

复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价

樊文华¹, 白中科^{2*}, 李慧峰^{1,3}, 乔俊耀¹, 许建伟¹, 李霞¹

(1. 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801; 2. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083;
3. 咸阳师范学院继续教育学院, 咸阳 712000)

摘要:为揭示矿区复垦土壤中重金属元素潜在的污染特征, 采用 Hakanson 潜在生态风险指数(The Potential Ecological Risk Index), 对安太堡露天煤矿复垦土壤中 Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, As 等 6 种污染元素进行了分析, 研究了露天煤矿复垦土壤重金属污染程度及潜在的生态危害性。结果表明: 安太堡露天煤矿不同复垦时间和复垦模式下不同层次的复垦土壤的综合污染程度范围为 8.29~16.90, 平均值为 10.72, 处于中等的污染程度。重金属潜在风险指数在 131.43~331.03 之间, 平均 191.68, 生态风险达到了中等程度, 特别是复垦 13 年的南排 1 420 退化平台, 综合潜在生态风险指数为 331.03, 达到了较高程度。0~40 cm 土层的潜在生态风险综合评价属于中度的潜在生态风险。Hg 是主要的污染因子, 其对潜在的生态风险指数所贡献的比例达到了 72.5%~84.62%。其余重金属的生态风险较低。因此, 在安太堡露天煤矿复垦土壤中, Hg 是最主要的潜在污染因子, 应采取一定的措施, 防止 Hg 的污染。应用该体系对复垦土壤重金属污染生态风险评价所得的结论同其它研究结果互为补充和借鉴。

关键词: 复垦土壤, 重金属, 评价, 潜在生态风险评价

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.01.056

中图分类号: TD88; X53

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-01-0348-07

樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 348-354.

Fan Wenhua, Bai Zhongke, Li Huifeng, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 348-354. (in Chinese with English abstract)

0 引言

保持矿业废弃地土壤稳定性的关键因素在于土壤的质量。在矿山土地复垦研究中, 土壤质量评价是其研究工作的主要内容之一, 且涉及到的评价指标很多, 重金属含量就是其中之一。目前对煤矿塌陷地粉煤灰、煤矸石充填复垦土壤^[1-6]、泥浆泵复垦土壤^[7]以及废弃地矿区污染场重金属污染及其潜在生态风险^[8]研究的较多。对露天煤矿复垦土壤的重金属污染研究较少, 秦俊梅等对安太堡露天煤矿南排土场复垦土壤的重金属污染剖面变化特征进行了研究^[9], 而对露天煤矿复垦土壤的重金属污染潜在生态风险评价研究还未见报道。在露天开采过程中, 露天煤矿各层岩土的被采与堆倒由于受开采成本及工艺的限制, 常常是无次序的混排, 形成所谓的“矿山土”(mine soil), 这完全改变了原有的自然土壤的层次结构, 给更新植被和种植利用带来了很大困难。另外, 上覆岩层和煤矸石中往往含有有害的重金属元素, 将这些岩土

堆垫到地表, 从而造成土壤污染, 影响植物的生存, 这些有毒有害物质如果随径流扩散, 还将污染更大范围的土壤^[10]。其中毒性最大的是 Cd、Pb、Hg、As, 它们不但不能被生物降解, 相反, 却能在生物作用下放大, 大量富集, 沿食物链最后进入人体, 引起急性、慢性中毒, 甚至能够致癌、致畸、致死^[11]。

因此, 进行矿山土壤环境及相关问题的研究, 对科学合理修复矿区受损的生态系统, 确保矿区的生产安全、粮食安全、生态安全、人居安全意义重大, 矿区土壤环境问题及其生态修复已成为中国目前环境污染领域的研究热点问题之一^[12]。本文就平朔安太堡露天煤矿复垦土壤重金属污染现状及其潜在生态风险进行评价, 揭示复垦土壤重金属污染潜在的变化特征, 为进一步改进土壤重构工艺, 防止复垦土壤污染和科学合理地利用复垦土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品的采集与处理

目前安太堡露天煤矿岩土排弃已形成了 4 座相对高度 45~190 m 的外排土场(内排、南排、西排、西排扩大区); 其中南排土场有 4 个台阶(分别为海拔 1 360、1 380、1 420、1 450 m), 是安太堡露天矿复垦时间最长、复垦模式最多的排土场。这 4 个排土场自然地理条件相同, 而复垦时间与复垦模式不尽相同。本文根据这 4 个排土场的土地复垦时间以及复垦初期的主要植被配置模式选择了 13 个典型复垦样地, 每个样地的面积约为

收稿日期: 2010-05-15 修订日期: 2010-11-05

基金项目: 教育部高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(706011)及“十一五”国家科技支撑计划重点项目专题(2006BAC09B02-6)

作者简介: 樊文华(1962-), 男, 河北省井陘县人, 教授, 博士研究生, 主要从事土壤生态和土壤质量的研究工作。太谷 山西农业大学资源环境学院, 030801。Email: FWH012@163.com

*通信作者: 白中科, 男, 山西省运城市人, 教授, 博士, 博士生导师, 农业工程学会会员(E041200374S)。主要从事土地整理复垦与生态恢复、环境影响评价的研究工作。北京 中国地质大学土地科学技术学院, 100083。Email: baizk@cugb.edu.cn

1 hm²。在每个样地分别按 0~20 cm、>20~40 cm 两个层次多点采集土样，土样混合后经风干、去杂、过筛后供重金属元素的测定。另外选择南排土场附近未破坏的原地貌土壤作为对比。各样地概况见表 1。

1.2 测定方法

土壤中 As 的测定用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法^[13]；Hg 的测定冷原子吸收分光光度法^[14]；Cr 的测定用火焰原子吸收分光光度法^[15]；Cu 的测定用火焰原子吸收分光光度法^[16]；Pb、Cd 的测定用 KI-MIBK 萃取火焰原子吸收分光光度法^[17]。供试土壤样本的各重金属质量分数见表 2。

表 1 土样采样地情况
Table 1 Conditions of sample plots

样地编号	样地名称	复垦年限/a	质地	复垦植被类型
1	内排 1405 平台	1	砂壤土	沙打旺
2	内排上 1435 平台	3	轻壤土	沙棘×刺槐×柠条
3	西扩 1490 平台	4	轻壤土	苜蓿×沙打旺
4	内排下 1435 平台	5	轻壤土	沙棘
5	内排 1420 平台	7	砂壤土	沙棘×沙枣×紫穗槐
6	西扩 1430 平台	7	砂壤土	沙枣×刺槐×柠条
7	西排 1520 平台	10	砂壤土	沙棘
8	南排 1380 平台	13	轻壤土	刺槐×油松×榆树
9	南排 1450 平台	13	土石混排	冰草×刺槐×柠条
10	南排 1450 斜坡	13	轻壤土	刺槐×油松
11	南排 1420 正常平台	13	轻壤土	刺槐×柠条
12	南排 1420 自然退化平台	13	轻壤土	刺槐×柠条
13	西排 1460 平台	13	砂壤土	云杉×油松×落叶松
14	原地貌	-	砂壤土	云杉

注：表 1 中样地名称栏中的数字（如 1380，1420）表示排土场平台的海拔高度；复垦植被指的是复垦初期的植被配置。南排 1420 退化平台由于煤矸石出露地表而发生大规模的自然现象，现在植被只留下呈斑块状分布的虎尾草(*Chloris virgate*)。

表 2 复垦土壤重金属分析结果
Table 2 Analyzing results of heavy metals in reclaimed soil

样地编号	复垦年限/a	层次/cm	重金属元素质量分数/(mg·kg ⁻¹)					
			Cd	As	Pb	Hg	Cu	Cr
1	1	0~20	0.087	7.19	17.75	0.113	29.18	50.05
		>20-40	0.070	8.90	20.30	0.074	28.63	51.85
2	3	0-20	0.092	15.19	14.9	0.106	37.68	64.50
		>20-40	0.086	9.48	14.82	0.054	31.87	61.77
3	4	0-20	0.108	7.91	6.90	0.092	35.93	48.98
		>20-40	0.104	7.54	16.80	0.102	30.15	49.63
4	5	0-20	0.092	7.35	14.07	0.096	26.73	46.58
		>20-40	0.087	8.28	7.18	0.073	24.27	44.97
5	7	0-20	0.079	9.48	10.05	0.07	22.62	58.48
		>20-40	0.088	6.24	11.80	0.081	23.75	59.55
6	7	0-20	0.112	10.19	21.23	0.079	35.28	58.88
		>20-40	0.081	11.39	19.65	0.075	26.15	63.08
7	10	0-20	0.091	6.08	9.02	0.124	35.12	57.35
		>20-40	0.078	9.39	16.27	0.089	31.78	62.70
8	13	0-20	0.093	11.50	11.70	0.091	37.05	60.58
		>20-40	0.073	8.34	7.80	0.080	34.53	58.80
9	13	0-20	0.077	7.10	14.10	0.059	29.15	47.70
		>20-40	0.083	9.77	8.00	0.092	30.63	47.48
10	13	0-20	0.069	7.39	18.95	0.089	30.10	63.20
		>20-40	0.083	10.02	8.50	0.137	32.52	73.92
11	13	0-20	0.106	8.76	16.02	0.078	28.13	49.55
		>20-40	0.080	8.93	18.58	0.134	29.03	67.63
12	13	0-20	0.077	8.02	24.70	0.175	27.50	99.45
		>20-40	0.125	7.36	9.20	0.089	27.95	48.70
13	13	0-20	0.078	9.66	12.60	0.074	30.63	66.28
		>20-40	0.089	8.79	12.15	0.076	29.87	52.77
14	原地貌	0-20	0.083	9.29	16.80	0.09	25.40	45.50
		>20-40	0.094	9.28	5.25	0.071	24.25	44.25
雁北土壤背景值			0.112	7.80	13.80	0.017	22.50	53.00
绿色食品土壤标准			0.4	20	50	0.35	60	120

2 结果与分析

2.1 复垦土壤重金属含量状况

由表 2 可以看出, 研究区土壤重金属 Cd 的质量分数范围在 0.069~0.125 mg/kg, 平均为 0.088 mg/kg, 超过土壤背景值的样品数只有 2 个; Pb 的质量分数范围在 6.9~24.7 mg/kg, 平均为 13.96 mg/kg, 超过土壤背景值的样品数有 15 个; Hg 的质量分数范围在 0.054~0.175 mg/kg, 平均为 0.092 mg/kg, 全部样品超过土壤背景值; As 的质量分数范围在 6.08~15.19 mg/kg, 平均为 8.86 mg/kg, 超过土壤背景值的样品数有 20 个; Cu 的质量分数范围在 22.62~37.68 mg/kg, 平均为 30.24 mg/kg, 全部样品超过土壤背景值; Cr 的质量分数范围在 44.97~99.45 mg/kg, 平均为 58.25 mg/kg, 超过土壤背景值的样品数有 15 个。而各污染元素的质量分数均小于绿色食品产地环境质量标准所规定的土壤浓度限值。

2.2 评价方法

本文采用瑞典科学家 Hakanson 的潜在生态风险指数法 (The Potential Ecological Risk Index), 对安太堡露天煤矿复垦土壤中重金属的潜在生态风险危害进行评价。这种方法不仅反映了某一特定环境中的全部污染物的影响, 而且通过潜在生态危害指数指出了那些应该特别注意的物质, 这对于污染的控制尤为重要^[18], 是目前此类研究中比较科学、全面的评价方法。其计算公式为:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i, \quad C_d = \sum_i C_f^i, \quad E_r^i = T_r^i C_f^i$$

$$RI = \sum_i E_r^i = \sum_i T_r^i C_f^i / C_n^i$$

式中, C_f^i 为某一重金属的污染系数, C_s^i 为不同土壤层次重金属 i 的实测值, C_n^i 为计算所需要的参照值; C_d 为重金属的综合污染程度 (the Degree of Contamination); T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数 (the Toxic Response Factor), 反映了其毒性水平和生物对其污染的敏感程度; E_r^i 为某单个重金属的潜在生态风险系数 (the Potential Ecological Risk Factor); RI 为综合潜在生态风险指数 (the Potential Ecological Risk Index)。 C_f^i , C_d , E_r^i 和 RI 值相对应的污染程度及潜在生态风险程度参照王莹^[5]、陈峰^[6]、贾振邦^[18]等, 见表 3。

表 3 污染程度及潜在生态风险程度

Table 3 Pollution degree and potential ecological risk

参数	污染程度及潜在生态风险程度			
C_f^i	<1	≥1, <3	≥3, <6	≥6
	低	中	较高	很高
C_d	<8	≥8, <16	≥16, <32	≥32
	低	中	较高	很高
E_r^i	<40	≥40, <80	≥80, <160	≥160, <320
	低	中	较高	高
RI	<150	≥150, <300	≥300, <600	≥600
	低	中	较高	很高

2.3 各参数的确定

1) 评价要素的确定。考虑到当地的污染特点和评价目的, 选取 6 种重金属元素作为评价因子, 即 Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, As。

2) 参照值的确定。目前各国学者对参照值的选择各不相同, 有的以页岩重金属平均含量值作为全球统一的沉积物重金属参照值; 有的以当地的沉积物重金属背景值为参照值; 有的以全球沉积物重金属的平均值为参照值。而 Hakanson 则提出以现代化工业前沉积物重金属的最高值为参照值^[18]。一些学者在研究塌陷地复垦土壤时, 采用了当地土壤背景值^[2-4,8]。为了更好地反映研究区复垦土壤重金属的污染情况, 本文选择了安太堡露天煤矿建矿时所在地平鲁县和朔县所属的山西省雁北地区土壤背景值^[19]作为参照值 (见表 2)。

3) 毒性响应系数的确定。金属毒性系数揭示了重金属对人体的危害和对水生生态系统的危害, 反映了其毒性水平和生物对其污染的敏感程度, 从 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数为评价依据, 同时参照文献^[2~4, 8]设定了 6 种重金属生物毒性系数, 即元素 Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, As 其毒性响应系数分别为 20、2、5、5、28 和 10。

2.4 复垦土壤污染程度及潜在的生态风险评价

由表 4 可知, 安太堡露天煤矿不同复垦时间和复垦模式下不同层次的复垦土壤的综合污染程度范围为 8.29~16.90, 平均值为 10.72, 处于中等的污染程度。各重金属污染系数平均值由高到低的顺序: Hg>Cu>As>Cr>Pb>Cd, Cd 的污染系数平均值为 0.79, 处于低的污染水平, Pb, Cu, Cr 和 As 元素的污染系数平均值基本在 1 左右, 处于中等污染水平, 而 Hg 的污染系数平均值为 5.38, 处于较高的污染水平, 不同地块的不同层次均在 3.0 以上, 有的地块达到了 6.0 以上, 特别是复垦 13 年的南排 1 450 斜坡、南排 1 420 正常平台 >20~40 cm 以及南排 1 420 退化平台 0~20 cm 土层 Hg 的污染系数分别为 8.06, 7.88 和 10.29, 处于很高的污染水平, 表明安太堡露天煤矿复垦土壤中的 Hg 污染尤为严重, 对综合污染程度贡献最大。对照地 0~20 cm 和 >20~40 cm 的综合污染程度分别为 10.43, 8.50, 处于中等的污染程度。

从表 4 还可以看出, 随着复垦年限的增加以及复垦植被类型的不同, 各重金属元素的污染系数没有一定的规律。这也说明复垦土壤的污染来源主要是复垦土壤母质本身的含量, 还有煤矸石自燃的影响。

表 5 为安太堡露天煤矿复垦土壤各重金属的潜在生态风险系数和生态风险指数。

考虑到不同土层中的重金属对环境的影响程度不同, 本研究采用权重法确定各土壤层次重金属污染的潜在生态风险, 以对整个研究土层受重金属污染状况进行综合评价。重金属潜在生态风险综合指数 P 的计算公式为:

$$P = \sum W_i P_i$$

式中, P 为潜在生态风险综合指数; W_i 为第 i 土层权重; P_i 为第 i 土层评价指标 (地积累指数或潜在生态风险指数)。

表 4 复垦土壤重金属的污染系数及综合污染程度
Table 4 Pollution indexes and integrated pollution extent of heavy metal in reclaimed soil

样地编号	层次/cm	污染系数 C_f^i						综合污染程度 C_d	污染等级
		Cd	As	Pb	Hg	Cu	Cr		
1	0~20	0.78	0.92	1.29	6.65	1.30	0.94	11.88	中
	>20~40	0.63	1.14	1.47	4.35	1.27	0.98	9.84	中
2	0~20	0.82	1.95	1.08	6.24	1.67	1.22	12.98	中
	>20~40	0.77	1.22	1.07	3.18	1.42	1.17	8.83	中
3	0~20	0.96	1.01	0.50	5.41	1.60	0.92	10.40	中
	>20~40	0.93	0.97	1.22	6.00	1.34	0.94	11.4	中
4	0~20	0.82	0.94	1.02	5.65	1.19	0.88	10.5	中
	>20~40	0.78	1.06	0.52	4.29	1.08	0.85	8.58	中
5	0~20	0.71	1.22	0.73	4.12	1.01	1.10	8.89	中
	>20~40	0.79	0.80	0.86	4.76	1.06	1.12	9.39	中
6	0~20	1.00	1.31	1.54	4.65	1.57	1.11	11.18	中
	>20~40	0.72	1.46	1.42	4.41	1.16	1.19	10.36	中
7	0~20	0.81	0.78	0.65	7.29	1.56	1.08	12.17	中
	>20~40	0.70	1.20	1.18	5.24	1.41	1.18	10.91	中
8	0~20	0.83	1.47	0.85	5.35	1.65	1.14	11.29	中
	>20~40	0.65	1.07	0.57	4.71	1.53	1.11	9.64	中
9	0~20	0.69	0.91	1.02	3.47	1.30	0.90	8.29	中
	>20~40	0.74	1.25	0.58	5.41	1.36	0.90	10.24	中
10	0~20	0.62	0.95	1.37	5.24	1.34	1.19	10.71	中
	>20~40	0.74	1.28	0.62	8.06	1.45	1.39	13.54	中
11	0~20	0.95	1.12	1.16	4.59	1.25	0.93	10.00	中
	>20~40	0.71	1.14	1.35	7.88	1.29	1.28	13.65	中
12	0~20	0.69	1.03	1.79	10.29	1.22	1.88	16.90	较高
	>20~40	1.12	0.94	0.67	5.24	1.24	0.92	10.13	中
13	0~20	0.70	1.24	0.91	4.35	1.36	1.25	9.81	中
	>20~40	0.79	1.13	0.88	4.47	1.33	1.00	9.60	中
14	0~20	0.74	1.19	1.22	5.29	1.13	0.86	10.43	中
	>20~40	0.84	1.19	0.38	4.18	1.08	0.83	8.50	中

土壤层次权重的确定是用杨秀红等^[2]所用的方法，即基于 Horn 开发的根活动区水的衰竭深度：

$$L_D = 0.152 \cdot \log \left[\frac{R + \sqrt{R^2 + 6.45}}{D + \sqrt{D^2 + 6.45}} \right]$$

式中， L_D 为深度在 D 处衰竭水值； D 为土深，cm； R 为总的根深，cm。

L_D 在 2 个深度的积分被认为反映了该深度区域上的土壤层权重。本研究采用了杨秀红等^[2]的做法，取总的根深 R 为 100 cm，据此得到 2 个土壤层次加权系数，0~20 cm 的 $W_i=0.6369$ ，>20~40 cm 的 $W_i=0.3631$ ，经计算后得出安太堡露天煤矿复垦土壤重金属生态风险综合评价结果，见表 5。

从表 5 可以看出，安太堡露天煤矿不同复垦年限和复垦模式不同土壤层次的重金属潜在风险指数在 131.43~331.03 之间，平均 191.68，生态风险达到了中等程度，特别是复垦 13 年的南排 1 420 退化平台，综合潜在生态风险指数为 331.03，达到了较高程度，其余的处于中、低程度。从复垦土壤单个污染要素来看，Hg 的潜在生态风险指数为 97.16~288.12，平均为 150.77，生态风险达到了较高程度，而其余重金属元素的潜在生态风险指数均 <40，为低污染程度。从总体污染程度上看，各污染物对生态风险影响程度从大到小的顺序为 $Hg > Cd > As > Cu > Pb > Cr$ 。

从表 5 还可以看出，不同复垦年限和不同复垦植被种植模式下复垦土壤 0~40 cm 土层的潜在生态风险综合评价均 150~300，属于中度的潜在生态风险。如果按杨秀红^[2]、李海霞^[8]所制定的标准，复垦 13 年的南排 1 420 退化平台复垦土壤的综合潜在生态风险指数为 279.8，在 240~480 这个范围，为重度生态风险危害，需要综合治理。另外，无论是复垦土壤还是对照地，Hg 是主要的污染因子，其潜在的生态风险指数所贡献的比例达到了 72.5%~84.62%。这一方面是由于复垦土壤中 Hg 含量较背景值高许多，另一方面与 Hg 具有较大的生物毒性系数有关。

表 5 复垦土壤重金属潜在生态风险评价结果
Table 5 Results of heavy metal ecological risk in reclaimed soil

样地编号	层次/cm	重金属潜在生态风险系数 E_r^i						生态风险指数 RI	风险等级	加权后生态风险指数 P	加权后风险等级
		Cd	As	Pb	Hg	Cu	Cr				
1	0~20	15.6	9.2	6.45	186.2	6.50	1.88	225.83	中	202.46	中等
	>20~40	12.6	11.4	7.35	121.8	6.35	1.96	161.46	中		
2	0~20	16.4	19.5	5.40	174.72	8.35	2.44	226.81	中	192.18	中等
	>20~40	15.4	12.2	5.35	89.04	7.10	2.34	131.43	低		
3	0~20	19.2	10.1	2.50	151.48	8.00	1.84	193.12	中	199.61	中等
	>20~40	18.6	9.7	6.10	168.0	6.70	1.88	210.98	中		
4	0~20	16.4	9.4	5.10	158.2	5.95	1.76	196.81	中	182.00	中等
	>20~40	15.6	10.6	2.60	120.12	5.40	1.70	156.02	中		
5	0~20	14.2	12.2	3.65	115.36	5.05	2.20	152.66	中	158.56	中等
	>20~40	15.8	8.0	4.30	133.28	5.30	2.24	168.92	中		
6	0~20	20.0	13.1	7.70	130.2	7.85	2.22	181.07	中	176.23	中等
	>20~40	14.4	14.6	7.10	123.48	5.80	2.38	167.76	中		

接上页

样地编号	层次/cm	重金属潜在生态风险系数 E_r^i						生态风险指数 RI	风险等级	加权后生态风险指数 P	加权后风险等级
		Cd	As	Pb	Hg	Cu	Cr				
7	0~20	16.2	7.8	3.25	204.12	7.80	2.16	241.33	中	221.97	中等
	>20~40	14.0	12.0	5.90	146.72	7.05	2.36	188.03	中		
8	0~20	16.6	14.7	4.25	149.8	8.25	2.28	195.88	中	185.87	中等
	>20~40	13.0	10.7	2.85	131.88	7.65	2.22	168.3	中		
9	0~20	13.8	9.1	5.10	97.16	6.50	1.80	133.46	低	154.09	中等
	>20~40	14.8	12.5	2.90	151.48	6.80	1.80	190.28	中		
10	0~20	12.4	9.5	6.85	146.72	6.70	2.38	184.55	中	214.27	中等
	>20~40	14.8	12.8	3.10	225.68	7.25	2.78	266.41	中		
11	0~20	19.0	11.2	5.80	128.52	6.25	1.86	172.63	中	205.08	中等
	>20~40	14.2	11.4	6.75	220.64	6.45	2.56	262.00	中		
12	0~20	13.8	10.3	8.95	288.12	6.10	3.76	331.03	较高	279.79	中等
	>20~40	22.4	9.4	3.35	146.72	6.20	1.84	189.91	中		
13	0~20	14.0	12.4	4.55	121.8	6.80	2.50	162.05	中	163.23	中等
	>20~40	15.8	11.3	4.40	125.16	6.65	2.00	165.31	中		
14	0~20	14.8	11.9	6.10	148.12	5.65	1.72	188.29	中	176.09	中等
	>20~40	16.8	11.9	1.90	117.04	5.40	1.66	154.70	中		

3 讨论

在土壤重金属污染评价中, 由于国家没有规定统一的标准, 对同一对象选用不同的标准, 如采用当地土壤背景值、国家土壤环境质量二级标准 (GB15618-1995) 作为评价标准, 会得出不同的结论。采用当地土壤背景值法进行判断时得出的结论重金属污染最为严重^[4]。安太堡露天煤矿复垦土壤重金属污染情况也是如此。如采用绿色食品产地的土壤环境质量作为评价标准, 安太堡露天煤矿复垦土壤中重金属均不超标, 这基本与秦俊梅的研究结果一致^[9]。特别是潜在生态风险指数高的 Hg, 其单项污染指数最高值为 0.500, 就出现在南排 1420 自然退化平台复垦土壤 0~20cm 处, 说明不存在 Hg 污染。而利用 Hakanson 的潜在生态风险指数法, 则风险指数在 131.43~331.03 之间, 平均 191.68, 生态风险达到了中等程度, Hg 成为主要的污染因子。这也正是利用 Hakanson 潜在生态风险指数法的特点, 即不仅反映了某一特定环境中的全部污染物的影响, 而且通过潜在生态风险指数指出了那些应该特别注意的物质, 这对于污染的控制尤为重要^[18]。

另外, 安太堡露天煤矿剥离剖面层组从表层到 25 m 是第四系的黄土, 55~70 m 属于第三系地层, 71 m 处属二叠系, 以下为石炭系, Hg 的质量分数比较高的是在 71~104 m 以及 140 m 岩土层, Hg 的质量分数在 0.205~0.570 mg/kg^[20], 在矿山土壤再造过程中, 应对可能构成 Hg 元素污染的废弃物料进行深层排弃包埋, 同时, 还应采取增加覆土厚度、增施有机肥等一系列措施, 避免造成 Hg 元素污染。为防止新的复垦地发生矸石自燃, 可采

用分层压实, 周边覆土的方法, 对现已自燃的地块, 可采用高压泵注入黄土泥浆和少量石灰浆灭火^[21]。

4 结论

利用 Hakanson 提出的潜在生态风险指数法 (RI), 对安太堡露天煤矿复垦土壤中重金属元素 Hg、Cd、Cu、As、Cr、Pb 的质量分数进行了分析, 得出了复垦土壤的污染程度和潜在的生态风险。

1) 安太堡露天煤矿不同复垦时间和复垦模式下不同层次复垦土壤的综合污染程度范围为 8.29~16.9, 平均值为 10.72, 处于中等的污染程度。从各要素的污染程度来看, Hg 的污染系数平均值为 5.38, 处于中等污染水平, 各重金属污染系数平均值由高到低的顺序: Hg>Cu>As>Cr>Pb>Cd。

2) 重金属潜在风险指数在 131.43~331.03 之间, 平均 191.68, 生态风险达到了中等程度, 特别是复垦 13 年的南排 1420 退化平台的复垦土壤, 其综合潜在生态风险指数为 331.03, 达到了较高程度。Hg 的潜在生态风险指数为 97.16~288.12, 平均为 150.77, 生态风险达到了较高程度。

3) 不同复垦年限和不同复垦植被下复垦土壤 0~40 cm 土层的潜在生态风险综合评价属于中度的潜在生态风险。Hg 是主要的污染因子, 其潜在的生态风险指数所贡献的比例达到了 72.5%~84.62%, 应引起高度重视, 积极采取措施, 减轻其潜在生态危害。

志谢: 在野外采样过程中, 安太堡露天矿柴书杰、陈建军, 平朔煤炭公司土地复垦部的贺振伟、尹建平给予了大力帮助, 谨表谢意。

[参 考 文 献]

- [1] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 214—218.
Hu Zhenqi, Qi Jinzhong, Si Jitao. Contamination and assessment of heavy metals in fly ash reclaimed soil[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 214—218. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨秀红, 胡振琪, 张学礼. 粉煤灰充填复垦土地风险评价及稳定化修复技术[J]. 科技导报, 2006, 24(3): 33—35.
Yang Xiuhong, Hu Zhenqi, Zhang Xueli. Risk assessment of reclaimed land filled with fly ash and stabilization remediation technology[J]. Science and Technology Review, 2006, 24(3): 33—35. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
Wang Ying, Dong Jihong. Potential ecological risk assessment of filling reclaimed soils polluted by heavy metals in mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(5): 650—655. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈峰, 胡振琪, 柏玉, 等. 矸石山周围土壤重金属污染的生态评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 575—578.
Chen Feng, Hu Zhenqi, Bai Yu, et al. Ecological risk assessment of soils polluted by heavy metals around coal wastes piles[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(S): 575—578. (in Chinese with English abstract)
- [5] 袁英贤, 丁少军, 李剑友, 等. 平顶山市煤矿矿区土地复垦煤灰充填后土壤的污染性分析[J]. 能源环境保护, 2007, 27(6): 640—645.
Yuan Yingxian, Ding Shaojun, Li Jianyou, et al. Contamination character analysis of filling reclaimed soil with fly ash in subsided land of Pingdingshan[J]. Energy Environmental Protection, 2007, 27(6): 640—645. (in Chinese with English abstract)
- [6] 董霁红, 卞正富, 王贺封. 矿山充填复垦场重金属含量对比研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 531—536.
Dong Jihong, Bian Zhengfu, Wang Hefeng. Comparison of heavy metal contents between different reclaimed soils and the control soil[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(4): 531—536. (in Chinese with English abstract)
- [7] 马文明, 郭鹏, 鲁春阳. 煤矿塌陷地泥浆泵复垦土壤质量评价[J]. 平顶山工学院学报, 2005, 14(5): 3—6.
Ma Wenming, Guo Peng, Lu Chunyang. Quality evaluation on re-cultivation soil in sunk coal mine Pingdingshan[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2005, 14(5): 3—6. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李海霞, 胡振琪, 李宁, 等. 淮南某废弃地矿区污染场重金属污染风险评价[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 423—426.
Li Haixia, Hu Zhenqi, Li Ning, et al. Integrate risk assessment of the heavy metal contamination in key regions of mining area in Huainan[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4): 423—426. (in Chinese with English abstract)
- [9] 秦俊梅, 白中科, 李俊杰, 等. 矿区复垦土壤环境质量剖面变化特征研究-以平朔露天矿区为例[J]. 山西农业大学学报, 2006, 26(1): 101—105.
Qin Junmei, Bai Zhongke, Li Junjie, et al. Research on change characteristic of environmental quality in reclaimed soil profile in mine area-taking pingshuo opencast mine as a example[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2006, 26(1): 101—105. (in Chinese with English abstract)
- [10] 胡振琪, 魏忠义. 煤矿区采动与复垦土壤存在的问题与对策[J]. 能源环境保护, 2003, 17(3): 3—7, 10.
- [11] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 等. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2144—2152.
Fan yinghong, Lu Zhaohua, Cheng Jianlong, et al. Major ecological and environmental problems and the ecological reconstruction technologies of the coal mining area in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(10): 2144—2152. (in Chinese with English abstract)
- [12] 白中科, 付梅臣, 赵中秋. 论矿区土壤环境问题[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1122—1125.
Bai Zhongke, Fu Meichen, Zhao Zhongqiu. On soil environmental problems in mining area[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(5): 1122—1125. (in Chinese with English abstract)
- [13] GB/T 17134-1997, 土壤质量总砷的测定二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法[S].
- [14] GB/T 17136-1997, 土壤质量总汞的测定冷原子吸收分光光度法[S].
- [15] GB/T 17137-1997, 土壤质量总铬的测定火焰原子吸收分光光度法[S].
- [16] GB/T 17138-1997, 土壤质量铜、锌的测定火焰原子吸收分光光度法[S].
- [17] GB/T 17140-1997, 土壤质量铅、镉的测定 KI-MIBK 萃取火焰原子吸收分光光度法[S].
- [18] 贾振邦, 梁涛, 林健枝, 等. 香港河流重金属污染及潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报, 1997, 33(4): 485—492.
Jia Zhenbang, Liang Tao. Study on heavy metal contamination and potential ecological risk in hong kong rivers[J]. Journal of Peking University, 1997, 33(4): 485—492. (in Chinese with English abstract)
- [19] 史崇文. 山西省土壤环境背景值[M]. 北京: 农业出版社, 1992, 95.
- [20] 李晋川, 白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建-平朔露天煤矿的研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 18—20.
- [21] 樊文华, 李慧峰, 白中科, 等. 黄土区大型露天煤矿煤矸石自燃对复垦土壤质量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 319—324.
Fan Wenhua, Li Hui Feng, Bai Zhongke, et al. Effects of gangue spontaneous combustion on reclaimed soil quality of large-scaled opencast mine in loess area[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 26(2): 319—324. (in Chinese with English abstract)

Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils

Fan Wenhua¹, Bai Zhongke^{2*}, Li Huifeng^{1,3}, Qiao Junyao¹, Xu Jianwei¹, Li Xia¹

(1. College of Resource and Environmental Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

2. School of Land Science and Technique, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. College of continued education, Xian Yang Normal University, Xianyang 712000, China)

Abstract: In order to research the potential pollution characteristics of heavy metals in reclaimed soil and to keep the ecological safety of the reclaimed soil, heavy metal elements Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr were quantitatively analyzed in the reclaimed soils at Antaibao opencast mine. The potential ecological risk and pollution degree of the heavy metals in reclaimed soil were evaluated using Hakanson ecological risk index. The results were summarized as follows: The entire research area was contaminated by Hg and Cu. The degree of contamination ranged from 8.29 to 16.90, with an average of 10.72, which was at medium level. The potential ecological risk index was between 131.43 and 331.03, most of them were at medium level; but the potential ecological risk index in 0~20cm layer of reclaimed soil of Southern 1420 deteriorated platform was 331.03, which was at higher level. The potential ecological risk indexes were at medium level in 0-40cm layer of reclaimed soil with different reclamation year and different reclamation patterns. Hg was the worst of the potential ecological risk genes in reclaimed soil at Antaibao opencast mine. Therefore, some measures should be adopted to control pollution of mercury. The results from this evaluation can be used as a complement reference to other study results.

Key words: reclaimed soil, heavy metals, estimation, potential ecological risk assessment