

湘潭锰矿矿渣废弃地植被修复前的土壤诊断

方 晰, 田大伦, 谢荣秀

(中南林学院生态研究室, 湖南长沙 410004)

摘要:对湘潭锰矿矿渣废弃地植被修复前的土壤进行了诊断分析。结果表明:湘潭锰矿矿渣废弃地土壤质地主要为粗砂土,土壤自然含水量与邻近非矿区杉木林对照地的差异显著,而土壤容重和土壤总孔隙度与邻近非矿区杉木林对照地的差异不显著。矿渣废弃地土壤的 pH 值平均为 7.49, P 和 Ca 的平均含量分别为 1.01g/kg、4.41g/kg, 都显著高于邻近非矿区杉木林对照地,而 N 含量却显著低于邻近非矿区杉木林对照地,土壤有机质、K 和 Mg 平均含量与邻近非矿区杉木林对照地的差异不显著。矿渣废弃地的肥力综合指数为 8, 邻近非矿区杉木林对照地为 12, 其中砾石百分含量、有机质含量、N 含量、P 含量成为了限制土壤肥力的主要因子。矿渣废弃地土壤中的 Mn、Cu、Cd、Ni、Zn、Pb 平均含量分别是邻近非矿区杉木林对照地的 18.59、1.32、4.10、4.66、4.44 倍和 3.16 倍。以邻近非矿区杉木林地土壤对照值、湖南省土壤重金属元素背景值和全国土壤重金属元素平均值作为评价标准,矿渣废弃地土壤 6 种重金属的综合污染指数分别为 13.82、75.72 和 98.05, 均远远超过了重污染等级,且以 Mn、Cd 的污染为最严重。

关键词:湘潭锰矿; 废弃地; 土壤诊断; 环境污染; 重金属元素; 土壤特性; 土壤养分

文章编号: 1000-0933(2006)05-1494-08 **中图分类号:** Q14, X171.4 **文献标识码:** A

Soil physical and chemical properties of the wasteland in Xiangtan manganese mine

FANG Xi, TIAN Da-Lun, XIE Rong-Xiu (Research Section of Ecology, Central South Forestry University, Changsha 410004, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1494 ~ 1501.

Abstract: The restoration of the wasteland educed by the mining has become an important and interest issue because the wasteland not only occupied the vast tillable lands but also caused serious environment pollution. To provide necessary information for the restoration and management of the wastelands due to mining of Manganese, diagnosis of soil physical and chemical properties was conducted in a wasteland formed with the slag heaps in Xiangtan Manganese Mine, Hu'nan Province. A Chinese fir forestland located in the neighborhood of the wastelands but without the mining impacts was selected as a control site. The results showed that soil texture of the wasteland was mainly coarse sandy. Soil water content was significant lower in the wasteland (17.8%) than in the Chinese fir forestland (23.4%). However no significant differences were found in soil volume weight and total capillary between the wasteland (1.45g/cm³ and 45.24%, respectively) and that control site (1.42g/cm³ and 42.34%, respectively). The mean soil pH value in wasteland (7.49) was significantly higher than that in control site (5.45). The average concentrations of P and Ca in the wasteland were 1.01g/kg and 4.41g/kg respectively, which were statistically higher than those in the Chinese fir forestland (0.43 g/kg and 0.66 g/kg respectively). In contrast, average concentration of N was significant lower in wasteland (1.37g/kg) than in control site (2.28g/kg). The differences in terms of the mean concentration of K and Mg, and soil organic matter content between the two land categories did not significant. The total soil fertility index was lower in the wasteland than in the Chinese fir forestland. It was found that the main factors limiting soil fertility in the wastelands were percentage of sandy grain

基金项目: 国家林业局重点资助项目(2001-29); 湖南省科技厅重点资助项目(03NKJ1015, 05SK3060)

收稿日期: 2005-09-24; **修订日期:** 2006-02-12

作者简介: 方 晰(1968~), 女, 广西邕宁县人, 博士, 副教授, 主要从事森林生态系统定位研究. E-mail: fangxizhang@sina.com

Foundation item: The project was supported by Key Research Program of Station Forestry Administration (No. 2001-29), and Key Program of Hu'nan Science and Technology Commission (No. 03NKJ1015, 05SK3060)

Received date: 2005-09-24; **Accepted date:** 2006-02-12

Biography: FANG Xi, Ph.D., Associate professor, mainly engaged in long term research of forest ecology. E-mail: fangxizhang@sina.com

(1~0.01mm), soil organic matter content, soil concentrations of N and P. The concentration of Mn (7990.21mg/kg), Cu (66.38mg/kg), Pb (401.15mg/kg), Zn (640.32mg/kg), Cd (13.15mg/kg) and Ni (91.33mg/kg) in the wasteland were 18.59, 1.32, 4.10, 4.66, 4.44 and 3.16 times of those in the Chinese fir forestland, respectively. In comparison with the mean values of soil heavy metal elements recorded in the control site, Hu'nan province and the national level, the syntheses pollution indexes of the six 6 heavy metal elements (Mn, Cu, Pb, Zn, Cd and Ni) in the wasteland were 13.82, 75.72 and 98.05, respectively, which all exceeded the heave pollution standard. On the individual element basis, the elements of Mn, Pb and Cd exceeded the heave pollution standard. Our research indicated that mining of Manganese result in serious environment pollution and tillable land degradation.

Key words: Xiangtan manganese mine; wasteland; soil diagnosis; environment pollution; heavy metal element; soil characteristic; soil nutrient

矿产资源开发利用所形成的矿山废弃地占用了大量的土地资源以及由此引发的生态破坏、环境污染等问题已成为一个国家、民族的经济发展和人类社会生存的根本问题。近半个世纪以来,许多国家非常重视矿区废弃地的治理,广泛开展了矿区废弃地生态恢复的研究^[1-3]。20世纪80年代以来,我国矿区废弃地的生态恢复工作也取得了显著的成就,特别在经济发达的东南部地区,矿区废弃地的复垦利用已经受到了普遍关注^[4-7]。但从总体上看,我国矿区生态环境的恶化趋势还没有得到有效的遏制,据统计,目前全国矿区废弃地面积达40000km²,而且目前正在以每年330km²的速度增长^[8]。因此,矿区废弃地的生态恢复已成为我国当前所面临的紧迫任务之一,也是我国实施可持续发展战略应优先关注的问题之一^[9,10]。而生态系统退化程度的诊断是进行退化生态系统植被恢复与重建的基础和前提^[11],我国常见矿区废弃地进行植被恢复和重建工程中的首要问题是立地条件的分析与改良^[12]。因此,土壤诊断是矿区废弃地植被重建的最基本、也是最关键的步骤之一。矿渣废弃地是矿业废弃地的一种主要类型,其成分复杂,主要是由矿渣、煤气灰、城市生活生产垃圾、土法炼铁渣和选矿后的尾矿泥等成分组成的,也正由于矿渣废弃地的这种特殊成因,土壤条件差,植物定居和生长困难。本研究从矿渣废弃地土壤的理化性质、重金属元素含量、土壤资源评价和土壤重金属污染评价等方面对湘潭锰矿矿渣废弃地土壤进行诊断,找出限制该矿渣废弃地植被恢复的主要因素,进而探讨出必要的人工辅助措施,为湘潭锰矿矿区废弃地乃至湖南省、全国类似生态系统的植物恢复提供可行的方法及可参考技术。

1 研究区概况

湖南省湘潭锰矿矿区位于东经112°45'~112°55',北纬27°53'~28°03'。南距湘潭市14km,东距株洲市44km,东北距长沙市69km。矿区地处丘陵地带,最高海拔165m,最低62m。属典型亚热带季风气候,气候湿润、四季分明。日气温最高为42.2℃,最低-8℃,年平均气温17.4℃;年降水量最高为2081mm,最低为997.7mm,年平均降水量为1431.4mm;年蒸发量最大为1580.9mm,最小992.2mm,年平均蒸发量为1321.7mm。区域内矿藏以沉积碳酸锰及其次生氧化锰为主,储量丰富。此外,还有煤、石灰石、白云石、石英砂岩及石膏等非金属矿藏。

湘潭锰矿矿渣废弃地形成于20世纪60年代初,由矿石废弃物、矿渣和选矿后的尾矿泥、煤气灰、城市生活生产垃圾等形成的一种特殊的退化生态系统,植被状况极差,主要是草本植物种类,如艾蒿(*Lavandulaefolia* DC.)、灯心草(*Juncus effusus*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)等,经过近40多年的自然恢复也仅有极少量的灌木和乔木,如黄荆(*Vitex negundo*)、乌桕(*Spaium sebiferum*)、枫杨(*Pterocarya sten*)等,处于群落次生演替的前期阶段。

2 研究方法

2.1 样品采集及分析方法

根据湘潭锰矿矿渣废弃地的现状调查,于2004年3月~2005年2月期间先后到矿渣废弃地采集土壤样品4次,由于矿渣样地成分复杂,且分布不均,为保证采集土壤样品具有代表性,在0.67hm²的样地内按棋盘

式进行布点,采集 0~20cm 的土壤表层,每次采集土壤样品 12 个。与此同时,在邻近非矿区杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林对照地(下简称为:对照地)随机采集 4 个 0~20cm 的土壤样品作为对照值。

将野外采集回来的土壤样品在室内风干,按常规测定分析方法^[13]进行处理,分别测定土壤颗粒组成、自然含水量、容重、总孔隙度、pH 值、有机质含量、N、P、K、Ca、Mg、Cu、Zn、Mn、Ni、Cd、Pb 等元素的含量。土壤颗粒组成为 4 次采集的土壤样品混合后,进行测定。

2.2 矿渣废弃地土壤资源评价

本研究参照参考文献^[14]提出的林地土壤资源肥力的评价,确定土壤肥力指标为 7 项,其中有机质含量、全 N 含量和全 P 含量的分级指数为 1~4,而其它 4 项为 1~3(见表 1)。

表 1 土壤资源肥力评价指数表

Table 1 The evaluation index table of soil resource fertility

环境因素 Environmental factors	土层厚度 Soil layer depth (cm)	> 30	30 ~ 15	< 15	—
	指数 Index	3	2	1	—
	砾石含量 Disposition (%)	> 25	50 ~ 25	> 50	—
	指数 Index	3	2	1	—
	有机质层厚度 Organic matter layer depth (cm)	> 30	20 ~ 10	< 10	—
	指数 Index	3	2	1	—
	水分状况 Water condition	润 Moist	湿 Wet	干 Dry	—
养分因素 Nutrient factors	指数 Index	3	2	1	—
	有机质含量 Organic matter content (g/kg)	> 70	70 ~ 40	50 ~ 30	40 ~ 20
	指数 Index	4	3	2	1
	全 N 含量 Total N content (g/kg)	3.0 ~ 2.5	2.5 ~ 2.0	2.0 ~ 1.5	1.5 ~ 1.0
	指数 Index	4	3	2	1
	全 P 含量 Total P content (g/kg)	2.5 ~ 2.0	2.0 ~ 1.5	1.5 ~ 1.0	1.0 ~ 0.5
	指数 Index	4	3	2	1

2.3 矿渣废弃地土壤重金属污染评价

评价方法采用单因子污染指数法和综合污染指数法。单因子污染指数式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 为土壤中 i 污染物的污染指数; C_i 为 i 污染物的实测浓度 (mg/kg); S_i 为土壤的 i 污染物的背景值或对照值或标准值 (mg/kg)。

为全面反映各重金属元素对土壤的不同作用,突出高浓度重金属元素对环境质量的影响,采用内梅罗 (N.L. Neiw) 综合污染指数法,表达式如下:

$$P_{\text{综}} = \left\{ \frac{\left[\left(\frac{C_i}{S_i} \right)_{\max}^2 + \left(\frac{C_i}{S_i} \right)_{\text{ave}}^2 \right]}{2} \right\}^{1/2}$$

式中, $\left(\frac{C_i}{S_i} \right)_{\max}$ 为土壤重金属元素中污染指数最大值; $\left(\frac{C_i}{S_i} \right)_{\text{ave}}$ 为土壤各污染指数的平均值。

国内对土壤重金属污染评价多采用 II 类土壤评价标准,主要适用于农田、蔬菜地、果园、牧场等,但对矿区废弃地土壤重金属污染评价很少,而且有的重金属元素在《中国土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 中未作规定,为了能准确的反映出矿渣废弃地土壤重金属污染状况,本研究选用邻近非矿区杉木林地土壤重金属元素对照值、湖南省土壤重金属元素背景值和全国土壤重金属元素平均值作为评价标准。

目前,国内暂时还没有确定矿区废弃地土壤重金属元素污染评价的统一分级标准,本研究参照夏家洪^[15]和中华人民共和国土壤环境质量标准^[16],提出单因子污染指数法分级标准和多项综合污染指数法分级标准,如表 2 所示。

表 2 土壤重金属污染等级划分标准

Table 2 The criterion of pollution grade of soil heavy metals

分级 Grade	单因子污染指数分级标准 Pollution index criterion of individual factor (P_i)		综合污染指数分级标准 Comprehensive pollution index criterion (P)	
	污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade	污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade
1 级 1 grade	$P_i < 1$	清洁 Clean	$P \leq 0.7$	安全 Safe
2 级 2 grade	$1 \leq P_i < 2$	轻污染 Light pollution	$0.7 < P \leq 1$	警戒 Warning
3 级 3 grade	$2 \leq P_i < 3$	中污染 Medium pollution	$1 < P \leq 2$	轻污染 Light pollution
4 级 4 grade	$P_i \geq 3$	重污染 Heavy pollution	$2 < P \leq 3$	中污染 Medium pollution
5 级 5 grade			$P > 3$	重污染 Heavy pollution

2.4 数据处理方法

实验数据采用 EXCEL、SPSS10.0 统计软件处理。

3 结果与分析

3.1 矿渣废弃地土壤物理性质

土壤的物理性质是土壤肥力的重要因素。它的好坏,直接或间接地影响着土壤的水、肥、气、热等状况,进而影响植物的生长发育。而土壤质地、结构决定了土壤蓄水能力的强弱,进而决定了土壤水分供给的有效性,使之成为植物生长和发育的主导因子。从表 3 可以看出,矿渣废弃地土壤石砾(3 ~ 1 mm)、物理性砂粒(1 ~ 0.01mm)、物理性粘粒(< 0.01mm)的颗粒百分比分别为:26.89%、63.88%和 9.24%,而对照地的分别为:7.70%、43.96%和 48.34%。根据中国土壤质地分类标准^[17],矿渣废弃地土壤质地主要为粗砂土类,对照地为壤土类。差异显著性分析表明,矿渣废弃地土壤石砾和物理性砂粒含量极显著高于对照地($p < 0.01$),而物理性粘粒极显著低于对照地($p < 0.01$)。说明矿渣废弃地土壤通气透水性能良好,但保水保肥能力很差,土壤温度容易升高。在旱季,很容易由于土壤缺水造成植物死亡,这可能是限制矿渣废弃地植被恢复的主要原因之一。

表 3 矿渣废弃地土壤的质地

Table 3 Soil texture of the slag wasteland

类型 Type	编号 Number	土壤不同粒径的百分比 Percentage of soil different grain size (mm)							质地 Texture
		> 3	3 ~ 1	1 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	0.005 ~ 0.001	< 0.001	
废弃地 Slag wasteland	1	14.00	10.41	41.49	26.78	3.41	1.46	2.45	粗砂土 Coarse sandy soil
	2	18.98	2.34	33.24	29.34	12.16	2.65	1.29	细砂土 Fine sandy soil
	3	20.88	9.85	41.25	21.75	1.97	2.65	1.65	粗砂土 Coarse sandy soil
	4	22.63	8.45	37.16	24.51	2.54	3.34	1.37	粗砂土 Coarse sandy soil
	平均 Mean	19.12	7.76	38.29	24.60	5.02	2.53	1.69	粗砂土 Coarse sandy soil
对照地 Control	1	4.32	5.17	18.52	16.59	12.36	25.95	17.09	重壤土 Heavy soil
	2	3.21	7.23	23.28	21.32	14.36	19.36	11.24	中壤土 Medium soil
	3	1.95	2.38	26.13	24.2	12.85	20.13	12.36	中壤土 Medium soil
	4	2.43	4.12	20.46	25.32	15.32	18.14	14.21	中壤土 Medium soil
	平均 Mean	2.98	4.73	22.10	21.86	13.72	20.90	13.73	中壤土 Medium soil

土壤是植物生长的介质,合适的土壤自然含水量、容重和孔隙度是植物生长发育的关键因素。从表 4 可以看出,矿渣废弃地土壤含水量、土壤容重和孔隙度的平均值分别为:17.79%、1.45g/cm³和 45.24%,对照地为 23.35%、1.42g/cm³和 42.34%。平均值差异显著性的分析表明,矿渣废弃地土壤自然含水量与对照地的差异显著($p < 0.05$),而土壤容重和土壤孔隙度与对照地的差异均不显著($p > 0.05$)。可能因为是矿渣废弃地经

过 40 多年的自然恢复,少许的草本植物定居,土壤容重、孔隙度得到了改善,但是矿渣废弃地土壤容重和孔隙度的平均值还是高于对照地,说明矿渣废弃地土壤通气透水性能好,保水能力很差。降雨时因渗透快而迅速流失,同时通过蒸发而损失大部分土壤水分,只能满足一些生活周期短的草本植物生存,不能满足木本植物生存的要求。这可能是矿渣废弃地经过多年的自然恢复后,仍只有少许的草本植物定居的主要原因。

表 4 矿渣废弃地土壤物理性质

Table 4 Soil physical properties of the slag wasteland

项目 Items	含水量 Water content (%)	容重 Volume weight (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity (%)
最大值 Maximum	21.82	1.64	56.79
最小值 minimum	13.47	1.15	36.91
平均值 Mean	17.79	1.45	45.24
变异系数 Variation coefficient (%)	24.42	13.73	13.43
样本数 Number of specimen	48	48	48
对照地 Control	23.35	1.42	42.34

3.2 矿渣废弃地土壤化学性质

从表 5 可以看出,矿渣废弃地土壤的 pH 值变化范围为 6.30~8.08,平均为 7.49,土壤呈中性,适合于多数植物的生长。而对照地的为 5.45,土壤呈酸性。土壤有机质是土壤养分的“源”与“库”,并能改善土壤的物理化学性状,促进土壤的生物化学活动。矿渣废弃地土壤有机质含量为 18.683g/kg,略高于对照地(17.546g/kg),而低于湖南省土壤有机质平均含量(21.4g/kg)^[18]。矿渣废弃地土壤的 N 的含量为 1.37g/kg,明显低于对照区(2.28g/kg),而 P 恰好相反,矿渣废弃地土壤的 P 含量为 1.01g/kg,明显高于对照地(0.43g/kg),是对照地的 2.35 倍。同样,矿渣废弃地土壤的 Ca 含量为 4.41g/kg,也高于对照地(0.66g/kg),是对照地的 6.5 倍。矿渣废弃地土壤的 K 和 Mg 含量分别是 14.97g/kg、3.79g/kg,与对照地的(16.82g/kg、3.42g/kg)差异不大。平均值差异显著性分析表明(见表 5),矿渣废弃地土壤 pH 值、P 和 Ca 的含量与对照地之间存在极显著差异($p < 0.01$),N 含量与对照地的差异显著($p < 0.05$),有机质含量、K 和 Mg 的含量差异不显著($p > 0.05$)。经调查,当地政府及有关部门为了调节矿渣废弃地土壤的 pH 值,以降低土壤重金属元素的毒性,有利于植被恢复,曾多次采用石灰、尾矿泥、城市垃圾等对矿渣废弃地表土进行覆盖处理,这可能会导致矿渣废弃地土壤 pH 值、有机质、P、Ca 的含量比对照地的含量偏高。

表 5 矿渣废弃地土壤化学性质

Table 5 Soil chemical properties of the slag wasteland

项目 Items	pH	有机质含量	养分含量 Nutrient content (g/kg)				
		Organic matter content (g/kg)	N	P	K	Ca	Mg
最大值 Maximum	8.08	45.79	2.21	1.34	20.01	8.07	7.95
最小值 minimum	6.30	4.12	0.62	0.56	7.15	1.08	2.38
平均值 Mean	7.49	18.68	1.37	1.01	14.97	4.41	3.79
变异系数 Variation coefficient (%)	9.80	71.37	47.46	28.38	35.12	59.33	45.47
样本数 Number of specimen	48	48	48	48	48	47	48
对照地 Control	5.45	17.55	2.28	0.43	16.82	0.66	3.42

3.3 矿渣废弃地土壤重金属元素含量

土壤重金属元素污染是矿区废弃地普遍存在且最为严重的环境问题之一,过高的重金属元素含量对植物的生长发育有明显抑制及毒害作用,是我国常见矿区废弃地植被恢复困难的主要原因。测定结果表明(见表 6),湘潭锰矿矿渣废弃地土壤中 Mn、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 的含量范围分别为(mg/kg):1269.6~30178.36、32.30~128.12、223.67~622.11、210.91~1801.00、2.10~38.25、23.66~210.88,平均含量分别为(mg/kg):7990.21、66.38、401.15、640.32、13.15 和 91.33,大小排序为:Mn > Zn > Pb > Ni > Cu > Cd。与对照地比较,矿渣废弃地土壤中 Mn、Cu、Cd、Ni、Zn、Pb 的平均含量分别高出 18.59、1.32、4.10、4.66、4.44 和 3.16 倍。可见,矿渣废弃地土壤已明显受到 Mn、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 元素不同程度的污染。平均值差异显著性分析表明,矿渣废弃地土壤中

的 Mn 平均含量与对照地存在极显著差异 ($p < 0.01$), Pb、Zn、Cd、Ni 的平均含量与对照地存在显著差异 ($p < 0.05$), Cu 差异不显著 ($p > 0.05$)。与湖南省土壤重金属元素背景值、全国土壤重金属元素平均值^[20]相比较,湘潭锰矿渣废弃地土壤重金属元素 Mn、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 的含量都明显偏高,特别是 Cd 分别高出 104.24 倍和 135.40 倍。

从表 6 还可以看出,矿渣废弃地土壤中的 Mn、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 含量变异较大,变异系数分别为 132.88%、50.39%、92.64%、93.41%、94.42%、31.16%。究其原因可能是矿渣废弃地土壤表层不是自然风化而形成的,而是由水渣、煤气灰、尾矿泥、矿渣、城市生活垃圾等废弃物堆积而成的,且这些废弃物中成分复杂,重金属元素含量也不同,为此造成了矿渣废弃地土壤重金属元素分布的不均匀性。

表 6 矿渣废弃地土壤重金属元素的含量

Table 6 Heavy metal contents in the slag wasteland soil

项目 Items	重金属元素含量 Heavy metal element contents (mg/kg)					
	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni
最大值 Maximum	30178.36	128.12	622.11	1801.00	38.25	210.88
最小值 Minimum	1269.6	32.30	223.67	210.91	2.10	23.66
平均值 Mean	7990.21	66.38	401.15	640.32	13.15	91.33
变异系数 Variation coefficient (%)	132.88	50.39	92.64	93.41	94.42	31.16
样本数 Number of specimen	48	48	48	45	46	48
对照地 Control	429.84	50.20	127.02	144.24	3.20	19.51
湖南省背景值 Back ground in Hu'nan Province	459	27.3	29.7	94.9	0.126	31.9
全国平均值 Mean all over the country	583	22.6	26.0	74.2	0.097	26.9

3.4 矿渣废弃地土壤环境质量评价

3.4.1 矿渣废弃地土壤资源评价 从表 7 可以看出,矿渣废弃地和对照地土壤肥力总指数分别为 8 和 12,说明矿渣废弃地土壤肥力明显低于对照地。其中矿渣废弃地土壤有机质含量低于 20g/kg,指数为 0,砾石百分含量、有机质层厚度、水分状况、全 N 含量、全 P 含量等的指数仅为 1,说明砾石百分含量、有机质含量、水分状况、全 N 含量和全 P 含量成为限制矿渣废弃地土壤肥力的主要因子。因此在进行植被恢复时,首先进行土壤基质改良,改善土壤的物理化学性质,同时追加肥料(可使用复合肥或农家肥),以弥补营养的匮乏,保证植物生长所需的营养元素。

表 7 矿渣废弃地土壤肥力指数表

Table 7 Composite index table of soil fertility in the slag wasteland

土壤及指数 Soil and index	矿渣废弃地 Slag wasteland		对照地 Control	
土层厚度 Soil layer depth (cm)	> 30	3	> 30	3
砾石含量 disposition (%)	> 50	1	< 25	3
有机质层厚度 Organic matter layer depth (cm)	< 10	1	< 10	1
水分状况 Water condition	干 Dry	1	湿 Wet	2
有机质含量 Organic matter content (g/kg)	< 20	0	< 20	0
全 N Total N (g/kg)	1.5 ~ 1.0	1	2.5 ~ 2.0	3
全 P Total P (g/kg)	1.0 ~ 0.5	1	< 0.5	0
肥力总指数 Fertility total index		8		12

3.4.2 矿渣废弃地土壤重金属污染状况评价 由表 8 可以看出,以对照地土壤重金属元素含量、湖南省土壤重金属元素背景值和全国土壤重金属元素平均值^[19]作为评价标准,矿渣废弃地土壤 6 种重金属元素的综合污染指数分别为 13.82、75.72 和 98.05,均远远超过了重污染等级。从单因子污染指数 (P_i) 来看,以对照地土壤重金属元素含量为评价标准时,除 Cu 的 $P_i < 2$,为轻污染等级外,其它 5 种重金属元素的 $P_i > 3$,均超过了重污染等级,其中最为严重的是 Mn,污染指数达到 18.59,其次是 Ni,污染指数的大小排序为 $Mn > Ni > Zn > Cd > Pb > Cu$;以湖南省土壤重金属元素背景值为评价标准时,除 Ni 和 Cu 为中污染等级外,其它 4 种元素超过了

重污染等级,其中 Cd 污染最为严重,污染指数为 104.24,其次是 Mn,污染指数的大小排序为 $Cd > Mn > Pb > Zn > Ni > Cu$;以全国土壤重金属元素平均值为评价标准时,除 Cu 为中污染等级外,其它 5 种重金属元素均超过了重污染等级,同样也是 Cd 污染最为严重,污染指数达到 135.53,其次是 Pb,污染指数的大小排序为 $Cd > Pb > Mn > Zn > Ni > Cu$ 。可见,以湖南背景值和全国平均值作为评价标准时,Cd 的污染指数最高。原因可能是当地 Cd 的背景值本来就比较高的缘故(见表 6),也可能由于矿渣废弃地周围曾堆放过大量的城市生活生产垃圾,其中有不少废弃的电池,造成废弃地土壤中 Cd 含量过高。

表 8 矿区废弃地土壤重金属污染评价指数

Table 8 The pollution index of heavy metals in the slag wasteland by using different evaluation standards

评价标准 Evaluation standard	单因子污染指数 Pollution index of individual factor (P_i)						综合污染指数 Comprehensive pollution index (P)
	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	
对照地 Control	18.59	1.32	3.16	4.44	4.10	4.66	13.82
湖南省背景值 Background in Hu'nan province	17.41	2.43	13.51	6.75	104.24	2.85	75.72
全国平均值 Mean all over the country	13.71	2.94	15.43	8.63	135.40	3.38	98.05

4 结论

矿渣废弃地土壤质地主要为石质粗砂土类,对照地土壤是壤土类。矿渣废弃地土壤石砾、物理性砂粒百分含量显著高于对照地,物理性粘粒却显著低于对照地。说明矿渣废弃地土壤通气透水性能良好,但保水保肥能力差,在旱季,很容易由于土壤缺水造成植物死亡,这可能是矿渣废弃地植被恢复困难主要因子之一。矿渣废弃地土壤自然含水量与对照地的差异显著,而土壤容重和土壤孔隙度与对照地的差异均不显著。

矿渣废弃地土壤的 pH 值平均为 7.49,土壤呈中性,适合于多数植物的生长。矿渣废弃地土壤 pH 值、P 和 Ca 的平均含量显著高于对照地,N 含量显著低于对照地,土壤有机质、K 和 Mg 含量差异不显著。矿渣废弃地土壤中的 Mn、Cu、Cd、Ni、Zn、Pb 平均含量分别是对照地的 18.59、1.32、4.10、4.66、4.44 和 3.16 倍。与湖南省土壤重金属元素背景值、全国土壤重金属元素平均值相比较,湘潭锰矿矿渣废弃地土壤重金属元素 Mn、Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 的含量都明显偏高,特别是 Cd 分别高出 104.24 倍和 135.40 倍。

矿渣废弃地的肥力综合指数为 8,对照地的为 12,其中砾石百分含量、有机质含量、水分状况、全 N 含量、全 P 含量成为了限制土壤肥力的主要因子。因此,进行植被恢复工程时,首先要进行土壤基质改良,改善土壤的物理结构,同时添加营养物质,保证植物生长所需的营养元素。

以邻近非矿区的杉木林对照地土壤重金属元素含量、湖南省土壤重金属元素背景值和全国土壤重金属元素平均值作为评价标准,矿渣废弃地 6 种土壤重金属元素的综合污染指数分别为 13.82、75.72 和 98.05,均远远超过了重污染等级,其中 Mn、Cd 重金属污染为最严重,是矿渣废弃地植物恢复困难的主要因子之一。因此,进行植被恢复工程时,必须引起足够的重视,采取相应的措施。如采用表土、污水污泥、生活垃圾或者其它有机质含量较高的无毒有机废弃物进行土壤基质改良,提高土壤养分的含量,整合部分重金属元素,缓解其毒性;同时应选择对土壤重金属元素污染具有明显抗性和富集能力的植物,特别是对重金属元素 Mn、Cd 的抗性以及使用复合肥或农家肥等进行追加肥料以弥补土壤养分匮乏等。

References:

- [1] Bradshaw A D. Wasteland management and restoration in Western Europe. *Journal of Ecology*, 1989, 26: 775 ~ 786
- [2] Quan Z G. Investigation Report of Mining Districts in German. In: Qu G L and Wu Z M eds. *Selected foreign forestry techniques investigation report*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998. 41 ~ 45.
- [3] Lu Q. Report about Participating in the Expert Conference of Recovering Regressive Forest Ecosystem. In: Qu G L and Wu Z M eds. *Selected foreign forestry techniques investigation report*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996. 104 ~ 107.
- [4] Barth R C. Re-vegetation techniques for toxic tailing. In: Keammerer W R, Brown L F eds. *Proceeding: High Altitude Re-vegetation Workshop(No.8)*, Fort Collins: Colorado State University, 1998. 55 ~ 68.

- [5] Shu W S, Zhang Z Q, Lan C Y. Strategies for restoration of Ming wasteland in China. *Ecologic Science*, 2002, 19(2):24 ~ 30.
- [6] Yang S, Gao L. A Study on Re-vegetation in Mining Wasteland of Dexin Mine, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11):1932 ~ 1941.
- [7] Shu W S, Lan C Y, Zhang Z Q. Analysis of Major Constraints on Plant Colonization at FanKou Pb/Zn Mine Tailings. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1997, 8(3): 314 ~ 318.
- [8] Li Y G, Jiang G M. Ecological Restoration of Mining Wasteland in both China and Abroad an over review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1):95 ~ 100.
- [9] Zhang J N, Xu Q. Major Issues in Restoration Ecology Researches. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999, 10(1):109 ~ 113.
- [10] Bai Z K, Zhao J K. Land Reclamation and Ecological Restoration in the Areas of Mining. China Agricultural Science Press, 2000.
- [11] Du X J, Gao X M, Ma K P. Diagnosis of the Degradation of an Ecosystem: the Basis and Precondition of Ecological Restoration. *Acta Phytoecological Sinica*, 2003, 27(5):700 ~ 708.
- [12] Bai Z K, Zhao J K. Some problem about reclamation and reconstruction of opencast coal mine. *Metal Mine Design & Construction*, 2000, 32(1):33 ~ 38.
- [13] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences in Nanjing. Soil Physical and Chemical Analysis. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press, 1992.
- [14] Ye W H, Luan S J. Assessment of Environmental Quality Science. Beijing: The Higher Education Press, 1997.
- [15] The Detail Explanation of Soil Environmental Quality Standards. Beijing: China Environment Science Press, 1996.
- [16] GB15618-1995. Soil Environment Quality Standards of People's Republic of China. Beijing: Standards press of China, 1995.
- [17] Beijing Forestry University. Soil Science. Beijing: China Forestry Press, 1982. 120 ~ 123.
- [18] Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences. Soil of China. Beijing: Science Press, 1978.
- [19] China Environmental Monitoring Station. Backgrounds values of Elements in Chinese Soil. Beijing: China Environment Science Press, 1990.

参考文献:

- [2] 全志刚. 赴德国矿区复垦考察报告(1996). 见:曲桂林,吴志民主编. 国外林业技术考察报告选编. 北京:中国林业出版社,1998. 41 ~ 45.
- [3] 卢琦. 关于参加“恢复退化森林生态系统专家会议”的报告(1996). 见:曲桂林,吴志民主编. 国外林业技术考察报告选编. 北京:中国林业出版社,1998. 104 ~ 107.
- [5] 束文圣,张志权,蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策研究. *生态科学*, 2002, 19(2):24 ~ 30.
- [6] 杨修,高林. 德兴铜矿矿渣废弃地植被恢复与重建研究. *生态学报*, 2001, 21(11):1932 ~ 1941.
- [7] 束文圣,蓝崇钰,张志权. 凡口铅锌尾矿影响植物定居的主要因素分析. *应用生态学报* 1997, 8(3):314 ~ 318.
- [8] 李永庚,蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展. *生态学报*, 2004, 24(1):95 ~ 100.
- [9] 章家恩,徐琪. 恢复生态学研究的一些基本问题探讨. *应用生态学报*. 1999, 10(1):109 ~ 113.
- [10] 白中科,赵景逵. 工矿土地复垦与生态重建. 北京:中国农业科学出版社,2000.
- [11] 杜晓军,高贤明,马克平. 生态系统退化程度诊断:生态恢复的基础与前提. *植物生态学报*, 2003, 27(5):700 ~ 708.
- [12] 白中科,吴梅秀. 关于露天矿土地复垦与生态重建的几个问题. *冶金矿山设计与建设*. 2000, 32(1):33 ~ 38.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [14] 叶文虎,栾胜基. 环境质量评价学. 北京:高等教育出版社, 1997.
- [15] 夏家洪. 土壤环境质量标准详解. 北京:中国环境科学出版社,1996.
- [16] GB15618-1995. 中华人民共和国土壤环境质量标准. 北京:中国标准出版社,1995.
- [17] 北京林学院主编. 土壤学. 北京:中国林业出版社,1982. 120 ~ 123.
- [18] 中国科学院土壤研究所主编. 中国土壤. 北京:科学出版社,1978.
- [19] 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值. 北京:中国环境科学出版社, 1990.