

铝矿复垦土壤重金属含量变化及污染风险评价

聂兴山

(山西省水土保持科学研究所, 山西 太原 030013)

摘要: [目的] 对孝义铝矿复垦区土壤重金属含量和污染状况进行研究, 为了解和评价矿区复垦土壤重金属污染风险提供科学依据。[方法] 采用 ICP-MS 测定土壤中 Cd, Cr, Cu, Pb, As, Ni 等 6 种重金属元素含量, 分析各含量随复垦年限的变化特征, 并用单因子标识指数和内梅罗综合标识指数法对重金属的污染程度进行评价。[结果] (1) Cd 含量均值为 5.19 mg/kg, 是国家二级标准 0.3 mg/kg 的约 10 倍, 其余 5 种元素含量均低于国家二级标准。随着复垦年限的延长, Cd 含量在 0—15 cm 土层处逐渐降低, 在 15—30 cm 土层处逐渐增加。(2) Cd 的单项因子污染指数在所有样点均达到 5 级严重污染水平, 其它元素均属清洁水平。内梅罗综合污染指数 12.08~13.14, 均值 12.43, 是 5 级重污染指数的 3~4 倍, 属严重污染水平。(3) 复垦用土中 6 种重金属含量均超过国家 2 级标准, 是复垦土地重金属主要的来源。[结论] 复垦区土壤由于复垦用土及后期的施肥和粉尘沉降等所致已被 Cd 污染, 在矿区复垦中, 应当严格控制复垦用土的质量。

关键词: 复垦; Cd; 重金属; 单因子标识指数; 内梅罗综合污染指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0321-06

中图分类号: X53

文献参数: 聂兴山. 铝矿复垦土壤重金属含量变化及污染风险评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 321-326. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.049; Nie Xingshan. Contents and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Reclaimed Soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 321-326. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.049

Contents and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Reclaimed Soil

NIE Xingshan

(Institute of Shanxi Soil and Water Conservation, Taiyuan, Shanxi 030045, China)

Abstract: [Objective] The contents and pollution state of heavy metals of soil in Xiaoyi bauxite mine of Shanxi Province were studied to provide scientific basis for the understanding and evaluating the risk of heavy metal pollution in reclaimed soil in mining area. [Methods] The contents of Cd, Cr, Cu, Pb, As and Ni by ICP-MS were measured, and their changes along different reclaimed years were analyzed. Single factor index and Nemerow comprehensive index methods were used to evaluate the potential pollution degree and risk. [Results] (1) The mean value of Cd was 5.19 mg/kg, exceeding the 0.3 mg/kg of national stand by 17 times. Other elements was not exceed the national stand and no pollution risk was observed. With the extension of reclamation time, the content of Cd increased at 0—15 cm and decreased at 15—30 cm layer. (2) The single pollution index of Cd is the highest of all sampling plots, was assessed at 5th level severe pollution. Other 5 elements are lower, and are at 1st degree of safe level. The Nemerow comprehensive index ranged from 12.08 to 13.14, with an average of 12.43, at severe pollution level, and it exceeds the 5th degree by 3~4 times. (3) Soil which was used to reclaim is the mainly pollution resource, the contents of 6 heavy metal elements exceeded the national stand. [Conclusion] The soil in reclamation area have been polluted by Cd sourced from reclaimed soil, manure and dust. When considering reclaimed mine, the quality of soil which will be used to reclaim should be protected strictly.

Keywords: reclamation; Cd; heavy metal; single factor index; Nemerow comprehensive pollution index

收稿日期: 2016-10-17

修回日期: 2016-10-24

资助项目: 山西省科技厅技术开发实验室建设项目“农业面源污染防治措施研究”(2016131)

第一作者: 聂兴山(1962—), 男(汉族), 山西省应县人, 大学专科, 高级工程师, 主要从事水土保持、生态修复方面的科研工作。E-mail: 13453424978@163.com。

随着社会经济的发展,人类对矿产资源的需求日趋提高,而矿产开发也导致了一系列严重的生态环境问题。例如,采矿地区地质地貌的破坏、水质的恶化、植被及物种多样性的丧失、土壤遭到重金属污染、水土流失和沙漠化等问题日益严重^[1-2],尤其是土壤重金属污染问题,已引起了国内外越来越多学者的关注^[3-7]。重金属作为持久性的潜在有毒污染物,一旦进入环境后,由于不能被生物降解而长期存在环境中,并通过富集作用不断积累,危及生物及生态安全^[8-13]。为了恢复矿区土壤的可耕性,通常采用覆土等方式对开采后的矿区进行复垦处理,因此对矿区复垦土地质量的研究具有现实必要性。对矿区复垦后土壤重金属的评价对矿区复垦方式、复垦后土地利用方式和管理具有现实的指导意义。本研究以山西省孝义铝矿废弃地覆土复垦土地为对象,以复垦不同年限土地土壤为材料,对不同复垦年限后土壤重金属污染含量和潜在风险进行了评价。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

孝义铝矿位于孝义市西部山区的阳泉曲镇西河底村(111°29'52"—111°27'12"E,37°07'44"—37°05'12"N),是中国目前最大的露天铝土矿,生产规模为 2.15×10^6 t/a,矿区总占地面积达 1 158.2 hm²。矿区开采后主要通过覆土的方式进行复垦,截止 2015 年底,通过覆土方式共复垦土地 422 hm²,其中已耕种 193 hm²,绿化 98 hm²。矿区位于黄土丘陵地区,属于典型的大陆性半干旱气候区,四季分明,春季多风,夏季炎热,秋季多雨,冬季寒冷干燥,年最高气温达 37 ℃,最低气温在 -20 ℃ 以下。降雨主要集中在 7—9 月,平均降雨量 529 mm。孝义铝矿复垦区主要分布在 5 个区,5 个区复垦时间不同,自然地理条件和复垦模式基本相同,复垦用土均为从附近运输来的离石黄土,具有同源性。根据 5 个复垦区的土地复垦

时间及复垦初期主要植被配置模式选择了 5 个典型复垦样地,每个样地的面积约 0.5 hm²。各样地概况详见表 1。

表 1 土壤采样地情况

样地编号	样地名称	复垦年限/a	土壤类型	土壤质地	复垦植被类型
1 [#]	2 期 3 [#]	2	离石黄土	砂壤土	核桃树
2 [#]	2 期 2 [#]	4	离石黄土	砂壤土	核桃树
3 [#]	2 期 1 [#]	6	离石黄土	轻壤土	玉米
4 [#]	1 期 2 [#]	8	离石黄土	轻壤土	玉米
5 [#]	1 期 1 [#]	10	离石黄土	轻壤土	玉米

1.2 土壤采样与处理

在 2015 年 4 月作物种植前在提前选好的样地进行样品采集。每个样地分别按 0—15 cm 和 15—30 cm 两个层次按照 S 形采样,样品采集后将同一样地同一深度的多点土样混匀,剔除土样中植物根系、石块和残渣,保存于冰盒带回实验室,自然风干,过 100 目筛,用四分法处理试验用样品,留存备用。

1.3 土壤重金属测定方法

土壤中 As 的测定用二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法,Cd,Cr,Cu,Pb 采用强酸消解电感耦合等离子体光谱仪(Thermo 6300)测定。文中重金属含量均为全量,数据为 3 次重复后均值,数据的计算采用 Excel 软件进行。

1.4 土壤重金属评价方法

单因子标识指数法是国内外采用较多的一种对土壤中某一污染物的污染程度进行评价的方法之一^[14],计算公式为:

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

式中: P_i ——污染物 i 的单因子污染指数; C_i ——污染物 i 的实测浓度(mg/kg); S_i ——污染物 i 的评价准(mg/kg)。

选用 GB15618-1995 土壤环境质量 2 级标准作为土壤污染的评价标准(表 2)。

表 2 土壤环境质量标准值

重金属	1 级标准		2 级标准		3 级标准
	pH 自然背景	pH < 6.5	6.5 ≤ pH ≤ 7.5	pH > 7.5	pH > 6.5
Cd	0.2	0.3	0.3	0.6	1
Cr	90	150	200	250	300
Cu	35	50	100	100	400
Pb	35	250	300	350	500
As	15	40	30	25	40
Ni	40	40	50	60	200

内梅罗综合污染指数法相比单因子标识指数法能较全面反映土壤中各污染物的平均污染水平, 突出了污染最严重的污染物给环境造成的危害^[15], 计算公式为:

$$P = \sqrt{(P_{j\max}^2 + P_{j\text{ave}}^2) / 2} \quad (2)$$

式中: P ——监测点的内梅罗综合污染指数; $P_{j\max}$ —— j 监测点污染物单因子污染指数中的最大值; $P_{j\text{ave}}$ —— j 监测点所有污染物单因子污染指数平均值。

根据单因子标识指数法和内梅罗综合污染指数法可将土壤重金属污染划分为 5 个等级(表 3)。

表 3 土壤重金属污染分级标准

等级	单因子污染指数	内梅罗综合污染指数	污染等级	污染水平
1	≤ 0.7	≤ 0.7	安全	清洁
2	$0.7 \sim \leq 1.0$	$0.7 \sim \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 \sim \leq 2.0$	$1.0 \sim \leq 2.0$	轻污染	轻度污染
4	$2.0 \sim \leq 3.0$	$2.0 \sim \leq 3.0$	中污染	中度污染
5	> 3.0	> 3.0	重污染	严重污染

2 结果与分析

2.1 不同年限复垦土壤重金属含量分析

图 1 为孝义铝矿复垦后不同年限 0—30 cm 土壤中各重金属的统计结果。由图 1 可知, 铝矿复垦区 0—15 cm 表层土壤 Cd 含量 5.04~5.27 mg/kg, 均值为 5.11 mg/kg; 15—30 cm Cd 含量 5.05~5.49 mg/kg, 均值为 5.27 mg/kg; 2 个分层土壤 Cd 含量均超过国家土壤环境质量 2 级标准 0.3 mg/kg 的 10 余倍, 对土壤形成较严重的污染。从含量变化来看, 0—15 cm 土壤 Cd 含量随着复垦时间的延长具有逐渐下降的趋势, 而 15—30 cm 土壤 Cd 随着复垦时间的延长呈逐渐升高趋势。铝矿复垦区 0—15 cm 表层土壤 Cr 含量 20.89~40 mg/kg, 均值为 33.78 mg/kg; 15—30 cm Cd 含量 38.08~54.88 mg/kg, 均值为 44.56 mg/kg; 2 个分层土壤 Cr 含量均未超过国家土壤环境质量二级标准 200 mg/kg 的阈值, 对土壤没有形成污染危害。从含量变化来看, 0—15 cm 土壤 Cr 含量有随着复垦时间的延长具有逐渐下降的趋势, 但下降速度较慢, 而 15—30 cm 土壤 Cr 随着复垦时间的延长呈逐渐升高趋势, 在复垦 6~10 a 后增加幅度比 2~6 a 快。铝矿复垦区 0—15 cm 表层土壤 Cu 含量 1.45~3.70 mg/kg, 均值为 2.64 mg/kg; 15—30 cm

Cu 含量 1.12~6.54 mg/kg, 均值为 3.67 mg/kg; 2 个分层土壤 Cu 含量均未超过国家土壤环境质量二级标准 100 mg/kg 的阈值, 对土壤没有形成污染危害。从含量变化来看, 0—15 cm 土壤 Cu 含量随着复垦时间的延长具有逐渐下降的趋势, 下降幅度比较均匀, 而 15—30 cm 土壤 Cu 随着复垦时间的延长呈波动变化, 其中在 2~6 a 间呈逐渐增加趋势, 6~10 a 呈逐渐下降趋势。铝矿复垦区 0—15 cm 表层土壤 Pb 含量在 44.86~110 mg/kg, 均值为 73.23 mg/kg; 15—30 cm Pb 含量在 38.23~89.66 mg/kg, 均值为 57.04 mg/kg; 两个分层土壤 Pb 含量均未超过国家土壤环境质量 2 级标准 300 mg/kg 的阈值, 对土壤没有形成污染危害。从含量变化来看, 0—15 cm 土壤 Pb 含量随着复垦时间的延长具有逐渐下降的趋势, 15—30 cm 土壤 Pb 随着复垦时间的延长呈逐渐升高趋势, 上升和下降幅度均较大。铝矿复垦区 0—15 cm 表层土壤 As 含量在 6.33~9.82 mg/kg, 均值为 8.26 mg/kg; 15—30 cm 土层土壤的 As 含量在 8.04~11.49 mg/kg, 均值为 9.01 mg/kg; 2 个分层土壤 As 含量均未超过国家土壤环境质量 2 级标准 30 mg/kg 的阈值, 对土壤没有形成污染危害。从含量变化来看, 0—15 cm 和 15—30 cm 这两个层次土壤 As 含量随着复垦时间的延长呈逐渐升高趋势, 增加速度相近。铝矿复垦区 0—15 cm 表层土壤 Ni 含量在 8.68~15.78 mg/kg, 均值为 12.19 mg/kg; 15—30 cm Ni 含量在 12.85~21.17 mg/kg 之间, 均值为 16.72 mg/kg; 两个分层土壤 Ni 含量均未超过国家土壤环境质量 2 级标准 50 mg/kg 的阈值, 对土壤没有形成污染危害。从含量变化来看, 0—15 cm 和 15—30 cm 这两个土层土壤 As 含量随着复垦时间的延长呈逐渐升高趋势, 增加速度相近。由以上分析可知, 孝义铝矿复垦后在 2~10 a 间, 0—15 cm 和 15—30 cm 两个土层 Cd, Cr, Cu, Pb, As 和 Ni 这 6 种重金属元素中只有 Cd 含量超过了国家土壤 2 级标准值受到了污染, 其余元素均未对土壤形成污染。

2.2 单因子标识指数法评价结果

表 4 为用单因子标识指数法对孝义铝矿复垦不同年限内土壤重金属的污染评价结果。由表 4 可知, 评价的 6 种重金属中只有 Cd 的污染指数 P_i 大于 3.0, 达到了 5 级重污染程度, 属于严重污染水平, 这与土壤中重金属含量的分析结果相一致。其余 5 种重金属的污染因子均小于 1 级污染 0.7 的标准, 属于安全清洁水平。从污染指数 P_i 来看, 存在 $Cd > Cr > As > Pb > Ni > Cu$ 的大小关系。

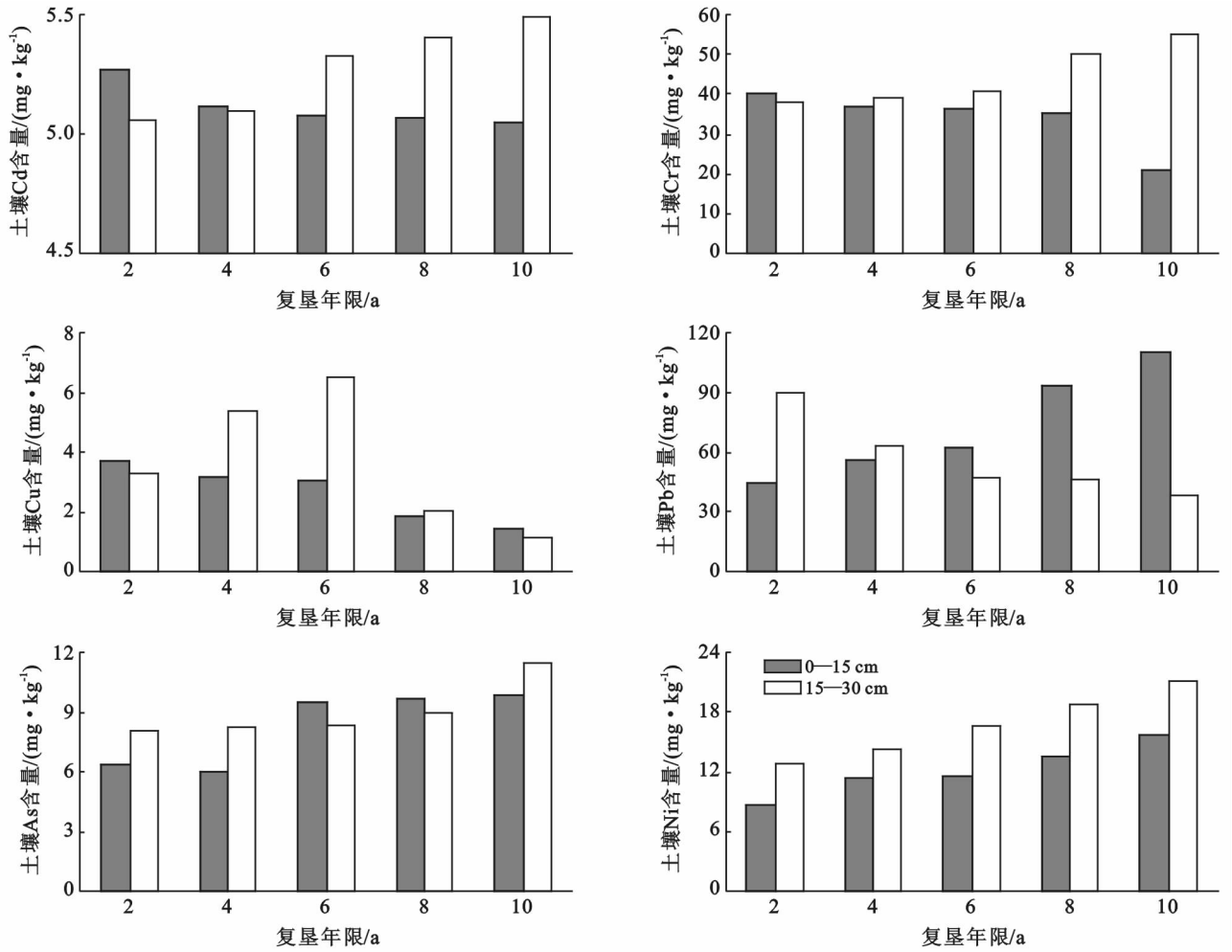


图1 复垦区土壤重金属含量

表4 土壤重金属单因子标识指数评价结果

编号	层次/cm	单因子污染指数 P_i					评价等级	污染程度	
		Cd	Cr	Cu	Pb	As			Ni
1	0—15	17.56	0.20	0.04	0.15	0.21	0.17	5	严重污染
2	15—30	16.85	0.19	0.03	0.30	0.27	0.26	5	严重污染
3	0—15	17.05	0.18	0.03	0.19	0.20	0.23	5	严重污染
4	15—30	16.98	0.20	0.05	0.21	0.27	0.29	5	严重污染
5	0—15	16.94	0.18	0.03	0.21	0.32	0.23	5	严重污染
6	15—30	17.75	0.20	0.07	0.16	0.28	0.33	5	严重污染
7	0—15	16.88	0.17	0.02	0.31	0.32	0.27	5	严重污染
8	15—30	18.02	0.25	0.02	0.16	0.30	0.37	5	严重污染
9	0—15	16.81	0.10	0.01	0.37	0.33	0.32	5	严重污染
10	15—30	18.30	0.27	0.01	0.13	0.38	0.42	5	严重污染

由表4可知,Cd的 P_i 在16.81~18.30,均值为17.32,均大于重金属污染分级中的5级重污染等级,处于严重污染水平。Cr的 P_i 在0.10~0.24,均值为0.20,小于于重金属污染分级中1级的污染指数0.7,污染等级为安全,处于清洁水平。Cu的 P_i 在0.01~0.07,均值为0.03,小于于重金属污染分级中1级的污染指数0.7,污染等级为安全,处于清洁水平。Pb

的 P_i 在0.37~0.13,均值为0.223,小于重金属污染分级中1级的污染指数0.7,污染等级为安全,处于清洁水平。As的 P_i 在0.20~0.38之间,均值为0.29,小于于重金属污染分级中1级的污染指数0.7,污染等级为安全,处于清洁水平。Ni的 P_i 在0.17~0.42之间,均值为0.29,小于于重金属污染分级中1级的污染指数0.7,污染等级为安全,处于清洁水平。由

以上分析可知,该矿区不同年限复垦土壤中 Cd 处于严重污染状况,Cr,Cu,Pb,As 和 Ni 这 5 种重金属元素均处于安全的清洁状况,不会造成环境危害。

2.3 内梅罗综合污染指数法评价结果

表 5 为用内梅罗综合污染指数法对孝义铝矿复垦不同年限内土壤重金属的污染评价结果。由表 5 可知,5 个样地各采样点 0—15 cm 和 15—30 cm 两层土壤重金属评价的内梅罗污染指数 P 在 12.08~13.14 之间,均值为 12.42,达到了 5 级重污染程度污染指数 3.0 的 4 倍,属于严重污染水平。

表 5 土壤重金属内梅罗综合污染指数评价结果

编号	复垦年限	层次/cm	内梅罗综合污染指数 P	评价等级	污染程度
1	2	0—15	12.61	5	严重污染
2	2	15—30	12.10	5	严重污染
3	4	0—15	12.24	5	严重污染
4	4	15—30	12.19	5	严重污染
5	6	0—15	12.16	5	严重污染
6	6	15—30	12.75	5	严重污染
7	8	0—15	12.12	5	严重污染
8	8	15—30	12.94	5	严重污染
9	10	0—15	12.08	5	严重污染
10	10	15—30	13.14	5	严重污染

2.4 重金属污染物来源分析

由以上分析可知,孝义铝矿复垦区土壤存在重金属污染的风险,而且主要污染物为 Cd。因此对复垦所用离石黄土和矿区周边马兰黄土进行了重金属含量测定(表 6)。由表 6 可知,孝义铝矿复垦所用土壤和矿区周边马兰黄土 Cd 含量分别为 4.91 和 5.04 mg/kg,已经超过了国家 2 级标准,属于污染状况,可见矿区复垦时所有土壤和周边地区的马兰黄土已经处于 Cd 污染状态,而 Cr,Cu,Pb,As 和 Ni 含量均为超过国家 2 级土壤标准,属于安全清洁状态。矿区复垦不同年限后土壤中 Cd 含量均值为 5.19 mg/kg,均高于复垦用土和周边马兰黄土含量;Cr 含量均值为 39.17 mg/kg,介于复垦用土和周边马兰黄土含量之间;Cu 含量均值为 3.15,高于复垦用土和周边马兰黄土含量;Pb 含量均值为 65.13 mg/kg,高于复垦用土和周边马兰黄土含量;As 含量均值为 8.64 mg/kg,介于复垦用土和周边马兰黄土含量之间;Ni 含量均值为 14.15 mg/kg,介于复垦用土和周边马兰黄土含量之间。由以上分析可知,复垦后土壤中的 Cd 主要来源于复垦所用土壤,是导致土壤污染的主要来源,是否存在其它外来性污染源还需要进一步调查研究。

表 6 复垦用土和周边土壤重金属含量

土壤来源	重金属含量/(mg·kg ⁻¹)					
	Cd	Cr	Cu	Pb	As	Ni
复垦用土	4.91	45.33	2.30	49.80	9.27	15.42
马兰黄土	5.04	34.53	1.15	51.56	8.41	9.34
复垦后均值	5.19	39.17	3.15	65.13	8.64	14.45

3 讨论与结论

(1) 复垦后土壤中超过国家二级质量标准的重金属是 Cd,0—15 cm 均值为 5.11 mg/kg,15—30 cm 均值为 5.27 mg/kg,其余 5 中元素含量均未超过国家二级标准。从重金属含量变化来看,在 0—15 cm 处,随着复垦年限的延长,Cd,Cr 和 Cu 含量逐渐降低,Pb,As 和 Ni 逐渐增加;在 15—30 cm 处,随着复垦年限的延长,Cd,Cr,As 和 Ni 逐渐增加,Pb 逐渐减低,Cu 则表现为先增长后降低的趋势。

(2) 单因子标识指数评价结果为主要污染元素是 Cd,达到 5 级重污染程度,属于 Cd 严重污染水平,而其它元素均为达到污染水平。内梅罗综合污染指数在 12.08~13.14 之间,均值为 12.42,达到了 5 级重污染程度污染指数 3.0 的 4 倍,属于严重污染水平。

(3) 复垦区覆土和周边土壤的 Cd 含量已经超过国家 2 级标准,因此复垦所用土壤是复垦区土壤重金属污染的主要来源。

中国矿产资源分布较广,尤其是山西煤矿、铁矿、铝矿等均分布较广,因此矿产资源开采后如何进行复垦和复垦后土地质量的控制是土地资源保护和利用的关键。土地质量的水平对生态环境和农林业产品均具有直接而重要的影响,因此不仅要矿区进行复垦,而且要保证和提高复垦后土地的质量。本研究结果表明孝义铝矿复垦后土地中 Cd 严重超标,污染比较严重,而且污染源主要来自复垦所用附近离石黄土。从土壤中重金属来源看,中国现用的有机和无机肥料均存在不同程度的 Cd,Cr,Pb,Cu,As 等重金属的超标问题^[16-18],因此复垦后通过人类农业生产活动所施加的有机无机肥料和农药,以及矿区粉尘沉降和交通等途径均可带来污染物^[19-21]。不同来源的重金

属通过富集作用,加剧了土壤的污染程度。再者,矿区开采后的矿渣灯碎屑物本身也含有较高的重金属,复垦土壤与废弃物间所发生物质运移也是导致不同土壤层重金属含量存在差异的原因。再者,土壤中的重金属通过植物的吸收也会发生一定程度的差异和转运。矿区等都能将超标的肥料用于复垦后土壤肥力的改善和提高,并通过重金属的富集作用逐步增加了土壤中污染重金属的含量,加剧了土壤污染程度。除此之外,土壤中重金属还可以通过大气沉降、交通等途径将周边土壤和矿区粉尘等带入复垦区土壤中,并进一步导致复垦区土壤重金属的变化。因此,在矿区复垦时选择和控制土壤质量是复垦成功与否的关键,并进行矿渣—复垦土壤—植物之间物质和能量运转和循环方面的研究,对矿区土壤生态的发展具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 郭伟,赵仁鑫,张君,等.内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J].环境科学,2011,32(10):3099-3105.
- [3] 石平,王恩德,魏忠义,等.辽宁矿区尾矿废弃地及土壤重金属污染评价研究[J].金属矿山,2008(2):118-121.
- [4] Bhattacharyya P, Tripathy S, Chakrabarti K, et al. Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil[J]. Chemosphere, 2008,72(4):543-550.
- [5] Zhuang Ping, Zou Bi, Li Zhian, et al. Heavy metal contamination in soils and food crops around Dabaoshan mine in Guangdong, China: Implication for human health[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009,31(6):707-715.
- [6] Machender G, Dhakate R, Prasanna L, et al. Assessment of heavy metal contamination in soils around Balanagar industrial area, Hyderabad, India[J]. Environment Earth Sciences, 2011,63(5):945-953.
- [7] Soriano-Disla J M, Speir T W, Gómez I, et al. Evaluation of different extraction methods for the assessment of heavy metal bioavailability in various soils[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2010,213(1):471-483.
- [8] 彭建,蒋一军,吴健生,等.我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J].地理科学进展,2005,24(2):38-48.
- [9] Reynderse, Bervoetsl, Geldersm, et al. Accumulation and effects of metals in caged carp and resident roach along a metal pollution gradient[J]. Science of the Total Environment, 2008,391(1):82-95.
- [10] Chopin E I, Alloway B J. Trace element partitioning and soil particle characterization around mining and smelting areas at Tharsis, Riotinto and Huelva, SW Spain[J]. Science of the Total Environment, 2007,373(3):488-500.
- [11] Zheng Na, Liu Jingshuang, Wang Qichao, et al. Mercury contamination due to zinc smelting and chlor-alkali production in NE China [J]. Applied Geochemistry, 2011,26(2):188-193.
- [12] Olawoyin R, Ovevole S A, Grayson R L. Potential risk effect from elevated levels of soil heavy metals on human health in the Niger Delta[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012,85(3):120-130.
- [13] 何绪文,王宇翔,房增强,等.铅锌矿区土壤重金属污染特征及污染风险评价[J].环境工程技术学报,2016,6(5):476-483.
- [14] 陈怀满.环境土壤学[M].北京:科学出版社,2005:522-523.
- [15] 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.
- [16] 胡明勇,蒋丽萍,张啸,等.常用肥料重金属含量的调查分析:以长沙市为例[J].湖南农业科学,2014(24):27-29.
- [17] 王美,李书田.肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):466-480.
- [18] 闫湘,王旭,李秀英,等.水溶肥料重金属含量与安全评价[J].土壤通报,2015,46(5):1264-1271.
- [19] 王雄军,赖健清,鲁艳红,等.基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J].生态环境,2008,17(2):671-676.
- [20] 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.
- [21] 段雪梅,蔡焕兴,巢文军.南京市表层土壤重金属污染特征及污染来源[J].环境科学与管理,2010,35(10):31-35.