壤样品进行自然风干、去除杂物、过筛。进而使用日立 Z-2000 型原子吸收分光光度计对 Hg、As 2 种元素进行检测,使用火焰原子吸收机测量 Zn、Cu、Cr、Pb 元素含量。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 单因子污染分析法** 单因子污染分析法是单个重金属元素层面的评价重金属污染程度的方法。计算公式如下<sup>[12]</sup>:

收稿日期:2018-09-06

基金项目:国家自然科学基金(编号:41561023)。

作者简介:宋 佳(1993—),女,新疆哈密人,硕士研究生,主要从事干旱区自然环境研究。E-mail:sj412726@163.com。

通信作者:徐长春,博士,副教授,主要从事干旱区气候、环境与气候变化研究。E-mail:xcc0110@163.com。

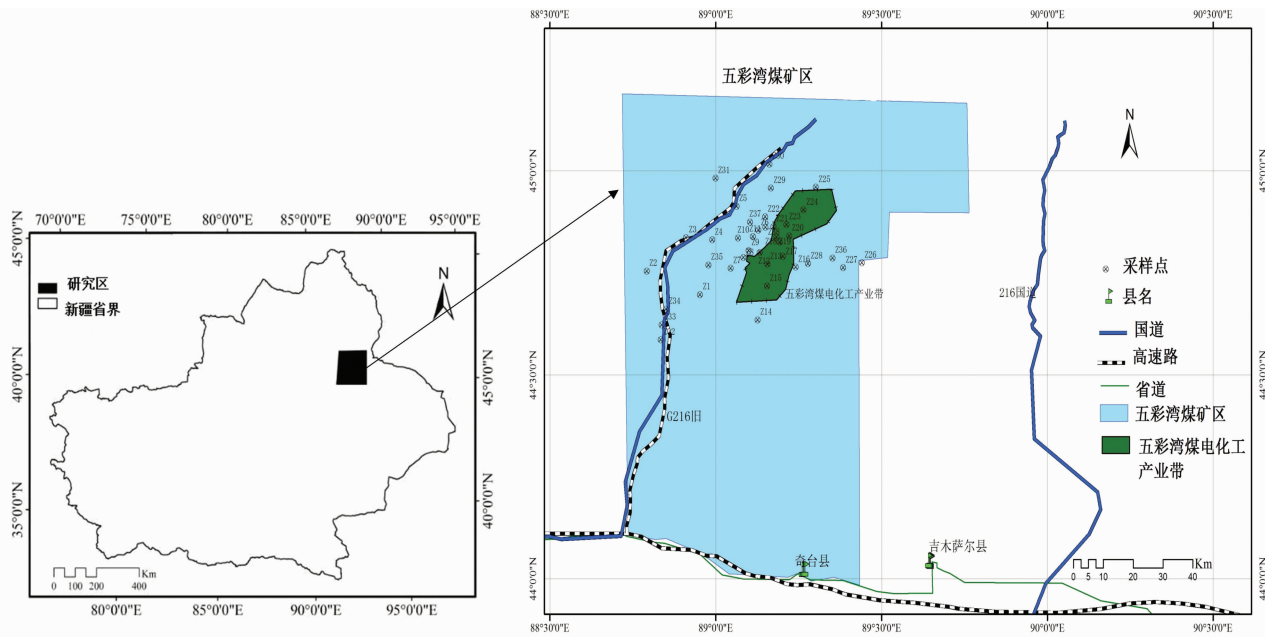


图1 研究区示意及采样点分布

$$CF = \frac{C_i}{S_1} \tag{1}$$

式中:CF 为单因子污染指数;C<sub>i</sub> 为污染物实测值,g/kg;S<sub>1</sub> 为新疆土壤重金属背景值,g/kg,本研究采用 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》指标。

1.3.2 地累积指数 地累积指数法是德国学者 Muller 提出的<sup>[13]</sup>,用于综合分析土壤重金属污染状况。此法广泛应用在土壤重金属评价领域,公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (KB_n)] \tag{2}$$

式中:C<sub>n</sub> 是元素 n 在重金属中的含量;B<sub>n</sub> 代表该元素的地球化学背景值<sup>[10]</sup>;K 为考虑不同地区岩石差异造成的背景系数变动(一般取 1.5)。地累积评价指标见表 1。

表 1 地累积评价指标<sup>[14]</sup>

地累积指数 I <sub>geo</sub>	分级	污染程度
<0	1	清洁状态
0~1	2	轻度污染
>1~2	3	偏中度污染
>2~3	4	中度污染
>3~4	5	偏重度污染
>4~5	6	重度污染
>5	7	严重污染

1.3.3 环境风险表征方法 环境风险采用 Rapant 等提出的环境风险指数(index of environmental risk,简称 IER)进行表征<sup>[15]</sup>。计算公式为:

$$I_{ER_i} = (C_{A_i} / C_{R_i}) - 1;$$
$$I_{ER} = \sum_{i=1}^n I_{ER_i} \circ$$

式中:I<sub>ER<sub>i</sub></sub>代表第 i 个类型重金属超过临界限度的环境风险指数;C<sub>A<sub>i</sub></sub>代表第 i 个类型重金属的含量(g/kg);C<sub>R<sub>i</sub></sub>代表第 i 个类型重金属的限量临界值(g/kg);I<sub>ER</sub>代表样品的环境风险指数。需要说明的是,如果 C<sub>A<sub>i</sub></sub> < C<sub>R<sub>i</sub></sub>,则定义 I<sub>ER<sub>i</sub></sub> 为 0。

根据 Rapant 等划分的环境风险标准<sup>[15]</sup>,笔者引用此标准来定量土壤中重金属污染的环境风险程度,分级标准见表 2。

表 2 环境风险指数分级<sup>[15]</sup>

环境风险指数	分级	环境风险程度
0	1	无环境风险
>0~1	2	低环境风险
>1~3	3	中等环境风险
>3~5	4	高环境风险
>5	5	极高环境风险

1.4 数据处理与统计分析

本研究中运用多元统计及自组织特征映射神经网络技术(self-organizing map,简称 SOM)、单因子污染分析法和地累积以及环境风险指数对土壤中的 Zn、Cu、Cr、Hg、As、Pb 进行研究。采用单因子污染分析法、地累积和环境风险指数法分析准东煤区土壤重金属环境风险状况。数据的统计、Pearson 相关分析、PCA(主成分分析)均由 SPSS 20.0 完成;数据记录由 Excel 2013 完成;SOM 算法由 Matlab 2012 实现。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量的统计描述

通过对比 2014 年和 2017 年土壤重金属含量均值(表 3)可以看出,土壤中 2017 年 Zn 元素含量比 2014 年减少了 86.96%,2017 年 Hg 元素含量比 2014 年减少了 84.85%。而 2017 年 As 元素含量比 2014 年增加了 154.56%,增加最明显,但仍未超出新疆背景值。此外,Pb 含量也有所增加,说明重金属含量变化较为明显。2014 年除了 Hg、Cr 元素以外,其他元素含量均未超出新疆背景值,2017 年仅 Cr 元素含量超出了新疆背景值,相对于 2014 年重金属含量,2017 年重金属含量相对减少。

表 3 土壤重金属含量

年份	元素	含量(g/kg)				偏度	峰度	新疆背景值 <sup>[16]</sup> (g/kg)
		最小值	最大值	均值	标准差			
2014	Zn	0.021	0.134	0.046	0.018	3.164	14.881	0.068
	Cu	0.008	0.054	0.018	0.008	2.259	8.136	0.026
	Cr	25.800	179.000	80.000	0.046	0.686	-0.844	49.300
	Pb	2.000	17.500	11.700	0.004	-0.823	-0.138	19.400
	Hg	0.030	0.735	0.066	0.123	4.607	24.357	0.020
	As	4.500	17.120	3.550	0.026	3.900	18.513	11.200
2017	As	1.700	32.000	9.037	6.032	2.611	8.300	11.200
	Hg	0.001	0.040	0.010	0.010	1.78	3.340	0.020
	Pb	9.500	24.700	16.280	2.983	0.37	1.470	19.400
	Cr	19.300	78.800	53.030	14.171	-0.26	0.014	49.300
	Cu	0.001	0.016	0.006	0.004	0.77	-0.260	0.026
	Zn	0.003	0.034	0.006	0.006	4.07	18.780	0.068

由图 2 可以看出,2014 年研究区土壤 Cr 元素变异系数为 59%,Hg 的 CV 为 184%,As 的 CV 为 76%,其中 Cr 与 As 元素 ( $10\% < CV < 100\%$ ) 属于中等变异,Hg ( $CV = 184\%$ ,  $> 100\%$ ) 属于高等变异。此外,土壤中 Hg 元素 CV 高于其他重金属,表明土壤中 Hg 含量易受到人类活动和外界因素的影响。相比于 2014 年,2017 年 Hg 元素的变异系数有所下降 ( $CV = 92\%$ ),说明此期间研究区由于人类活动的影响,土壤 Hg 含量变化有所减少,此外 Cr、Pb、As 元素变异系数均有所下降,而 Zn 与 Cu 元素变异系数有所增加。从表 3 可以看出,2014 年研究区土壤重金属 Cr、Hg 元素含量超出了新疆背景值,2017 年仅 Cr 元素含量超出新疆背景值,结合图 2,此变化受到自然因素的影响减少,受人类活动的影响增加,这与新疆“一带一路”大背景下建设生态文明、加大环境保护力度有关。

从图 3 可以看出,2014 年的土壤重金属质量分数较大,其中 Cu、Hg 元素 2014 年的土壤重金属百分比达 99% 以上,

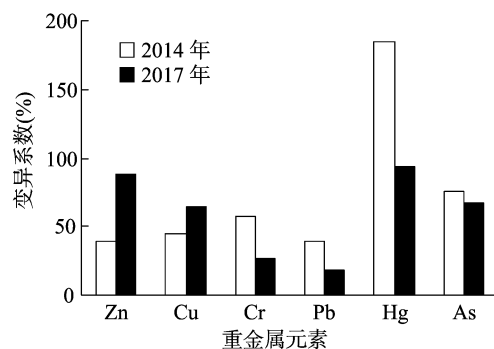


图2 重金属变异系数分析

2017 年百分比在 2% 以下,说明在准东煤区 Cu、Hg 元素含量明显下降;2014 年 Pb 元素质量分数为 34%,而 2017 年为 66%,说明 Pb 元素相对含量在增加;2014 年的土壤 Zn 与 Cr 元素的质量分数均大于 2017 年。表明准东煤区 2014—2017 年土壤重金属含量除了 Pb 元素外均呈减少趋势。

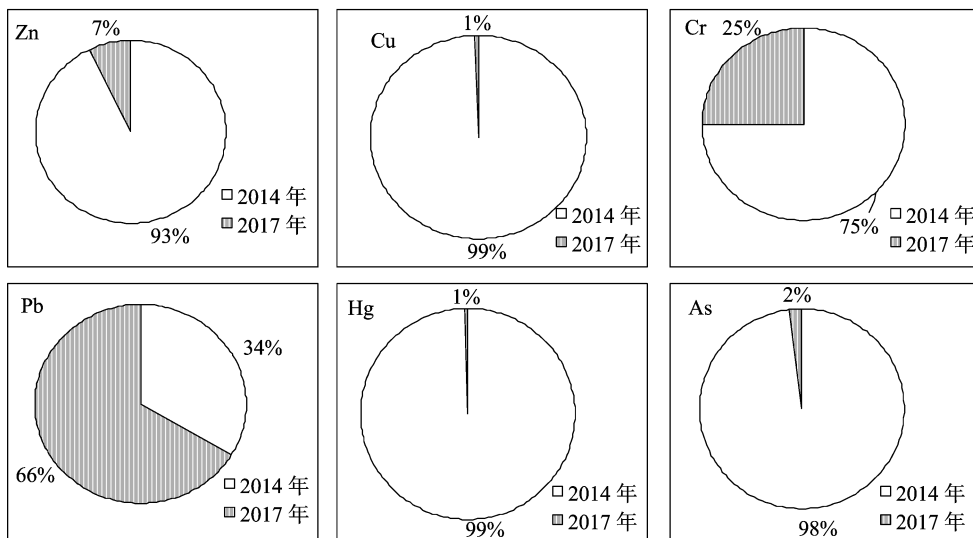


图3 2014、2017 年新疆准东煤区重金属含量

## 2.2 土壤重金属 SOM 分析

由分组结果(图 4)可知,如果分组过少,会造成部分差异性较大的土壤样本被分到同一个组;若分组过多,相似度高的

部分样本会被单独分组或出现无效分组。综合考虑样本的相似性和分组的有效性,本研究最后确定分组结果为  $5 \times 6$ ,即 30 组(图 4-B)。

用 SOM 分组邻域加权距离映射图(图 4-A)表示相邻分组的权重距离,并用颜色的深浅表示权重距离大小。颜色的深浅代表 2 组土壤之间的差异程度,颜色越浅,差异越小,反之则越大。为了能更清晰地表达 6 个土壤属性在 30 个分组

中的权重以及各土壤属性之间的内在相关性,本研究分析了 6 个土壤属性的邻域加权距离映射(图 4-C,图中颜色的深浅代表数值的大小)。

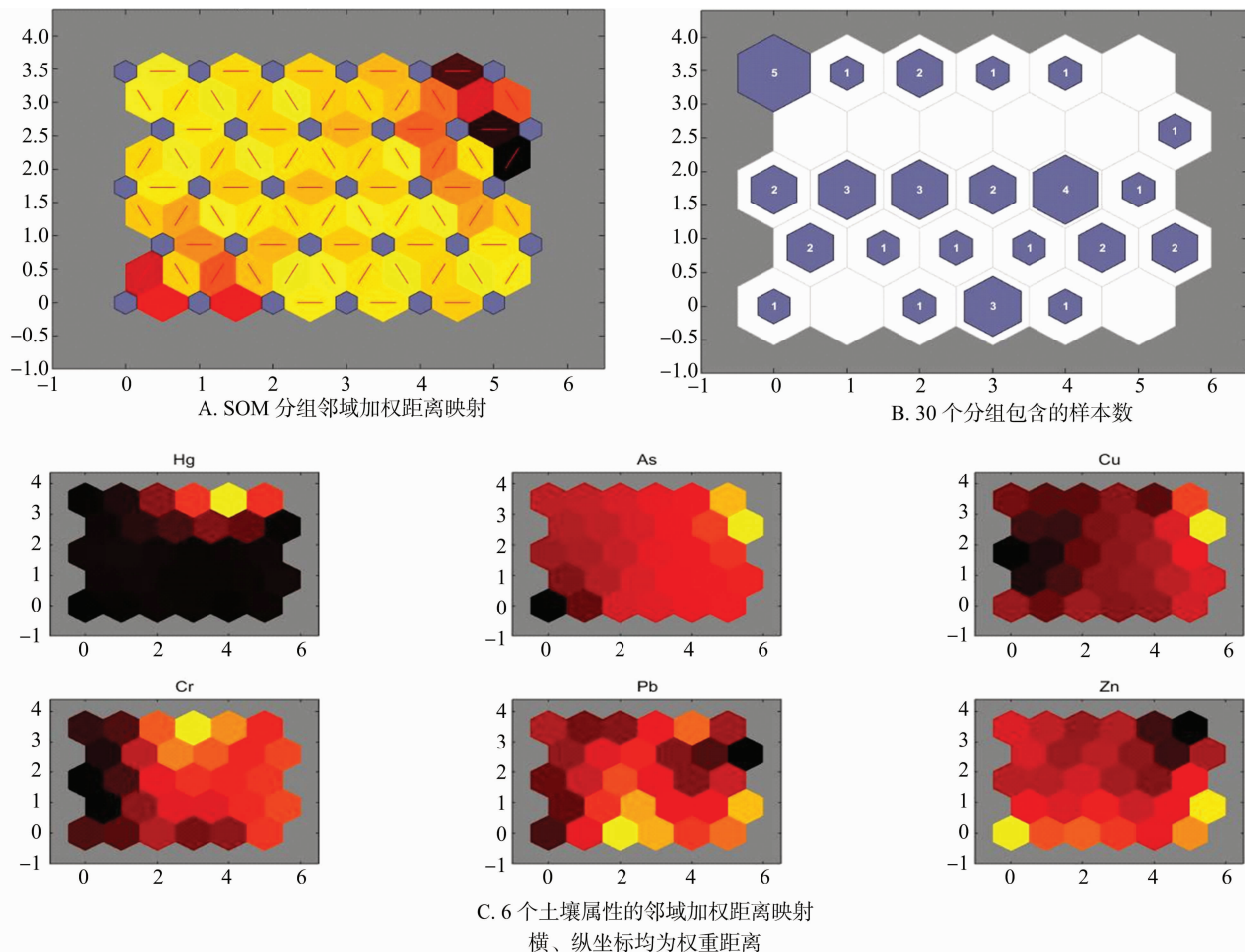


图4 65 个土壤样本 6 个参数的 SOM

通过比较各土壤属性邻域加权距离映射图可以看出,不同的土壤属性之间呈正相关、负相关或无显著相关性。土壤重金属 As 与 Cu 之间呈正相关关系,表明重金属 Cu 元素随着 As 元素含量的增加而增加。元素 SOM 权重图的高低,说明重金属来源的差异性的。从金属元素权重图可以看出,As 和 Cu 元素的相似性较高,说明这 2 种元素具有相似的来源。同理可得 Pb 和 Zn 具有较高的相似度,表明 Pb、Zn 元素可能同源。

### 2.3 土壤重金属污染评价

2.3.1 单因子污染评价 单因子污染统计分析(图 5)可知在 0~10 cm 的表层土壤中,2014 年土壤 Cr 元素含量的单因子污染指数均值超过 1,2017 年 Cr、Hg 和 As 3 种土壤重金属含量的单因子污染指数均超出 1,存在污染风险,说明 2014 年后的 3 年里 Hg 和 As 元素含量有所增加,其中 As 元素在煤炭中的含量远远超过在地壳中的含量,主要来源可能是大量煤炭燃烧,表明该地区近 3 年并未对 Hg 和 As 元素来源进行控制和治理;此外,Zn 和 Cu 元素均未出现污染状况,说明多年来准东煤区的开采并未引起土壤中 Zn 和 Cu 元素含量的增加;Pb 元素含量从 2014 年到 2017 年变化不大,均未超

过分界线,也均未发生富集现象。综上所述,2014 年至 2017 年 3 年中研究区土壤污染状况整体无改良趋势,准东煤田除常年煤炭开采外还伴随着一系列的煤电、煤化工等生产活动,这些活动均会引起大气降尘中 Hg 和 As 重金属含量升高<sup>[11-12]</sup>,2017 年 Hg 和 As 元素发生富集现象(图 5-B),进一步说明 2014 年以来准东煤区煤炭的连续开采导致使该地区的 Hg 和 As 元素含量增加。

2.3.2 地累积指数法评价 地累积指数<sup>[13]</sup>能够有效判别土壤中重金属污染程度的强弱并用于划分污染程度表<sup>[16-20]</sup>,研究区 2014 年和 2017 年土壤中每种重金属的地累积指数值的范围和平均值见图 6。由地累积指数可知,2014 年重金属污染的强弱顺序为 As>Zn>Cr>Cu>Pb>Hg。2017 年土壤重金属污染程度依次为 Pb>As>Cr>Zn>Cu>Hg。从图 6 可以看出,2014 年 6 种土壤重金属中只有 As 元素出现重金属污染现象,其余重金属的地累积指数大部分处于 0 以下,说明未出现污染状况,Zn、Cr、Cu、Pb、Hg 地累积指数只有个别异常点大于 0(图 6-A)。而 2017 年土壤重金属 As 与 Pb 元素出现严重污染现状,说明 3 年来煤区的开采导致土壤重金属 As 与 Pb 元素出现富集现象;2017 年的 Cr 元素达中度污染状

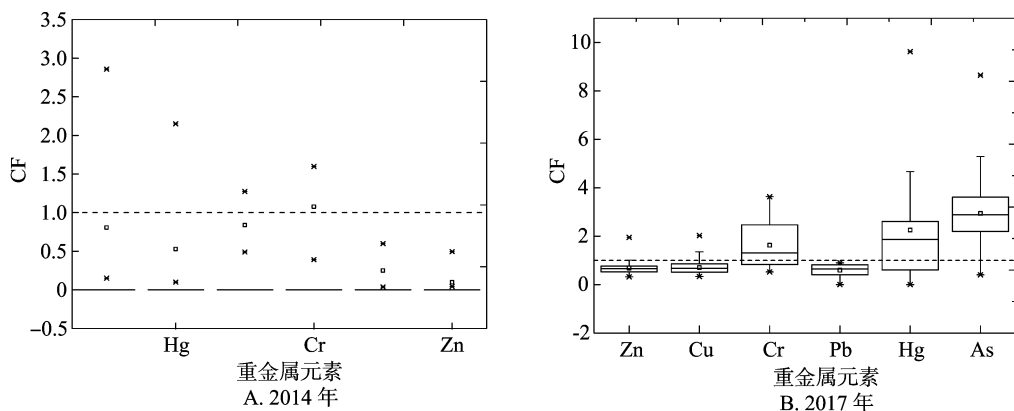


图5 单因子污染指数分析

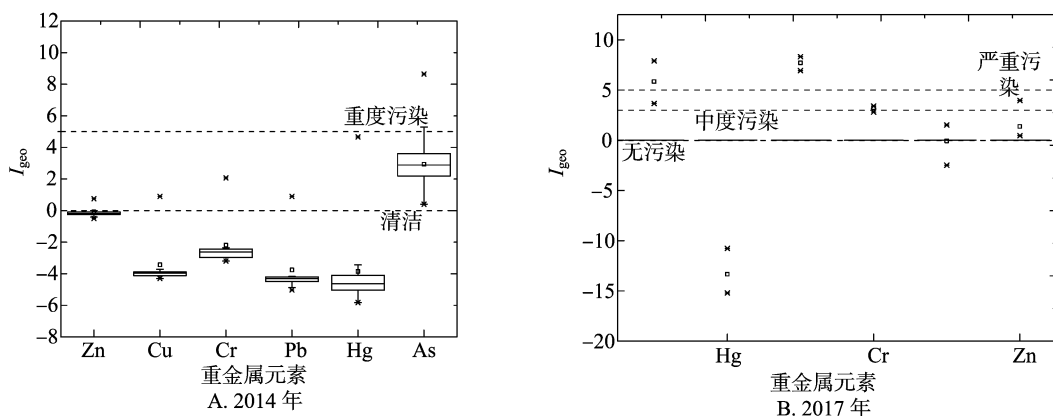


图6 重金属地累积指数分析

况,相对于2014年土壤重金属污染情况,污染程度有所增加;Zn和Cu元素也出现污染状况,说明煤区的开采还在持续影响着土壤重金属环境(图6-B)。从地累积指数可知,Hg元素并未出现污染状况,研究表明,煤炭燃烧是Hg的主要来源<sup>[11-12]</sup>,而2014年和2017年的地累积指数变化不明显,可推测煤炭燃烧工厂做了一些排废处理,因此地表土壤重金属含量无显著增加,没有发生污染状况。

#### 2.4 重金属的环境风险测度

根据环境风险指数公式可知,土壤重金属Zn、Cu和Pb元素环境风险指数较低,说明这3种指数对环境的影响较小;而Hg、As元素环境风险指数相对于其他4个土壤重金属元素要高,说明其环境风险发生的概率较大。2014年Cr、Hg和As元素的环境风险指数比2017年的高,说明环境风险发生的概率减少,而2017年土壤重金属的环境风险指数均较低(图7),说明该年土壤整体环境风险较低。

基于Rapant等提出的 $I_{ER}$ 和前人研究得出的重金属污染评价参数<sup>[21]</sup>以及相应的临界风险限量(表4)定量分析淮东煤区土壤重金属产生的环境风险特征。由环境风险指数与样品的频率分布(图8)可知,2014年样品中,无环境风险的比例为61.2%,低环境风险的比例为10.34%,中等环境风险的比例为24.56%,高环境风险的比例为0.86%,极高环境风险的比例为3.01%,说明淮东煤区土壤重金属污染产生的环境风险比较低。2017年样品中,无环境风险的比例为66.98%,低环境风险的比例为11.0%,中等环境风险的比例为16.74%,高环境风险的比例为1.91%,极高环境风险级别的

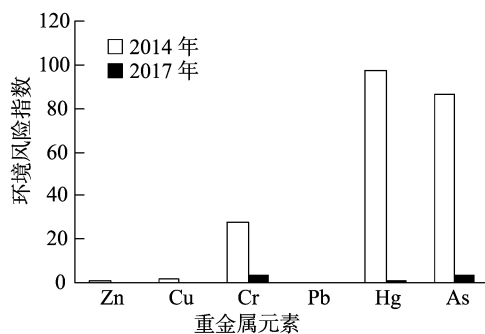


图7 重金属环境风险指数分布

比例为3.34%,其中无环境风险比例为66.98%,高环境风险和极高环境风险比例为5.25%,比2014年增加1.38个百分点,说明近3年土壤中某些污染严重的重金属风险在升高,相关环保部门应针对能够带来重金属污染高风险的单位进行监管,并对严重污染区域进行修复。综上所述,从2014年至2017年无环境风险的频率有所提高,但不明显,中等环境风险频率有所下降,其余环境风险频率变化不大,说明该地区重金属污染状况并未得到改善且环境风险较低。

#### 2.5 重金属空间分布分析

本研究将2014年与2017年的数据进行平均,进而分析其空间特征。在淮东煤区,包含工厂、生活区、农田区等区域研究煤区土壤重金属分布及污染状况很有必要。从图9可以看出,空间分布趋势基本一致的土壤重金属为Zn、Cu,这2个元素高值主要分布在煤区,工业区重金属分布较少,污染程度



表 4 环境风险评价的重金属参数及其相应的临界风险限量<sup>[21]</sup>

重金属	风险限量 (mg/kg)
As	29
Cr	130
Cu	36
Hg	0.3
Pb	85
Zn	140

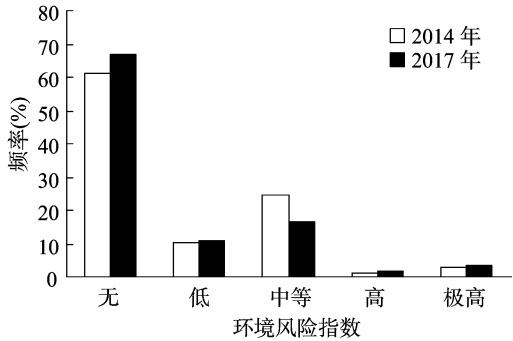


图8 环境风险指数与频率的关系

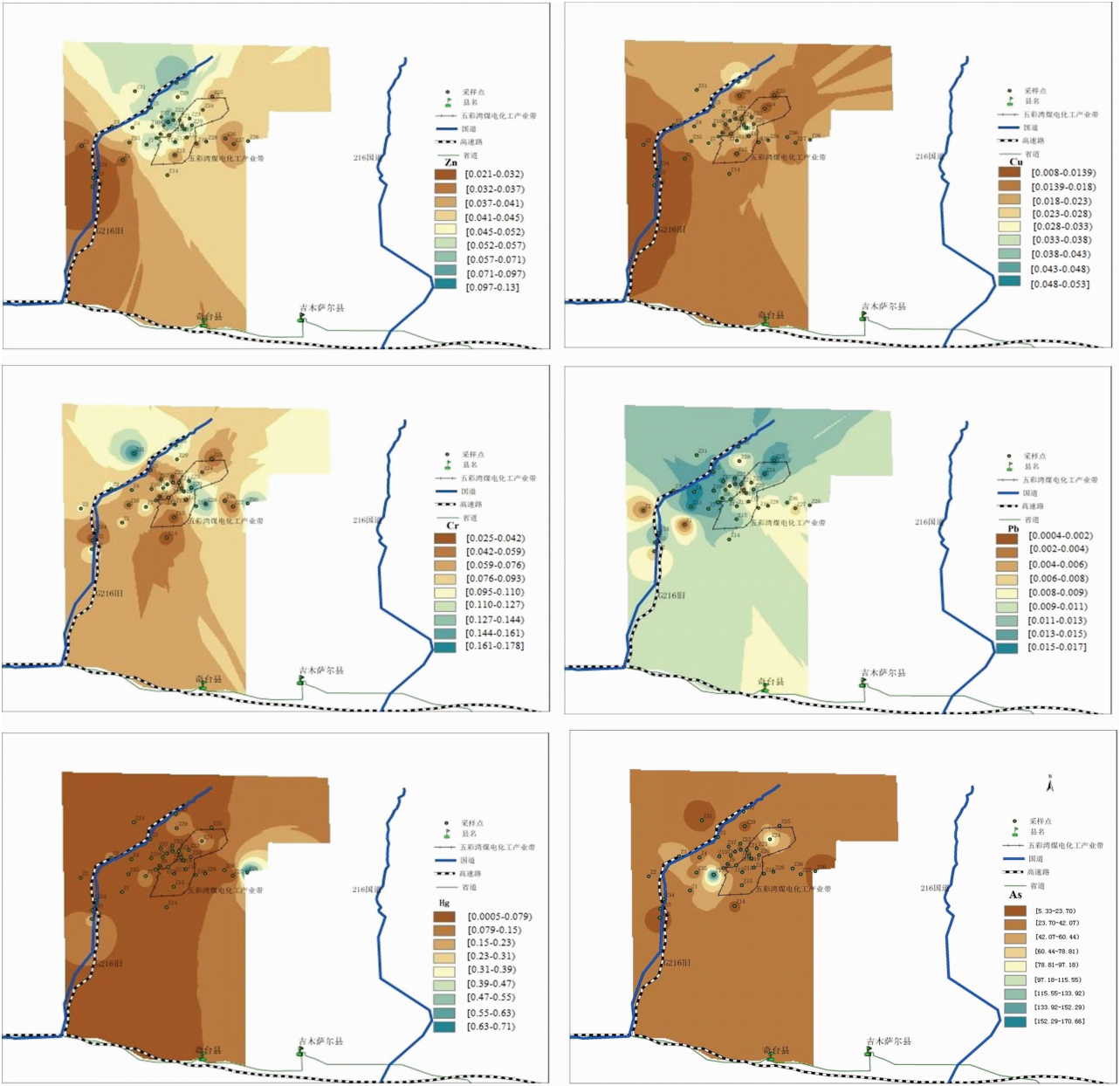


图9 2014—2017 年准东煤区土壤重金属空间分布特征

一般。研究区的东部与东北部为 Zn 重金属含量重度污染区，主要由于这附近分布着电厂和一些工业带。  
Cr 的重污染区位于 216 国道的西北部与五彩湾煤电工

业带附近，煤矿开采区处于轻度污染和中度污染之间。Pb 高值区出现在五彩湾煤矿开采区北部及其周围，主要因为在污染区北面有煤炭加工厂，南方有冶炼厂，这些工厂均可能是污

染物来源,这与姚峰等的观点<sup>[22]</sup>一致。

Hg 重金属的高值区主要位于研究区东部,该地区煤矿开采活动较为强烈,且有大量煤矸石堆场,矸石堆中含有大量 Hg 元素,除此之外,来自矿石燃烧的烟尘也会带来 Hg 污染,位于西北部的发电厂等工业带也是污染源。土壤中 As 的最高值分布在五彩湾煤区偏南部和五彩湾工业带北部,其中五彩湾煤区偏南部出现重污染状况,因为周边存在发电厂,此处是重要的 As 污染源。除以上工业活动外,还有一些人为因素造成不同区域重金属污染程度不同,包括研究区内人们生活中交通尾气的排放、废弃物的堆积等。

从图 9 可以看出,6 种重金属含量高低值的分布具有较强随机性,且在煤区、矿坑周围、发电厂、矸石场、化工厂和公路 2 侧等地方均出现重金属的高值,出现高值主要是因为工业区生产活动所产生的粉尘、原煤、矸石、覆土等污染物通过交通运输、加工、废物处理等环节从地下迁移到地表,其次因风速、风向、降水等气象因素导致大气中污染物降落到地表,从而增加了土壤重金属的含量。

### 3 结论

本研究通过对比 2014、2017 年准东煤区土壤重金属含量,并对不同年份的 6 种重金属含量和污染程度进行评价,分析了该地区 2014、2017 年的环境风险状况。主要得出以下结论:

从土壤理化性质分析可知,2017 年土壤重金属中 Zn、Hg 元素比 2014 年含量出现减少现象。Hg 元素变异系数为 184%,属于高等变异。2017 年相比 2014 年元素 CV 有所下降。

通过 SOM 分析可知,As 与 Cu 之间呈正相关,As 和 Cu 元素的相似性较高,Pb 和 Zn 具有较高的相似度,表明 As 和 Cu、Pb 和 Zn 元素可能同源。

通过污染分析可知,2014 年除 Cr 元素以外的元素含量均未超出新疆背景值。2017 年土壤重金属除 Cr、Hg 和 As 元素外其他重金属均未出现污染状况。由地累积指数可知,2014 年重金属污染的强弱顺序为 As > Zn > Cr > Cu > Pb > Hg,2017 年土壤重金属污染程度依次为 Pb > As > Cr > Zn > Cu > Hg。

从环境风险测度可知,2014 年样品中属无风险以上的比例接近 61.2%;2017 年土壤样品中属无风险的比例为 66.98%。从 2014 年至 2017 年无环境风险的频率有所提高,但不明显,中等环境风险频率有所下降,其余环境风险频率变化不大。

### 参考文献:

- [1] Abrahams P W. Soils: their implications to human health [J]. Science of the Total Environment, 2002, 291 (1/2/3): 1–32.
- [2] Adachi K, Tainosho Y. Single particle characterization of size – fractionated road sediments [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20 (5): 849–859.
- [3] Grandjean P, Landrigan P J. Developmental neurotoxicity of industrial

- chemicals [J]. Lancet, 2006, 368 (9553): 2167–2178.
- [4] Biasioli M, Grčman H, Kralj T, et al. Potentially toxic elements contamination in urban soils: a comparison of three European cities [J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36 (1): 70–79.
- [5] 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.
- [6] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China [J]. Chemosphere, 2005, 60 (4): 542–551.
- [7] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价——以银川市兴庆区为例 [J]. 环境科学, 2014, 35 (7): 2714–2720.
- [8] Li Q, Wang S F, Cao Y Z, et al. Ecological risk assessment and source analysis of heavy – metal pollution in farmland soils surrounding the coal mine of East Junggar Basin, China [J]. Journal of Agro – Environment Science, 2017, 36 (8): 1537–1543.
- [9] 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.
- [10] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 [J]. 环境科学, 2016, 37 (5): 1938–1945.
- [11] 李长春, 张光胜, 姚峰, 等. 新疆准东煤田五彩湾露天矿区土壤重金属污染评估与分析 [J]. 环境工程, 2014, 32 (7): 142–146.
- [12] 王玉军, 陈能场, 刘存, 等. 土壤重金属污染防治的有效措施: 土壤负载容量管控法——献给 2015“国际土壤年” [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (4): 613–618.
- [13] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969 (2): 108–118.
- [14] 陈伯扬. 重金属污染评价及方法对比——以福建浅海沉积物为例 [J]. 地质与资源, 2008, 17 (3): 213–218, 228.
- [15] Rapant S, Kordik J. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic: application of data from geochemical atlases [J]. Environmental Geology, 2003, 44 (4): 400–407.
- [16] 麦提麦吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警 [J]. 生态学报, 2018, 38 (3): 1075–1086.
- [17] 郭欣, 郑楚光, 陈丹. 300 MW 煤粉锅炉砷排放特征的研究 [J]. 环境科学, 2006, 27 (4): 631–634.
- [18] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京城市广场及校园表土(灰尘)中重金属水平与健康风险 [J]. 地理研究, 2010, 29 (6): 989–996.
- [19] Müller G. Schwermetalle in den sedimenten des rheins – veränderungen seit [J]. Umschau, 1979, 79 (24): 778–783.
- [20] 于万辉, 王俊杰, 臧淑英. 松嫩平原湖泊底泥重金属空间变异特征及其风险评价 [J]. 地理科学, 2012, 32 (8): 1000–1005.
- [21] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属环境风险测度与源解析 [J]. 地球化学, 2006, 35 (1): 88–94.
- [22] 姚峰, 包安明, 古丽·加帕尔, 等. 新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价 [J]. 中国环境科学, 2013, 33 (10): 1821–1828.