

李 乔, 王淑芬, 曹有智, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1537–1543.

LI Qiao, WANG Shu-fen, CAO You-zhi, 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.

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¹, 王淑芬², 曹有智¹, 王 卫^{1*}, 洪成林¹

(1. 石河子大学化学化工学院/新疆兵团绿色过程重点实验室, 新疆 石河子 832003; 2. 石河子大学理学院, 新疆 石河子 832003)

摘 要: 在新疆准东煤田周边的农业用地共采集 163 份表层土壤样品。采用重金属富集系数和潜在风险指数对土壤重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Hg)污染生态风险进行评估, 并通过多元统计分析和地统计分析对重金属的来源进行了解析。富集系数显示: 重金属 Cu 存在轻微的富集, Cd 和 Hg 存在显著的富集, 其他金属均不存在富集。潜在风险指数表明: 重金属 Cd 和 Hg 存在不同程度的污染, 其他金属均不存在污染, 研究区域的综合潜在风险很高。多元统计分析结果表明: Cr、Cu、Ni 和 Zn 为第一类, 来源于自然背景; Cd 和 Hg 分别为第二类和第三类, 来源于农业、工业和旅游业。采用熵值法计算第一类金属中 Cr、Cu、Ni 和 Zn 各自的权重, 并将第一类金属统一为一个新的变量, 通过对 3 类重金属三维空间分布图分析得出: 第一类重金属可能来源于土壤母质; 第二类重金属主要来源于工业污染; 第三类重金属主要来源于农业活动。

关键词: 熵值法; 重金属; 风险评估; 空间分布; 多元统计分析

中图分类号: X820.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)08-1537-07 **doi:** 10.11654/jaes.2016-1639

Ecological risk assessment and source analysis of heavy-metal pollution in farmland soils surrounding the coal mine of East Junggar Basin, China

LI Qiao¹, WANG Shu-fen², CAO You-zhi¹, WANG Wei^{1*}, HONG Cheng-lin¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering/Key Laboratory for Green Process of Chemical Engineering of Xinjiang Bingtuan, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. College of Science, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Assessment of the ecological risk and analysis of the sources of heavy metals can provide scientific basis for controlling and managing soil pollution. 163 soil samples were collected from the farmland surrounding the coal mine of East Junggar Basin, and the ecological risks of heavy metals were evaluated via the index of enrichment factor (*EF*) and the potential ecological risk index (*RI*). Meanwhile, the sources of heavy metals were analyzed by using multivariate statistical analysis and geostatistical analysis. The *EF* results showed that Cd was slightly enriched, Cu and Hg were significantly enriched, and the other heavy metals studied were not enriched. The *RI* results showed that Cd and Hg had very high ecological risk, the other heavy metals studied did not have ecological risk, and the study area had extremely high ecological pollution. Principal Component Analysis (PCA) and Cluster Analysis (CA) showed that Cr, Cu, Ni, and Zn were the first components and came from the natural background; Cd was the second component; and Hg was the third component, which came from agriculture, industry, and tourism. The weights of different heavy metals were calculated by using entropy method, and the first component was unified as a new variable quantity. The three dimensional spatial distribution of different components revealed that the first kind of heavy metals mainly came from the natural contents of soils, the second kind of heavy metals mainly came from industrial pollution, and the third kind of heavy metals mainly came from agricultural activities.

Keywords: entropy method; heavy metals; risk assessment; geostatistical analysis; multivariate statistical analysis

收稿日期: 2016-12-21

作者简介: 李 乔(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染物研究。E-mail: 1184278911@qq.com

* 通信作者: 王 卫 E-mail: wangwei_group@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(21267020, 21467026); 石河子大学应用基础研究青年项目(400380101)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(21267020, 21467026); Applied Basic Research Youth Project of Shihezi University (400380101)

煤炭在我国能源中的比重多达 67%,是我国消耗量最大的能源^[1]。然而,在能源带动国民经济发展的同时也引发了诸多的生态环境问题,影响人类的健康,制约矿区的发展^[2]。重金属具有分布广、毒性强、不能生物降解和能够通过食物链进行生物聚集等特点,是诸多生态环境污染物中危害较大的一种污染物^[3-4]。准东煤田西起昌吉回族自治州阜康市东界,东到木垒县的老君庙,是世界上最大的整装煤田^[5],除了煤矿是准东地区主要的经济来源外,农业也是其重要的经济支柱。近年来关于准东煤田重金属的研究集中在矿区及其附近,而对其周边县市的农田重金属尚未有研究。研究主要集中在重金属 Cr、Cu、Ni、Zn 和 Hg 的污染^[6-9],而对 Cd 的研究目前尚未见报道。Cd 是一种常见的土壤重金属污染物,张敏等^[10]和王兴明等^[11]的研究发现,部分煤矿周边土壤中重金属 Cd 存在一定程度的污染。本文选择准东煤田周边农田土壤作为研究区域,主要研究了 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Hg 这 6 种重金属的污染及其来源。

多元统计分析和地统计分析是常用的研究重金属来源的方法,多元统计分析通过寻找不同重金属间的联系从而将重金属进行分类,地统计分析通过重金属的空间分布寻找重金属污染的来源。然而,将多元统计分析进行分类后的结果直接量化为新的变量,然后用地统计分析直接分析量化后新变量的方法还鲜有学者尝试,其中最大的问题是如何合理界定已经分类出的重金属间的权重。熵值法是一种广泛应用于综合评价中的方法^[12-13],本文选择熵值法来计算权重。本研究旨在为准东煤田周边农田土壤的重金属污染风险作出合理的评估,为相关部门提供一定的数据支持,通过对污染来源的解析来为治理污染提供一定的依据。提出了一种将多元统计和地统计分析直接结合起来寻找污染源的简捷而方便的方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

准东煤田西起阜康市东部,东至木垒县的老君庙,整个煤田处于戈壁滩之中。本研究区域位于煤田南部的可耕种区域,87°46'33"~90°40'56"E,43°38'47"~44°23'50"N,北部是天山山脉,地形的总体趋势是西北地势较低,东南地势较高,属于中温带大陆性半荒漠干旱性气候,干旱少雨,主要靠天山积雪融化后的水灌溉,生态环境比较脆弱,容易遭到破坏,而且一旦遭到破坏将很难修复。研究区域的主要经济来源为农

林畜牧业和旅游业,工厂相对较少,农业最为发达。

1.2 样品的采集与处理

2015 年 7 月至 9 月参照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)在昌吉回族自治州的阜康市、吉木萨尔县、奇台县和木垒哈萨克自治县采集土壤样品 163 份,采样点分布见图 1。样品均采自 0~20 cm 的表层土壤,采样过程中用 GPS 定位,野外采集的土壤样品及时带回实验室进行前处理,实验室内风干,去除杂物及石子后用玛瑙研钵研磨,过 100 目(0.149 mm)筛,储存于塑料瓶中备用。

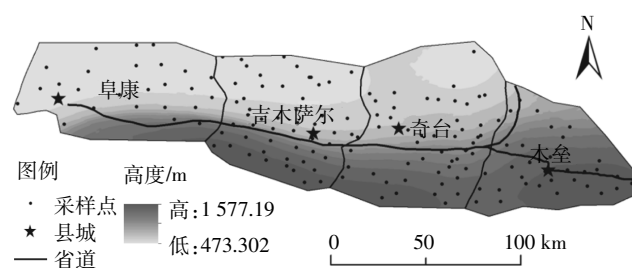


图 1 研究区采样点分布

Figure 1 Location of sample sites in studied area

1.3 样品的重金属含量测定

样品中 Cd、Cu、Zn、Cr、V 和 Ni 的测定:采用硝酸-盐酸-氢氟酸-高氯酸的混酸体系进行消解,利用电感耦合等离子体发射光谱法(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES)测定重金属含量。样品中 Hg 的测定:采用王水进行消解(GB/T 22105.1—2008),利用原子荧光光谱法(Atomic Fluorescence Spectroscopy, AFS)进行测定。为保证实验数据的准确性,对部分样品进行了平行实验,相对误差在 5%以内。用国家标准土样 GBW070008 进行回收实验,标样回收率在 90%~106%之间。

1.4 评价标准

1.4.1 土壤重金属富集系数

土壤重金属富集系数(EF)是评价人类活动对土壤重金属富集程度影响的一种参数。谢志宜等^[14]的研究表明,富集系数法是评价单个金属元素污染状况较为适用的方法。富集系数计算公式如下:

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_{\text{sediment}}}{(C_i/C_n)_{\text{background}}} \quad (1)$$

式中:\$(C_i/C_n)_{\text{sediment}}\$是土壤中金属 \$i\$ 与标准元素 \$n\$ 所测定的含量的比值;\$(C_i/C_n)_{\text{background}}\$是土壤中金属 \$i\$ 与标准元素 \$n\$ 的背景含量的比值。

标准化元素通常是化学性质比较稳定的元素,目

前使用最多的有 Fe、Al、Ti、Sc 和 V^[15-18]等,本文选择 V 作为标准元素。Sutherland^[19]将土壤重金属富集系数划分为 6 个等级,分别为: $EF \leq 1$,无富集; $1 < EF \leq 2$,轻微富集; $2 < EF \leq 5$,中度富集; $5 < EF \leq 20$,显著富集; $20 < EF \leq 40$,强烈富集; $40 < EF$,极度富集。

1.4.2 潜在生态风险指数法

根据重金属性质及其在环境中迁移转化沉积等行为特点,瑞典科学家 Hakanson 从沉积学角度提出将重金属含量、生态效应、环境效应和毒理学联系在一起进行评价的潜在生态风险指数法^[20]。其表达式为:

$$E_i^i = T_i^i \times C_f^i \quad (2)$$

$$RI = \sum E_i^i = \sum (T_i^i \times C_f^i) = \sum (T_i^i \times C_s^i / C_n^i) \quad (3)$$

式中: E_i^i 为单因子风险指数; RI 为综合潜在风险指数; T_i^i 为重金属 i 的毒性响应系数,Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Hg 的毒性系数^[21]分别为 30、2、5、5、1 和 40; C_f^i 为重金属 i 相对于土壤背景值的污染系数; C_s^i 为表层土壤重金属 i 的实测含量; C_n^i 为土壤中重金属 i 的背景参考值。

E_i^i 的分级为: $E_i^i < 40$,低风险; $40 \leq E_i^i < 80$,中等风险; $80 \leq E_i^i < 160$,较高风险; $160 \leq E_i^i < 320$,高风险; $320 \leq E_i^i$,极高风险。考虑到污染的种类和数目不同,目前的研究大多对生态风险评价标准进行了适当的调整^[22]。本研究将各金属的毒性系数 T_i^i 的总和进行取整后作为 RI 的第一级,后一级为前一级的两倍,依此类推, RI 的分级为: $RI < 80$,低风险; $80 \leq RI < 160$,中等风险; $160 \leq RI < 320$,较高风险; $320 \leq RI$,高风险。

1.5 熵值法

熵值法是一种客观的赋权方法,是根据某些指标的离散程度来计算各个指标的贡献度的方法。熵值越小,则权重越大,进而离散度越大,该指标对综合评价的影响越大。熵值法计算各指标的权重的计算公式如下:

$$w_j = D_j / \sum_{j=1}^n D_j \quad (4)$$

$$D_j = 1 - S_j \quad (5)$$

$$S_j = -\frac{1}{\ln(m)} \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}) \quad (6)$$

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (7)$$

式中: w_j 为重金属 j 在所有重金属中所占的权重; S_j 为重金属 j 的熵; D_j 为重金属 j 与其他重金属的一致性程度; p_{ij} 为重金属 j 中第 i 个样品点数值所占的权重; x_{ij} 为第 i 个样本中重金属 j 的浓度。

2 结果与讨论

2.1 研究区土壤重金属含量描述性统计分析

异常值的存在将影响数据总体的代表性,也不符合地统计分析的数据连续的基本要求,我们将 $M \pm 3S$ 区间外的数据视为异常值^[23](M 为样品的平均值, S 为样品的标准差),剔除异常值后的数据用于后面的分析。如表 1,研究区土壤重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Hg 的平均含量分别为 1.09、48.83、36.97、24.18、62.48、0.122 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。部分样点的重金属 Cd 含量超过了国家二级标准(GB 15618—1995),其他金属的含量均低于国家二级标准。Cr、Ni 和 Zn 的平均含量均与新疆土壤背景值相近,而 Cd、Cu 和 Hg 的平均含量均大于新疆背景值^[24],且 Cd 和 Hg 的含量远高于新疆背景值,重金属 Cd、Cu 和 Hg 在研究区域的土壤中存在富集。与我国其他地方的土壤重金属含量相比,Cr、Ni 和 Zn 的含量相对较低,Cd、Cu 和 Hg 的含量处在中间水平(表 2)。变异系数可以独立地反映不同元素分布的离散程度,通常情况下,变异系数小的元素主要来源于地质因素,变异系数大的元素主要来源于人类活动^[25]。重金属 Cr、Ni 和 Zn 的变异系数分别为 16.11%、13.83%、14.93%,小于 36%,具有弱的变异性;而 Cd、Cu 和 Hg 的变异系数分别为 70.62%、39.68% 和 70.49%,大于 36%,具有强的变异性。这与 Cd、Cu 和

表 1 研究区土壤重金属含量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics for heavy metals in soils of the studied area

项目	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	V
极小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.18	32.28	15.99	14.93	36.87	0.007	45.54
极大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.66	73.23	72.95	32.06	87.90	0.466	123.67
均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.09	48.83	36.97	24.18	62.48	0.122	71.33
标准差/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.77	7.87	14.67	3.34	9.33	0.086	14.67
变异系数/%	70.62	16.11	39.68	13.83	14.93	70.49	20.56
新疆土壤背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.12	49.3	26.7	26.6	68.8	0.017	74.9
土壤质量二级标准/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (pH>7.5)	0.6	250	100	600	300	1.0	—

表 2 不同地方的土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 The concentration of heavy metals in soils of different area(mg·kg⁻¹)

地区	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	参考文献
准东	1.09	48.83	36.97	24.18	62.48	0.122	本研究
青藏	2.93	57.29	56.38	70.22	178.68	—	Bu 等 ^[26]
乌市	1.17	54.28	94.54	43.28	53.53	—	Wei 等 ^[27]
顺德	0.6	78.8	—	33.4	—	0.3	Cai 等 ^[28]
大冶	1.41	60.7	105	25.8	159	0.09	Du 等 ^[29]
北京	0.20	58.15	26.78	21.22	78.03	0.83	Zou 等 ^[30]
上海	0.186	66.1	32.3	30.9	87.7	0.14	Bai 等 ^[31]

Hg 的平均含量大于新疆背景值的结果有一定的关联,表明重金属 Cd、Cu 和 Hg 的污染可能来源于人为因素,且重金属 Cd 和 Hg 可能受到人为因素的影响较大。

2.2 土壤环境质量评价

如表 3,重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Hg 的平均富集系数分别为 8.42、0.97、1.39、0.88、0.88 和 6.91。参照重金属富集的分类标准,重金属 Cr、Ni 和 Zn 处于无富集状态,重金属 Cu 有轻微的富集,重金属 Cd 和 Hg 均处于显著富集的状态。说明准东煤田周边农田土壤的重金属可能部分来源于人类的活动,而且重金属污染是相互混杂的,属于多种重金属共同污染。

2.3 土壤重金属潜在生态风险评估

重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Hg 的潜在生态风险如表 4,Cr、Cu、Ni 和 Zn 存在低的潜在风险,Hg 和 Cd

存在较严重的潜在风险。Hg 有 1.3%处于低风险状态,3.9%处于中等风险状态,14.28%处于较高风险状态,53.9%处于高风险状态,26.62%处于极高风险状态。Hg 风险等级分布比较广,可能是由于其吸附能力较强,容易附着在物体表面并通过多种途径向四周扩散。Cd 有 16.23%处于中等程度的生态风险,35.72%处于较高的生态风险,48.05%处于极高的生态风险。总体来说,重金属 Cd 的生态风险最大,Hg 生态风险较大,其他重金属都不存在生态风险。研究区有 20.13%的样点具有较高的综合潜在生态风险,79.87%的样点具有很高的综合潜在风险,整体上潜在生态风险较大。

2.4 土壤重金属来源分析

2.4.1 土壤重金属污染元素的主成分分析

运用 SPSS 19.0 软件的因子分析模块的主成分分析方法,根据重金属间的相似性做的主成分分析结果如图 2。重金属 Cu、Cr、Zn 和 Ni 为第一主成分,重金属 Cd 为第二主成分,重金属 Hg 为第三主成分。第一主成分解释了 54.11%的信息,第二主成分解释了 22.83%的信息,第三主成分解释了 15.61%的信息,三个主成分总共解释了 92.55%的信息。

2.4.2 土壤重金属元素的聚类分析

表 3 研究区土壤重金属富集指数(EF)
Table 3 EF of heavy metals in soils of studied area

重金属	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg
平均值	8.42	0.97	1.39	0.88	0.88	6.91
最大值	31.18	2.45	4.16	1.78	1.94	28.69
最小值	1.06	0.41	0.40	0.38	0.37	0.33
标准差	6.24	0.36	0.81	0.28	0.30	5.06

表 4 研究区土壤重金属潜在生态风险指数
Table 4 Potential ecological risk indexes of heavy metals in soils of the studied area

项目	平均值	最大值	最小值	样品分布比例/%				
				低	中等	较高	高	极高
Cd	272.2	665.0	45.0	0	16.23	35.72	0	48.05
Cr	1.98	2.97	1.31	100	0	0	0	0
Cu	6.92	13.66	2.99	100	0	0	0	0
Ni	4.55	6.03	2.81	100	0	0	0	0
Zn	0.91	1.28	0.54	100	0	0	0	0
Hg	287.29	1 095.48	16.12	1.30	3.90	14.28	53.90	26.62
RI	573.89	1 257.96	188.23	0	0	20.13	79.87	—

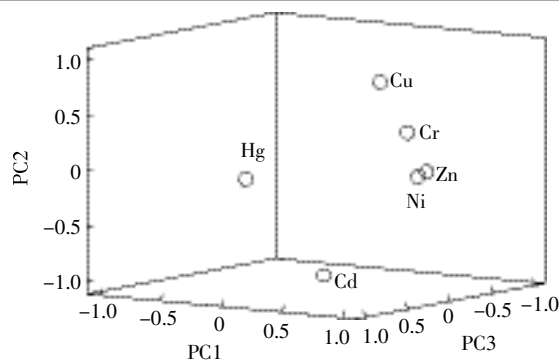


图 2 重金属主成分负荷图

Figure 2 Principal component loading plot of the heavy metals

根据土壤样品间的相似性,采用 SPSS 19.0 软件进行聚类分析结果如图 3 所示。第一类土壤样品分布比较广,在阜康、奇台和木垒均有样品点,仅在吉木萨尔没有样品点。吉木萨尔县以放牧为主,地广人稀,人口密度比其他县市小,表明聚类分析的第一类样品点应该受到了人为因素的影响。阜康是一个煤矿工业发达的地区,第一类样点几乎包含了阜康的所有采样点,在其他县市的煤矿附近也有所分布,表明受到了煤矿工业的影响。此外,第一类样品点在奇台南部的景区也很集中,受到人为的影响相对严重,因而聚类分析的第一类样品点可能主要代表了工业和旅游业的影响。第二类样品点主要集中在木垒哈萨克自治县,各金属元素含量几乎都处于中等水平,但重金属 Hg 和 Cd 的含量还是远超新疆背景值。木垒少数民族人口众多,其中以哈萨克族最多,哈萨克族主要以放牧为主,土壤受到工业和农药化肥的干扰比较小,重金属 Hg 和 Cd 含量高可能主要是由于木垒南部旅游业发达,受到旅游业的影响。第三类样点重金属 Cd 的含量相对较低,但平均含量依旧高于新疆土壤背景值,重金属 Hg 和 Cu 的含量都超过新疆土壤背景值,在吉木萨尔县和奇台县尤为集中,从分布规律来看,这些样点大多分布在种植区域,少数分布在养殖区域和景区,因此第三类样点主要受到农业和旅游业的影响(表 5)。

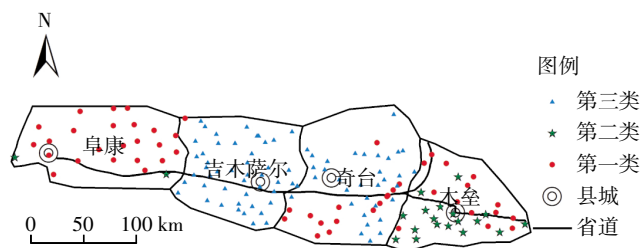


图 3 重金属聚类分析图

Figure 3 Clustering analyses of heavy metals

表 5 不同类别样点重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 5 The concentration of heavy metals on different clusters

类别	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg
1	1.91	44.50	24.87	24.25	63.02	0.11
2	1.74	46.29	20.59	21.89	53.80	0.11
3	0.38	52.39	49.23	24.70	64.29	0.13

2.5 土壤重金属空间分布

主成分分析的第一类重金属各自的权重根据熵值法^[12-13]计算,结果如表 6。将 Cr、Cu、Ni 和 Zn 的浓度与其对应的权重系数相乘,将乘积的加和作为主成分分析的第一个成分的值,并进行相应的地统计分析得到相应的空间分布图如图 4。第一类主成分(Cr、Cu、Ni 和 Zn)含量较高的地方主要集中在吉木萨尔,与聚类分析的第三类分布极其相似。因此,考虑聚类分析第三类的农业和旅游污染是否会分析主成分分析的第一类污染的可能污染源。如表 1 所示,研究区域重金属 Cr、Ni 和 Zn 的平均含量与新疆的土壤背景值极其相近,重金属 Cu 的平均含量稍高于背景值,可能是由于新疆土壤背景值统计的 260 个采样点来自于整个新疆,而本研究的地区相对较小,导致数据相对偏大。主成分分析(图 2)表明,在所有样点中重金属 Cu 与 Ni、Cr 和 Zn 有极大的相似性和类似的分布规律,因此第一类主成分代表了自然背景。第二类主成分(Cd)含量高的地方主要集中在阜康的煤矿区和市区以及木垒的景区和市区,而含量最高的点却在奇台南部的黑沟附近,黑沟是一个放牧与旅游为主的景区。宋泽峰等^[32]的研究表明重金属 Cd 可通过河流迁移,通过对图 1 和图 4 的综合分析,发现在木垒和阜康地区含 Cd 高的地方都连续有从海拔高的地方向海拔低的地方扩散的趋势。这可能是由于研究区域的煤矿大多集中在山区,在海拔高的地方造成了一定的污染,然后污染通过河流、大气等途径向下游扩散。根据安靖等^[33]和孙亚芳等^[34]的研究,河流的污水灌溉应该是一个主要的扩散因素。因此,第二类主成分代表了工业和生活垃圾以及污水灌溉造成的污染,且主要来源于煤矿工业。第三类主成分(Hg)含量高的地方位于各个县市种植和畜牧业较发达的区域,Hg 是化肥中的常见成分^[35],农业活动可能是 Hg 污染的主要来源。

表 6 第一主成分中各金属的权重

Table 6 The weight of different heavy metals in the first component

重金属	Cr	Cu	Ni	Zn
权重系数	0.115	0.699	0.087	0.099

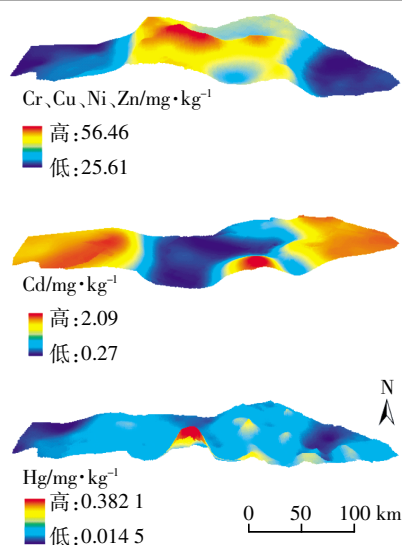


图4 各类主成分空间分布

Figure 4 Spatial distributions of different components

3 结论

(1) 准东煤田周边农田土壤中重金属 Cu、Hg 和 Cd 存在富集, Cd 和 Hg 存在严重的污染, 整个地区重金属综合潜在生态风险很高, 应该引起重点关注。

(2) 准东煤田周边农田土壤主要受到工业、旅游业和农业的影响, 第一类土壤可能主要受到工业和旅游业的影响, 第二类土壤可能主要受到旅游业的影响, 第三类土壤可能主要受到农业和旅游业的影响。

(3) 准东煤田周边土壤中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Zn 和 Hg 主要来源于三个不同的途径: Cr、Ni、Cu 和 Zn 可能来源于土壤的背景值; Cd 可能主要来源于煤矿工业污染; Hg 可能主要来源于复杂的农业污染。

参考文献:

[1] 2014 年《BP 能源统计年鉴》中国能源调查[J]. 资源节约与环保, 2014(8): 16-17.
BP energy statistical review of China energy survey in 2014[J]. *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2014(8): 16-17.

[2] 孙琦, 白中科, 曹银贵, 等. 特大型露天煤矿土地损毁生态风险评估[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 278-288.
SUN Qi, BAI Zhong-ke, CAO Yin-gui, et al. Ecological risk assessment of land destruction in large open-pit mine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17): 278-288.

[3] Cai Y, Zhang W, Zhou M, et al. Comprehensive assessment of heavy metal contamination in surface sediments from the inflow rivers of Taihu Basin[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2015, 43(12): 1582-1591.

[4] Ying H, Li T, Wu C, et al. An integrated approach to assess heavy metal source apportionment in peri-urban agricultural soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299: 540-549.

[5] 张会. 探访世界最大的煤田: 新疆准东煤田[J]. 气体分离, 2010(3): 19-22.
ZHANG Hui. Teach the world's largest coalfield: Eastern Junggar coal-field of Xinjiang[J]. *Gas Separation*, 2010(3): 19-22.

[6] 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.
YAO Feng, BAO An-ming, GULI Jiapaer, et al. Soil heavy metal sources and pollution assessment in the coalfield of East Junggar Basin in Xinjiang[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(10): 1821-1828.

[7] 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.
LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, et al. Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of East Junggar Basin in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1938-1945.

[8] 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 等. 新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评估[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2453-2461.
YANG Chun, TASHPLOAT Tiyp, HOU Yan-jun, et al. Assessment of heavy metals pollution and its health risk of atmospheric dust fall from east part of Junggar Basin in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(7): 2453-2461.

[9] 刘芳, 塔西甫拉提·特依拜, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 准东露天煤田周边土壤重金属污染及潜在生态风险[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1388-1393.
LIU Fang, TASHPLOAT Tiyp, ILYAS Nurmamat, et al. Pollution and potential ecological risk of soil heavy metals around the coalfield of East Junggar Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8): 1388-1393.

[10] 张敏, 王美娥, 陈卫平, 等. 湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1425-1430.
ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, et al. Characteristics and Inputs of Cd contamination in paddy soils in typical mining and industrial areas in Youxian County, Hunan Province[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1425-1430.

[11] 王兴明, 董众兵, 刘桂建, 等. Zn、Pb、Cd、Cu 在淮南新庄孜煤矿矸石山附近土壤和作物中分布特征[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(1): 17-25.
WANG Xing-ming, DONG Zhong-bing, LIU Gui-jian, et al. Distribution characteristics of Zn, Pb, Cd, Cu in soil and crops around Xinzhuangzi coal mine waste rock pile[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2012, 42(1): 17-25.

[12] 陈明星, 陆大道, 张华. 中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 387-398.
CHNE Ming-xing, LU Da-dao, ZHANG Hua. Comprehensive evaluation and the driving factors of China's urbanization[J]. *Acta Geographica Science*, 2009, 64(4): 387-398.

[13] 侯艳军. 准东地区降尘-土壤-植物重金属迁移过程及生态效应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
HOU Yan-jun. Study on the transport processes and ecological effect of heavy metals in dust-soil-plant in the East Junggar region[D]. U-

- rumqi; Xinjiang University, 2015.
- [14] 谢志宜, 张雅静, 陈丹青, 等. 土壤重金属污染评价方法研究: 以广州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1329–1337.
- XIE Zhi-yi, ZHANG Ya-jing, CHEN Dan-qing, et al. Research on assessment methods for soil heavy metal pollution: A case study of Guangzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1329–1337.
- [15] Cevik F, Göksoy M Z, Derici O B, et al. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2009, 152(1/2/3/4): 309–317.
- [16] Zhao D, Wan S, Yu Z, et al. Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of Hainan Island rivers, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 5097–5110.
- [17] 李 倩, 秦 飞, 季宏兵, 等. 北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2384–2394.
- LI Qian, QIN Fei, JI Hong-bing, et al. Contents, sources and contamination assessment of soil heavy metals in gold mine area of upstream part of Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2384–2394.
- [18] 赖营帅, 马媛媛, 王 卫, 等. 新疆“金三角”地区重金属污染及潜在生态风险评估[J]. 环境化学, 2016, 35(7): 1381–1389.
- LAI Ying-shuai, MA Yuan-yuan, WANG Wei, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in the "Golden Triangle" region, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(7): 1381–1389.
- [19] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611–627.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [21] 徐争启, 倪树军, 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]. *Environment Science and Technology*, 2008, 31(2): 112–115.
- [22] Jiang X, Lu W X, Yang Q C, et al. Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy metal pollution around coal gangue dump [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2014, 14(6): 1599–1610.
- [23] Liu X, Wu J, Xu J. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(2): 257–264.
- [24] 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.
- Environmental Monitoring Centre. Chinese soil element background values[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 329–368.
- [25] Liu Y, Ma Z W, Lv J S. Identifying sources and hazardous risks of heavy metals in topsoils of rapidly urbanizing East China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(6): 735–749.
- [26] Bu J W, Sun Z Y, Zhou A G, et al. Heavy metals in surface soils in the upper reaches of the Heihe River, Northeastern Tibetan Plateau, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(3): 247.
- [27] Wei B, Jiang F, Li X, et al. Heavy metal induced ecological risk in the city of Urumqi, Northwest China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1/2/3/4): 33–45.
- [28] Cai L M, Xu Z C, Bao P, et al. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and source of arsenic and heavy metals in the agricultural soils in Shunde, Southeast China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 148: 189–195.
- [29] Du P, Xie Y F, Wang S J, et al. Potential sources of and ecological risks from heavy metals in agricultural soils, Daye City, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(5): 3498–3507.
- [30] Zou J, Dai W, Gong S, et al. Analysis of spatial variations and sources of heavy metals in farmland soils of Beijing Suburbs[J]. *PLoS One*, 2014, 10(2): e0118082.
- [31] Bai Y, Wang M, Peng C, et al. Impacts of urbanization on the distribution of heavy metals in soils along the Huangpu River, the drinking water source for Shanghai[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(6): 5222–5231.
- [32] 宋泽峰, 栾文楼, 崔邢涛, 等. 冀东平原土壤重金属元素的来源分析 [J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1530–1538.
- SONG Ze-feng, LUAN Wen-lou, CUI Xing-tao, et al. An analysis of the sources of heavy metals in soils of Eastern Hebei Plain[J]. *Geology in China*, 2010, 37(5): 1530–1538.
- [33] 安 婧, 宫晓双, 陈宏伟, 等. 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估[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 37–44.
- AN Jing, GONG Xiao-shuang, CHEN Hong-wei, et al. Temporal and spatial characteristics and health risk assessments of heavy metal pollution in soils of Shenfu irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 37–44.
- [34] 孙亚芳, 王祖伟, 孟伟庆, 等. 天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4): 679–685.
- SUN Ya-fang, WANG Zu-wei, MENG Wei-qing, et al. Contents and health risk assessment of heavy metals in wheat and rice grown in Tianjin sewage irrigation area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4): 679–685.
- [35] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 生态与农村环境学报, 2004, 20(2): 62–64.
- WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2): 62–64.