

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.10.2015041305

方凤满, 焦华富, 江培龙. 徐州煤矿混推复垦区土壤重金属分布特征及潜在风险评价[J]. 环境化学, 2015, 34(10): 1809-1815

FANG Fengman, JIAO Huaifu, JIANG Peilong. Distribution and risk assessment of heavy metals in soils of Xuzhou coal reclamation area[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(10): 1809-1815

徐州煤矿混推复垦区土壤重金属分布特征 及潜在风险评价*

方凤满^{1**} 焦华富¹ 江培龙²

(1. 安徽师范大学国土资源与旅游学院, 芜湖, 241003; 2. 武汉西藏中学, 武汉, 430000)

摘 要 以徐州煤矿混推复垦区为研究对象, 采用 Tessier 连续提取法, 对该复垦区土壤 Zn、Pb、Ni、Mn、Cu、Cr 等 6 种重金属含量进行分析和风险评价。结果表明, 除 Cr 外, 复垦区土壤 Zn、Pb、Ni、Mn 和 Cu 的含量均大于当地土壤背景值, 但均未超过国家土壤环境质量二级标准, 不同复垦年限下土壤重金属含量差异较大, Zn、Mn 总体上随复垦年限延长, 积累越明显。形态分析表明, Pb 和 Mn 以铁锰氧化物结合态为主; Zn、Ni、Cu 和 Cr 以残渣态为主。徐州煤矿复垦区土壤重金属的生物可利用系数(BF)的平均值大小为 Mn>Pb>Cu>Zn>Cr>Ni。各重金属的生态风险程度大小为 Pb>Cu>Ni>Mn>Cr>Zn。徐州煤矿复垦区土壤重金属的潜在生态风险指数范围是 16.71—25.94, 平均值为 21.56, 属于轻微生态危害。不同复垦年限下土壤重金属的综合潜在生态风险指数大小为 1997 年复垦>2006 年复垦>1987 年复垦>2010 年复垦>塌陷未复垦>未塌陷, 各复垦年限下土壤重金属均属于轻微生态风险。

关键词 徐州矿区, 复垦土壤, 重金属形态, 潜在生态风险。

Distribution and risk assessment of heavy metals in soils of Xuzhou coal reclamation area

FANG Fengman^{1**} JIAO Huaifu¹ JIANG Peilong²

(1. College of Territorial Resources and Tourism; Anhui Normal University, Wuhu, 241003, China;
2. Xizang Middle School in Wuhan, Wuhan, 430000, China)

Abstract: Soil samples were collected in a Xuzhou reclamation area of coal mine. Five step sequential extraction method was applied to investigate the speciation distribution characteristics of six heavy metals (Zn, Pb, Ni, Mn, Cu, Cr) in the reclamation soils. Results showed that there was a rather large difference of the heavy metals accumulation under different reclamation years. The concentrations of five heavy metals (Zn, Pb, Ni, Mn, Cu) in the reclaimed soil exceeded background value of Jiangsu soil. But the concentrations of all 6 heavy metals in the reclaimed soil were all below the National Soil Environmental Quality Standard of Grade II. Speciation analysis indicated that Pb, Mn were mainly in the Fe-Mn oxide form, while Zn, Ni, Cu, Cr were orimarily in the residual fraction. Bioavailability factor of the heavy metals ranked in the order of Mn > Pb > Cu > Zn > Cr > Ni. The heavy metal ecological risk was in the order of Pb > Cu > Ni > Mn > Cr > Zn. The potential ecological risk index of all heavy metals were between 16.71 and 25.94, the mean value was 21.56, indicating slight pollution. The ecological risk for different reclamation years was in the order of 1997 > 2006 > 1987 > 2010 > un-reclaimed > un-sunken, suggesttiag slight pollution.

Keywords: coal mine in Xuzhou, reclaimed soil, heavy metal speciation, potential ecological risk.

2015 年 4 月 13 日收稿。

* 国家自然科学基金(41371480); 教育部博士点基金博导类课题(20103424110002) 资助。

** 通讯联系人, E-mail: ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

煤矿塌陷区复垦过程中采用的工程措施导致土壤受人为活动的干扰明显,充填材料的选择和复垦年限对土壤结构和肥力的恢复、重金属污染产生较大影响^[1-2].复垦土壤一旦受到重金属污染,将通过食物链进入人体,影响人体健康和生命安全.目前国内外学者对矿区土壤重金属污染进行了大量研究,但多集中于对复垦方式、重金属空间分布和污染特征等方面的研究^[3-4].对不同复垦年限下土壤重金属含量及化学形态的研究较少.相对于总量,重金属化学形态的研究对了解重金属的来源、生物毒性、迁移转化和生物有效性具有更为重要的意义.本文以徐州煤矿复垦区土壤为研究对象,对该复垦区不同复垦年限下的土壤重金属污染、形态分布特征及其生态风险进行评价,旨在为矿区污染土地复垦工作提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以徐州市西北 20 km 的铜山区柳新镇境内的柳新煤矿和垞城煤矿开采造成的塌陷地为研究对象.采取混推复垦方式,分别选择 1987 年复垦、1997 年复垦、2006 年复垦、2010 年复垦、塌陷未复垦及未塌陷等 6 类区域为研究对象,主要用地方式为旱地.

1.2 样品采集与处理

采用网格布点法采集土壤样品.确定采样点后,首先去除地表的植被及杂物,采样深度 10 cm.并以此点为圆心,在半径约为 2 m 的圆周上选定 2 个采样点,各采集 1 kg 土样.将采集的 3 个土样充分混合,储存于自封袋中作为 1 个土壤样品.根据 6 种类型区复垦面积大小布点,共采集土壤样品 27 个.样品自然风干后,拣去其中的石块、植物根系及杂物,过 20 目尼龙筛网后,用玛瑙研钵磨碎,按照四分法分别过 60 目和 100 目尼龙筛网.

1.3 样品分析与质量控制

采用 Tessier 五步连续提取法进行形态分析,五步连续提取对应的形态依次为可交换态(F1)、碳酸盐结合态(F2)、铁锰氧化物结合态(F3)、有机结合态(F4)和残渣态(F5),方法参照文献[5].采用 ICP-OES 测定.为保证分析结果的可靠性,分析过程中加入国家土壤标准物质 GSS-3 进行质量控制,回收率为 77.32%—122.58%;每 4 个土壤样品随机挑选 1 个做平行样(重复 3 次),每批样品做空白样,结果符合质控要求.所用试剂均为优级纯、水为超纯水、器皿均在 10%硝酸中浸泡 24 h.

1.4 评价方法

综合考虑重金属含量、生态效应、环境效应与毒理学等影响,采用 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法(The potential ecological risk index)(RI),对徐州煤矿复垦区土壤重金属的潜在生态风险危害进行评价.其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i; C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i}; RI = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, E_r^i 为土壤中第 i 种重金属的潜在生态风险系数;RI 为土壤中多种重金属的综合潜在生态风险指数; C_f^i 为重金属 i 的富集系数; C_s^i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 为参照值,以江苏省土壤背景值为参照值; T_r^i 为重金属 i 的毒性系数,参照徐争启^[6]确定的 Zn=Mn=1、Cr=2、Ni=Cu=Pb=5.潜在生态风险系数与污染程度的关系见表 1.

表 1 潜在生态风险系数与污染程度的关系

Table 1 Relationship between potential ecological risk factor and pollution level	
E 与污染程度	
RI 与污染程度	
$E < 40$	轻微生态危害
$40 \leq E < 80$	中等生态危害
$80 \leq E < 160$	强生态危害
$160 \leq E < 320$	很强生态危害
$RI < 150$	轻微生态危害
$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$RI \geq 600$	很强生态危害

2 结果与讨论

2.1 复垦土壤重金属含量水平

徐州煤矿塌陷复垦区土壤中 Zn、Pb、Ni、Mn、Cu 和 Cr 的平均含量分别为 63.79、39.16、27.69、886.51、32.22 mg·kg⁻¹和 43.57 mg·kg⁻¹,仅 Cr 平均含量小于土壤背景值,其他 5 种元素的平均含量均大于当地背景值,Mn 和 Pb 超土壤背景值 0.51、0.49 倍,Mn100%超标.与塌陷未复垦土壤相比,除 Cr 外,其余 5 种元素的平均值均高于未复垦土壤重金属的含量.与未塌陷对照土样相比,则表现出与当地背景值不同的情况,除 Pb 外,其余 5 种元素的平均值均高于未塌陷土壤重金属的含量.与国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中二级标准相比,所有元素均未超过规定限值.王莹^[7]等报道以煤矸石充填复垦的徐州柳新煤矿复垦区土壤中 Zn、Pb、Cu 和 Cr 的平均含量分别为 178.58、59.32、82.07、99.72 mg·kg⁻¹,均高于本复垦区土壤重金属含量.主要是由于两地所采用的复垦方式不同所致,采用煤矸石充填复垦,煤矸石中的重金属缓慢地向土壤中迁移,导致重金属积累.而本研究区采用的是混推复垦方式,一定程度上避免了煤矸石中重金属在土壤中的累积.

该复垦区土壤 6 种重金属变异系数的大小排序为 Cr>Zn>Cu>Pb>Ni>Mn(表 2),最大的 Cr 达到 34.21%,表明其受外来干扰较大,在空间分布上差异较明显.而其余 5 种重金属的变异系数相对较小,在 15.86%—26.74%之间,表明其在土壤中的分布较均匀.

表 2 复垦土壤重金属含量状况(mg·kg⁻¹)
Table 2 Concentrations of heavy metals in the reclaimed soil (mg·kg⁻¹)

元素	Zn	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr
含量范围	29.89—85.94	24.09—53.08	19.17—38.79	594.28—1118.20	21.01—58.91	20.62—65.67
平均值	63.79	39.16	27.69	886.51	32.22	43.57
变异系数(%)	26.74	22.72	19.25	15.86	24.54	34.21
塌陷未复垦	63.08	28.83	26.91	548.83	28.29	51.57
未塌陷	42.20	45.32	20.31	635.43	9.05	18.33
江苏省背景值 ^[8]	62.60	26.20	26.70	585.00	22.30	77.80
二级标准	300	350	60	—	100	350

不同复垦年限下土壤中 Zn、Ni 和 Mn 含量差异较大,Pb 和 Cu 含量差异相对较小(表 3).其中,Ni 的含量1987 年复垦土壤中最 高为 29.49 mg·kg⁻¹,1997 年复垦土壤中 Zn、Pb 和 Mn 的含量最高,分别为 71.24、45.72 mg·kg⁻¹和 985.41 mg·kg⁻¹.各复垦年限下土壤 Cr 的含量均未超过当地背景值.

表 3 不同复垦年限下土壤重金属含量状况(mg·kg⁻¹)
Table 3 Heavy metal concentrations in the reclaimed soil of different reclamation years (mg·kg⁻¹)

复垦年份		Zn	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr
1987(<i>n</i> =3)	含量范围	62.52—85.94	34.98—35.66	27.58—30.87	888.85—974.22	28.70—32.78	32.11—47.20
	平均值	70.60	35.29	29.49	942.17	30.50	39.29
1997(<i>n</i> =9)	含量范围	59.84—82.83	36.86—53.08	19.17—38.79	895.25—1118.20	29.89—58.91	25.39—65.67
	平均值	71.24	45.72	28.49	985.41	35.45	42.93
2006(<i>n</i> =3)	含量范围	47.88—77.90	30.28—34.26	27.78—29.29	724.45—881.74	31.21—43.32	48.72—61.38
	平均值	65.34	32.47	28.78	793.60	35.63	53.34
2010(<i>n</i> =6)	含量范围	29.89—75.97	24.09—44.90	21.24—30.62	594.28—911.16	21.01—34.18	20.62—62.66
	平均值	48.43	34.58	25.05	756.78	26.54	41.79
塌陷未复垦 (<i>n</i> =3)	含量范围	56.33—70.13	26.27—30.37	25.99—28.69	467.72—598.99	27.44—29.11	45.12—63.72
	平均值	63.08	28.83	26.91	548.83	28.29	51.57
未塌陷(<i>n</i> =3)	含量范围	33.52—51.86	44.63—46.18	19.42—20.79	569.58—705.01	7.77—11.15	17.54—19.19
	平均值	42.20	45.32	20.31	635.43	9.05	18.33

总体来看,1987 年和 1997 年复垦土壤中各元素的含量相对较高,2006 年复垦土壤中 Cu、Cr 含量较高,2010 年复垦土壤中各元素的含量均较低.由于采样区的耕作模式为稻麦轮作,土壤的耕作强度和人为干扰大,化肥、除草剂和杀虫剂的使用种类较多,导致重金属含量的差异.1987 年复垦土壤经长时间迁移转化,各元素含量已趋于稳定,而 2010 年复垦土壤中元素的富集程度和富集时间要低于前期复垦土壤.不同复垦年限下土壤重金属的含量差异较大,与其复垦方式、充填对象和人类活动等因素有关.Zn、Mn 是作物生长所必须元素,由于施肥的影响,总体上随复垦年限越长,积累越明显.

2.2 复垦土壤重金属形态分布

徐州煤矿复垦区不同复垦年限下土壤重金属形态分布如图 1 所示.除 Mn 外,Zn、Pb、Ni、Cu 和 Cr 的可交换态在各复垦区均未检出.Zn、Cu、Cr 的形态分布特征大体相同,主要以残渣态为主,1987 年复垦、1997 年复垦、2006 年复垦、2010 年复垦和塌陷未复垦区土壤中 Zn、Cu 均以残渣态为主,各形态占总量的大小依次为 F5>F3>F4>F2>F1;而未塌陷区土壤中 Zn、Cu、Cr 则以铁锰氧化物结合态为主,Zn、Cr 不同形态占总量的大小依次为 F3>F5>F4>F2>F1,Cu 各形态占总量的大小依次为 F3>F5>F2>F4>F1.其中 1987 年复垦区土壤中 Cr 的碳酸盐结合态未检出;重金属残渣态不容易在环境中迁移转化,残渣态结合的重金属主要受矿物成分及岩石风化和土壤侵蚀的影响^[9].

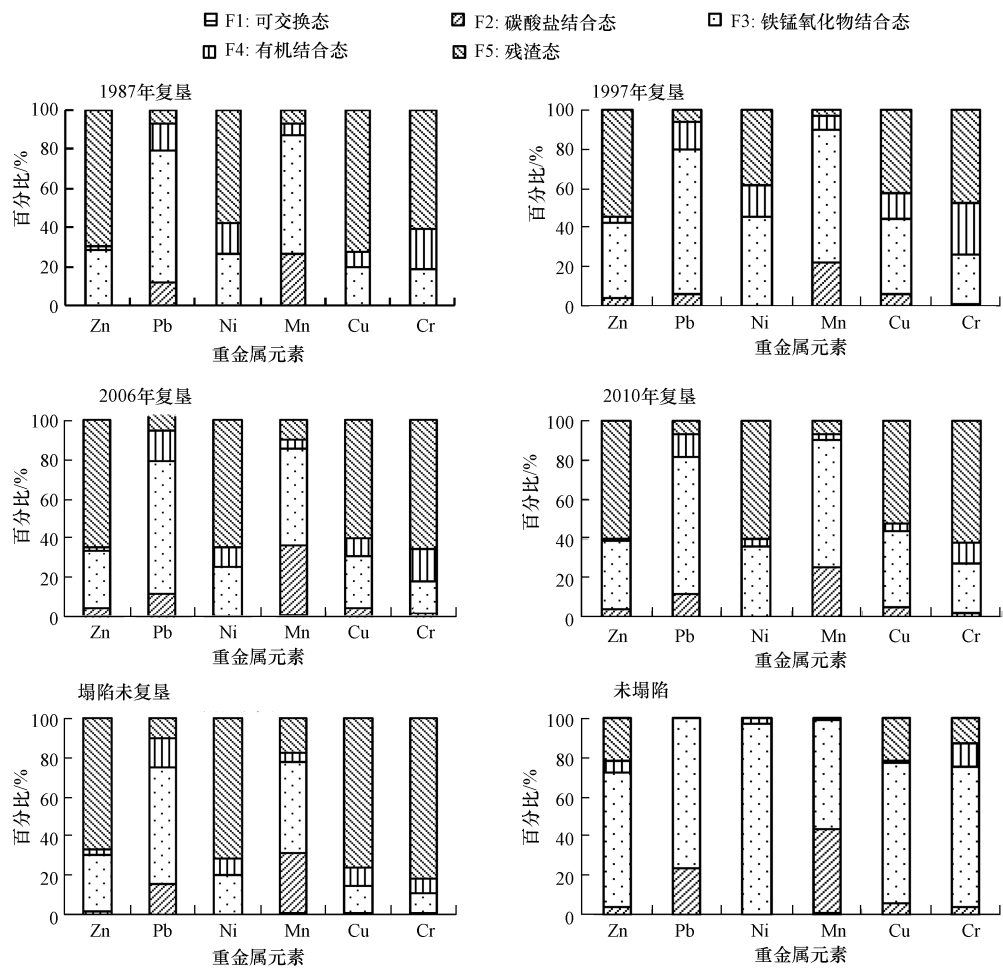


图 1 重金属形态分布图

Fig.1 Speciation distribution of heavy metals under different reclamation years

Pb 主要是以铁锰氧化态为主,4 种复垦区中各形态大小大致相同,2010 年复垦和未塌陷区土壤中 Pb 各形态占总量的大小依次为 F3>F2>F4>F5>F1;1987 年复垦、1997 年复垦、2006 年复垦和塌陷未复垦区土壤中各形态所占总量的大小依次为 F3>F4>F2>F5>F1.Pb 的铁锰氧化物结合态含量较高,是由于 Pb 易与铁锰氧化物形成稳定的螯(络)合物,一旦土壤 pH 下降,该区土壤 Pb 的潜在环境危害将增大.

Ni 主要以铁锰氧化物结合态和残渣态为主,1987 年复垦、1997 年复垦、2006 年复垦、2010 年复垦和塌陷未复垦区土壤中 Ni 各形态所占总量的大小依次为 F5>F3>F4.而未塌陷区铁锰氧化物结合态占总量质量分数的 97.00%,有机结合态所占比例为 3.00%.Ni 的可交换态和碳酸盐结合态均未检出,目前的碱性土壤使铁锰氧化物结合态不容易活化,土壤中 Ni 的生物有效性低,一旦土壤 pH 下降,Ni 很容易从土壤中活化出来,对环境和人体健康造成危害.

Mn 主要以铁锰氧化物结合态和碳酸盐结合态为主,未塌陷地、1997 年复垦、2010 年复垦、1987 年复垦、2006 年复垦、塌陷未复垦等 6 类土壤中这两种形态占总形态比例分别为 96.57%、89.70%、89.43%、86.86%、84.70%、77.12%.铁锰氧化物结合态和碳酸盐结合态对 pH 较敏感,在土壤 pH 减小的情况下,容易释放,对环境和人体健康构成潜在危害^[10],造成二次污染.因此,土壤中 Mn 的生物有效性相对较高,对环境和人体健康的潜在危害较高.

重金属的形态分布与 pH 值密切相关,在碱性条件下,土壤重金属往往形成难溶性化合物.徐州煤矿复垦区土壤 pH 值的范围为 7.02—8.09.大部分元素的可交换态和碳酸盐结合态的含量相对较小,而铁锰氧化物结合态重金属在还原和酸性条件下能够被活化,因此,徐州煤矿复垦区土壤中 Mn 和 Pb 的潜在环境危害较强,而 Zn、Ni、Cu 和 Cr 的潜在环境危害较低.

重金属的生物有效性指重金属能被生物吸收或对生物产生毒性的性状,可由间接的毒性数据或生物体浓度数据评价.通常用生物可利用系数 (Bioavailability factor,简称 BF) 来评价生物有效性,具体计算公式为^[11]:

$$BF = \frac{F_1 + F_2}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5}$$

式中,BF 为重金属的生物可利用系数;F1—F5 同 1.3 节所述,分别表示重金属的 5 种形态.

徐州煤矿复垦区土壤重金属的生物可利用系数见图 2,平均值大小为 Mn>Pb>Cu>Zn>Cr.Ni 的可交换态和碳酸盐结合态未检出,未计算其生物可利用系数.5 种元素中,Mn 的 BF 最大,平均为 0.31.1987 年复垦、1997 年复垦、2006 年复垦、2010 年复垦土壤中重金属的平均 BF 值分别为 0.10、0.08、0.12、0.10.不同复垦年限下土壤重金属的生物可利用系数差异较大,2006 年复垦土壤的 BF 值最大,对环境和人体健康的危害最大.

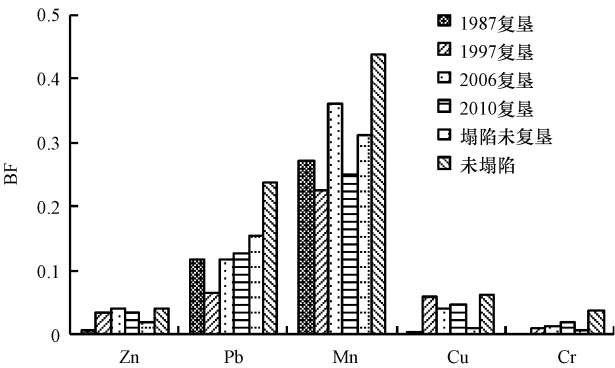


图 2 生物可利用系数分布图

Fig.2 Bioavailability factor of the heavy metals under different reclamation years

2.3 复垦区土壤重金属元素的相关性分析

徐州煤矿复垦区土壤重金属之间的相关性分析表明,Zn-Ni、Zn-Cu、Ni-Cr、Zn-Cr 之间呈极显著正相关,Pb-Cr 之间呈极显著负相关,Mn-Cu、Cu-Cr 之间呈显著正相关(表 4).表明该复垦区土壤重金属存在共同来源.Ni 和 Mn 主要来源于当地的成土母质^[12].Pb 一般来源于汽车尾气和农药的使用^[13],本研究区位于农村,车流量较小,Pb 污染应主要来源于农药的使用.冶炼和矿山开采导致包括 Zn 在内的重金属在土壤环境中积累^[14].稻田土壤可能会施用 Zn 肥和含 Zn 农药,导致土壤中 Zn 含量升高.禽畜粪便等被认为是土壤 Zn 的良好补给源,其 Zn 含量为 100—207 mg·kg⁻¹,长期施用有机肥可使土壤 Zn 提高 5%—30%^[15].

表 4 土壤重金属元素的相关性分析($n=27$)

Table 4 Correlation analysis of heavy metals in the tested soil

	Zn	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr
Zn	1.000					
Pb	-0.128	1.000				
Ni	0.568**	-0.147	1.000			
Mn	0.181	0.640**	0.266	1.000		
Cu	0.685**	-0.082	0.378	0.400*	1.000	
Cr	0.552**	-0.492**	0.723**	-0.068	0.397*	1.000

注：* 表示相关性在 0.05 水平显著；** 表示相关性在 0.01 水平显著。

2.4 徐州不同复垦年限复垦土壤重金属污染评价

徐州煤矿复垦区土壤中 6 种重金属的富集系数在 0.24—1.75 之间,各元素的平均值大小为 Pb(1.41)>Mn(1.33)>Cu(1.24)>Ni(0.99)>Zn(0.96)>Cr(0.53)。Pb 污染程度最高,是最主要的污染元素。各复垦年限下土壤各重金属的潜在生态风险系数平均值远小于 40,大小顺序为 Pb(7.07)>Cu(6.18)>Ni(4.96)>Mn(1.33)>Cr(1.06)>Zn(0.96),均属于轻微生态危害。Pb 的平均潜在生态风险最大。1987 年复垦、2006 年复垦和塌陷未复垦区中潜在生态风险系数最大的为 Cu;1997 年复垦、2010 年复垦和未塌陷区潜在生态风险系数最大的为 Pb。

徐州煤矿复垦区土壤重金属的综合潜在生态风险指数范围为 16.71—25.94,平均 21.56,远小于 150,属于轻微生态危害。不同复垦年限下土壤重金属的综合潜在生态风险指数大小为 1997 年复垦(25.94)>2006 年复垦(23.34)>1987 年复垦(22.84)>2010 年复垦(20.38)>塌陷未复垦(20.16)>未塌陷(16.71),均属于轻微生态风险。

表 5 徐州煤矿复垦区土壤重金属潜在生态风险指数

Table 5 Potential ecological risk index of heavy metals in reclamation soil of Xuzhou coal mine district

复垦 年限	重金属富集系数(C)						潜在生态风险系数(E)						RI	风险 等级
	Zn	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr	Zn	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr		
1987 年	1.13	1.35	1.10	1.61	1.37	0.51	1.13	6.73	5.52	1.61	6.84	1.01	22.84	轻微
1997 年	1.14	1.75	1.07	1.68	1.59	0.55	1.14	8.73	5.34	1.68	7.95	1.10	25.94	轻微
2006 年	1.04	1.24	1.08	1.36	1.60	0.69	1.04	6.20	5.39	1.36	7.99	1.37	23.34	轻微
2010 年	0.77	1.32	0.94	1.29	1.19	0.54	0.77	6.60	4.69	1.29	5.95	1.07	20.38	轻微
未复垦	1.01	1.10	1.01	0.94	1.27	0.66	1.01	5.50	5.04	0.94	6.34	1.33	20.16	轻微
未塌陷	0.67	1.73	0.76	1.09	0.41	0.24	0.67	8.65	3.80	1.09	2.03	0.47	16.71	轻微
平均值	0.96	1.41	0.99	1.33	1.24	0.53	0.96	7.07	4.96	1.33	6.18	1.06	21.56	轻微

徐州煤矿复垦区土壤中各重金属的潜在生态风险程度大小 Pb>Cu>Ni>Mn>Cr>Zn,与其生物可利用系数的平均值大小 Mn>Pb>Cu>Zn>Cr>Ni 并不相同,主要是由于评价标准和评价侧重点不同,潜在生态风险指数法基于重金属全量,以当地土壤背景值为参照,反映总体污染情况;而生物可利用系数则是基于形态,侧重于可被植物吸收利用的可交换态和碳酸盐结合态,表现出对生物的风险和危害。同时,由于 Pb、Cu 和 Ni 的毒性系数相对较大均为 5,而 Mn 和 Zn 的毒性系数为 1,从而导致最后评价结果的不同。

3 结论

(1) 徐州煤矿塌陷复垦区土壤中 Zn、Pb、Ni、Mn、Cu 和 Cr 的平均含量分别为 63.79、39.16、27.69、886.51、32.22、43.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅 Cr 平均含量小于当地背景值,其余 5 元素的平均含量均大于当地背景值,Mn 的超标率 100%。与塌陷未复垦土壤相比,除 Cr 外,其余 5 元素的平均值均高于塌陷未复垦土壤重金属含量。与国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中二级标准相比,所有元素均未超过规定限

值.不同复垦年限下土壤重金属含量存在一定差异.Zn、Mn 总体上随复垦年限延长,积累越明显.

(2)徐州煤矿复垦区土壤中 Pb 和 Mn 主要以铁锰氧化物结合态为主;Zn、Ni、Cu 和 Cr 主要以残渣态为主.表明复垦土壤受人为活动的干扰相对较小,自然来源是影响其含量的主要因素.土壤重金属的生物可利用系数的平均值大小为 Mn>Pb>Cu>Zn>Cr>Ni.Mn 的 BF 值最大,其平均值为 0.31.不同复垦年限下土壤重金属各形态之间的差异相对较小.

(3)复垦区土壤中 6 种重金属的富集系数在 0.24—1.75 之间.各复垦年限下 6 种重金属的潜在生态风险系数大小为 Pb(7.07)>Cu(6.18)>Ni(4.96)>Mn(1.33)>Cr(1.06)>Zn(0.96),远小于 40,均属于轻微生态危害.不同复垦年限下土壤重金属的综合潜在生态风险指数大小为 1997 年复垦(25.94)>2006 年复垦(23.34)>1987 年复垦(22.84)>2010 年复垦(20.38)>塌陷未复垦(20.16)>未塌陷(16.71),均属于轻微生态风险.

参 考 文 献

[1] Dennis SchlöMer, Kevin Nix. Wheat yield, plant nutrients and physical properties of soil deposits on fly ash and coal gangue used for land reclamation in the coal mining area of Huainan, China[D]. Germany: Osnabrueck University of Applied Science, 2011

[2] 徐良骥,黄璨,章如芹,等.煤矸石充填复垦地理化特性与重金属分布特征[J].农业工程学报,2014,30(5):211-219

[3] 张俊,李余生,孟雷,等.芦岭煤矿区土壤重金属元素地球化学特征及来源分析[J].环境化学,2014,33(11):2001-2003

[4] 江培龙,方凤满,张杰琼,等.淮南煤矿复垦区土壤重金属形态分布及污染评价[J].水土保持学报,2013,27(5):178-182

[5] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical chemistry,1979,51(7):844-850

[6] 徐争启,倪师军,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

[7] 王莹,董霁红.徐州矿区充填复垦地重金属污染的潜在生态风险评价[J].煤炭学报,2009,34(5):650-655

[8] 中国环境监测总站,北京大学,中国科学院沈阳土壤生态所.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990

[9] 高彦鑫,冯金国,唐磊,等.密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J].环境科学,2012,33(5):1707-1717

[10] 陈岩,季宏兵,朱先芳,等.北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2142-2151

[11] Narwal R P, Singh B R. Effect of organic materials on partitioning, extraetability and plant up take of metals in an alum shale soil[J]. Water, Air, Soil Pollution,1998,103:405-421

[12] Chen M, Ma L, Harris W G. Baseline concentrations of 15 trace elements in Florida surface soils[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28(4):1173-1181

[13] Merry R H, Tiller K G, Alston A M. Accumulation of copper, lead and arsenic in some Australian orchard soils[J].Australia Journal of Soil Research, 1983, 21: 549-561

[14] 杨元根,刘丛强,张国平,等.铅锌矿山开发导致的重金属在环境介质中的积累[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(4):305-309

[15] 高明,车福才,魏朝富,等.长期施用有机肥对紫色水稻土铁锰铜锌形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2000,6(1):11-17