

# 煤矿塌陷区不同充填模式土壤特征及修复评价

王珍<sup>1</sup>, 王宁<sup>1</sup>, 李玉成<sup>1</sup>, 程桦<sup>1</sup>, 郑刘根<sup>1</sup>, 柳炳俊<sup>2</sup>

(1. 安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 煤矿生态环境保护国家工程实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 采集了安徽省淮南市大通煤矿塌陷区中化工垃圾充填(B)和煤矸石充填(C)两种充填修复模式以及作为对照区的人工混交林地(A)的表层土样, 分析了其理化性质及这些土样中 Cr, Cd, Cu, Pb, Hg 的赋存特征, 并对修复效果进行了评价。结果表明: (1) 速效磷含量为: A 区 > B 区 > C 区; 碱解氮含量为: C 区 > A 区 > B 区; 重金属和交换性 Na<sup>+</sup> 为 B 区高于其他区域, B 区土壤碱化度(ESP)高达 22%。(2) 研究区内土壤普遍呈碱性, 碱解氮和速效磷严重缺乏, 土壤肥力: A 区 > C 区 > B 区。(3) 土壤重金属污染: A 区为轻度, B 区属于中、重度, C 区污染程度不一。重金属 Cr, Cd, Cu, Pb 总量不同程度超过淮南土壤背景值。(4) 土壤修复效果 C 区优于 B 区, B 区存在突出问题, 亟待改善。

**关键词:** 煤矿塌陷区; 充填模式; 土壤; 重金属; 修复效果

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)05-0170-06

中图分类号: TD88

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.039

## Soil Characteristics and Remediation Evaluation of Various Filling Modes in Coal Mining Subsidence Area

WANG Zhen<sup>1</sup>, WANG Ning<sup>1</sup>, LI Yu-cheng<sup>1</sup>, CHENG Hua<sup>1</sup>, ZHENG Liu-gen<sup>1</sup>, LIU Bing-jun<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;

2. National Engineering Laboratory of Ecological Environment Protection in Coal Mine, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** Three types surface soil from Datong coal mine subsidence in Huainan City of Anhui Province were collected for remediation evaluation. Sample A was from the control area with a mixture plantation, sample B was taken from an area with chemical waste filling, and sample C was taken from an area with coal gangue fillin. The physical and chemical properties, and the occurrence characteristics of Cr, Cd, Cu, Pb, and Hg of the samples were analyzed, and the environmental effects of the soil restoration were assessed. The results showed as follows: First, in the three samples, available P content in area A > area B > area C, but available N in area C > area A > area B, and content of heavy metals and exchangeable Na<sup>+</sup> of area B was higher than in other areas, and in particular, the ESP (exchange sodium percentage) content was up to 22%; Second, high alkalinity of the filling soil was widespread, showing a serious lack of available N and P. The soil fertility in area A > area C > area B. Third, the levels of heavy metal pollution found in the soil showed that area A reached slight levels, area B reached moderate to high levels, and area C reached different types of heavy metal pollution. The total content of Cr, Cd, Cu and Pb in the soil was, to different degrees, greater than that found in typical Huainan City background values; Fourth, the effect of the soil restoration in subsidence sample C was superior to subsidence sample B, and the environmental problems of the soil in area B was severe, it should be improved promptly.

**Keywords:** mining subsidence; filling mode; soil; heavy metal; remediation effects

煤炭是中国重要的一次性能源,在中国能源结构中采煤活动导致的地面沉陷是最重要的问题之一。中占 70%左右。煤炭开采带来一系列环境问题,其据统计,目前中国采煤区地面塌陷造成土地破坏总量

收稿日期: 2013-11-01

修回日期: 2013-11-22

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划支撑项目“两淮煤矿沉陷区生态环境综合评价”(2012BAC10B02); “十二五”国家水专项巢湖项目(2012ZX07103-004); 国家自然科学基金项目(41373108); 国家自然科学基金项目(41172121); 安徽省自然科学基金项目(1208085ME66); 安徽省教育厅重点基金项目(KJ2012A022); 煤矿生态环境保护国家工程实验室科技攻关项目(HKKY-JT-JS2012); 安徽大学博士启动基金项目(12333190121)

作者简介: 王珍(1988—), 女(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为矿区污染调查与评价。E-mail: wz19882009@live.cn。

通信作者: 王宁(1971—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 副教授, 主要从事环境化学研究。E-mail: ningwang0001@163.com。

超过  $4.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 并且仍以  $3.3 \times 10^4 \sim 4.7 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$  的速度增加<sup>[1]</sup>。煤矿开采引起的土地损伤与破坏导致中国耕地面积大大减少。利用煤矸石复垦土壤是增加煤矿塌陷区耕地面积的措施之一<sup>[2]</sup>。然而煤矸石的利用利弊不一,一方面煤矸石量大面广是塌陷地比较理想的充填材料<sup>[3]</sup>,另一方面煤矸石作为煤炭资源重要的副产品<sup>[4]</sup>,含有粉尘、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  以及 Fe、Mn 等常量元素外,还有其他微量重金属元素,如 Pb、Sn、As、Cr 等,这些元素为有毒重金属元素,经雨水淋蚀后会污染周围的土壤和水体。如李海霞等<sup>[5]</sup>对淮南某废弃矿区土壤的重金属进行了污染风险评价;马祥爱等<sup>[6]</sup>对山西平朔露天矿复垦土壤中的重金属进行了研究,大量研究结果都表明煤矸石复垦土壤均存在不同程度的重金属污染<sup>[7-10]</sup>。同时不同复垦模式对土壤中重金属含量有较大影响,Dong Jihong 等<sup>[11]</sup>发现,土壤重金属含量粉煤灰充填区低于煤矸石充填区。因此不同充填修复模式下土壤重金属污染状况也不一致。

目前在塌陷区的充填复垦过程中往往只关心如何通过土地开发整理来增加耕地的数量,而对复垦土壤质量状况重视不足<sup>[12]</sup>。而且煤矿复垦区土壤质量状况分析大多侧重于对重金属的研究,而对于不同充填修复模式下土壤理化特性的研究较少,特别是煤矿塌陷区土壤普遍呈碱性,对土壤中碱金属及碱土金属的分析不足,同时对于性质复杂的垃圾充填区复垦土壤的环境特征研究较少。现场调查发现,淮南大通煤矿塌陷区经过政府和企业的多年充填修复,目前植被恢复较好。区内存在两种典型的充填模式——化工垃圾及煤矸石。土壤的营养盐状况、重金属污染状况进行分析研究,本文对这两种充填复垦模式下,并对修复效果进行综合评价,以期为进一步改善土壤环境提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

大通煤矿塌陷区地处淮南市东部,其地理坐标为:  $32^\circ 37' \text{N}$ ,  $117^\circ 01' \text{E}$ , 属暖温带气候,年平均气温  $15.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年降水量  $918 \text{ mm}$ ,占地面积  $3.38 \text{ km}^2$ 。2005 年以来,淮南矿业集团实施了矿山地质环境治理工程,结合大通塌陷区内原有的山坡林地、煤矸石堆和化工垃圾堆,对该区域采用大范围保持现状,在局部调整的基础上进行生态环境修复。煤矸石堆表面坡度较缓,起伏不大,厚度在  $2 \sim 6 \text{ m}$ ,沿斜坡逐渐增厚,其复垦方案为:矸石堆碾压→坡面整理→矸石堆表面覆土→种植树木。覆土为黄棕壤,表面覆土厚

度平均  $20 \text{ cm}$ 。化工垃圾堆放厚度平均约  $2 \sim 5 \text{ m}$ ,化工垃圾和生活垃圾混杂堆放,以建筑垃圾和化工废料为主,参杂小部分生活垃圾,其复垦方案为:垃圾堆碾压平整→四周开挖集水沟(防止雨水进入)→设置防渗膜→垃圾渗沥液出水方向设置渗沥液导水沟和防渗堤→表面参加粉状矸石与垃圾混合→垃圾堆的表面覆土→种植树木。由于垃圾堆中含有生活垃圾,覆土厚度不小于  $0.8 \text{ m}$ ,为防止垃圾渗沥液对环境的污染,暗渠引出的垃圾渗沥液将依次进入垃圾充填斜坡上的渗沥液处理系统的调节池→混合池→澄清池进行预处理。目前研究区内由南向北已形成典型的人工混交林斜坡、化工垃圾充填复垦斜坡和煤矸石充填复垦斜坡,选择以上两种充填复垦模式下的土壤为研究对象,人工混交林土壤做为实验对照,其中每种充填模式选择不同坡度的土壤作为测点,化工垃圾充填区选择各个垃圾渗沥液处理池附近的土壤作为测点。

### 1.2 布点采样

在大通煤矿塌陷复垦区内设置 9 个采样点(表 1)。每个复垦区内按照对角线布点原则设置  $2 \sim 3$  个采样点并分别取样。2012 年 11 月现场采样,记录植被情况等。采样深度  $20 \text{ cm}$ ,采集时去掉表皮草层和杂物取,土样  $1 \text{ kg}$  放入自封袋内。样品带回实验室,剔除枯枝残叶石块等杂物,自然晾干,圆木棍碾碎,四分法取适量样品,过  $2 \text{ mm}$  筛,装入自封袋避光保存备用。

表 1 大通煤矿塌陷区采样基本情况

编号	复垦模式	位置	土壤性质	植被
1	对照(A)	坡面	黄棕壤	麻栎混交林
2	对照(A)	坡底	黄棕壤	麻栎混交林
3	化工垃圾充填(B)	调节池	黄棕壤	灌木丛
4	化工垃圾充填(B)	混合池	黄棕壤	芦苇
5	化工垃圾充填(B)	澄清池	黄棕壤	芦苇
6	化工垃圾充填(B)	坡底	黄棕壤	芦苇、香蒲
7	煤矸石充填(C)	坡底	灰黑色	芦苇
8	煤矸石充填(C)	坡面	灰黑色	豆科植物
9	煤矸石充填(C)	坡顶	灰黑色	小灌木和草本

### 1.3 土壤指标测定

土壤 pH 值测定用酸度计;土壤 C, N, H 含量用元素分析仪<sup>[13]</sup>;全磷用 NaOH 熔融——钼锑抗比色法;全钾用 NaOH 熔融——等离子体光谱法;碱解性氮用碱解——扩散法;有效磷用碳酸氢钠浸提(1:20)——钼锑抗比色法测定;速效钾用乙酸铵交换(1:10)——等离子体光谱法测定;CEC 及交换性钙、镁、钠、钾离子用 EDTA—乙酸铵交换(上清液)——等离子光谱法测定;汞采用测汞仪;铜、铬、

镉、铅重金属用盐酸:硝酸:氢氟酸:高氯酸为 2:3:2:1 消解—火焰原子吸收分光光度测定<sup>[14]</sup>。土壤样品测定过程由平行三样、空白样和土壤标样进行质量控制,土壤有效成分指标测定的标准物质为辽宁棕壤 GBW07412a(ASA-1a),地质、地球化学调查与矿产普查样品的标准物质为 GBW07403(GSS-3),实验试剂均为优级纯。实验用水为去离子水。

#### 1.4 数据处理

数据处理用 Origin 8.1,土壤重金属污染评价用内

梅罗综合指数法,土壤肥力状况用 SPSS 16.0 软件对土壤理化指标进行主成分分析,数据标准化应用 Analyzey—Descriptive Statisticsy—Descriptives,相关系数矩阵、特征值和特征向量、主成分得分的计算应用 Analyzey—DataReductiony—FactorAnalysis<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

土壤标准品的回收率在 80%~120%,分析结果如表 2 所示。

表 2 大通煤矿塌陷区不同充填复垦模式下不同位置土壤理化性质

编号	复垦模式及位置	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱性氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
1	A 坡面	2.60	0.30	14.70	10.40	11.03	225.40
2	A 坡底	2.60	0.38	8.64	10.41	10.17	77.90
3	B 调节池	2.80	0.41	10.33	6.96	4.63	139.90
4	B 混合池	2.75	0.36	18.47	6.99	3.60	129.00
5	B 澄清池	2.80	0.34	16.84	6.96	11.60	177.10
6	B 坡底	2.90	0.43	14.89	17.92	5.73	155.60
7	C 坡底	3.10	0.24	13.30	17.38	0.14	242.90
8	C 坡面	2.50	0.46	13.92	24.31	4.12	124.80
9	C 坡顶	2.80	0.36	10.50	10.44	3.25	132.20
平均值		2.80	0.36	13.51	12.42	6.03	156.09
不确定度		0.04	0.08	0.46	1.02	0.01	11.90
变异系数/%		6.55	17.36	22.36	46.29	62.34	31.27

  

编号	复垦模式及位置	交换性钾/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	交换性钠/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	交换性钙/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	交换性镁/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	CEC/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	ESP/ %	pH 值
1	A 坡面	1.59	0.54	19.95	5.67	27.75	1.90	7.62
2	A 坡底	1.79	0.54	18.03	4.44	24.81	2.20	7.99
3	B 调节池	0.74	0.39	13.27	4.60	19.01	2.20	8.11
4	B 混合池	0.96	0.89	10.23	2.78	14.85	6.00	9.27
5	B 澄清池	1.03	1.24	2.17	1.19	5.63	22.00	9.88
6	B 坡底	1.65	0.38	13.41	3.06	18.50	2.00	7.62
7	C 坡底	1.31	0.40	14.87	3.49	20.08	2.00	7.33
8	C 坡面	1.04	0.41	13.56	4.63	19.64	2.10	7.43
9	C 坡顶	1.34	0.50	17.66	4.57	24.07	2.10	7.59
平均值		1.27	0.59	13.68	3.83	19.37	4.70	8.09
不确定度		0.30	0.16	1.52	0.45	1.99	0.01	0.03
变异系数/%		27.94	49.48	38.34	34.96	33.29	140.82	11.00

#### 2.1 不同充填复垦模式对土壤养分的影响

由表 2 可知,土壤 pH 值随着复垦填充模式的不同发生显著变化,由 A 区到 B 区,土壤 pH 值逐渐增大至 9.89,呈现强碱性,而在煤矸石充填区土壤碱性为 7.33~7.59。人工混交林 A 区土壤为弱碱性,这与王丽艳等<sup>[16]</sup>研究指出人工种植植被使复垦土壤 pH 值显著降低结果一致。B 区土壤呈现强碱性,并且采样点越接近澄清池,pH 值越高,分析原因包括三点:一是该区原为某化工厂生产泡花碱及沸石,其生

产工艺中产生导致土壤偏碱性的物质,二是工厂倒闭拆除后土壤中混有大量的建筑垃圾,建筑垃圾中含有石灰等碱性材料,从而直接导致该区土壤 pH 值偏高;三是由于研究区为高潜水位地区,季节性积水蒸发后造成土壤表层盐分积累,从而造成反碱现象。总体来看不同充填复垦模式 pH 值变化为:B>A>C。

速效磷养分指标的变化范围为 0.14~11.60 mg/kg,根据全国第二次土壤普查分类标准,A 区速效磷养分指标处于 3 级,坡顶是杉树林,为较原始土

壤,速效磷含量为中等水平,但随着坡度下降其含量有所减少,可能是由于雨水冲刷造成的。由 A 到 B 区速效磷急剧下降,分析原因可能是由于大面积煤炭开采造成地表沉陷,产生许多裂缝和相对的坡地和洼地,土壤中磷素随裂隙和地表径流流入采空区或洼地造成养分短缺,再加上 B 区是由化工垃圾和建筑垃圾充填形成,覆盖层较薄,养分保持能力较 A 区弱,而且丰水期时,靠近积水区的采样点会被浸入水中,加速土壤中磷的溶出,使磷含量下降。但澄清池旁的 5 号点土壤速效磷突然升高至 11.60 mg/kg,这可能是由于池内及附近低洼处水体严重富营养化使其周围土壤中的磷素较高。7,8,9 号点为煤矸石填埋的缓坡,坡度升高速效磷含量减少,煤矸石充填斜坡的速效磷含量为最低水平。研究区内速效磷养分指标的差异性较大,但 A 区明显优于其他区域。速效钾规律性不明显,除与充填模式、植被和地形有关系外,主要与土壤母质有很大关系<sup>[17]</sup>。

碱解性氮变化范围为 6.96~24.31 mg/kg,碱解性氮随着土壤 pH 值升高其含量有增加趋势,但在澄清池附近由于土壤碱性过强,使得土壤中的氮素碱解而扩散到空气中。C 区碱解性氮养分含量有所增加,这可能是由于煤矸石充填区边坡恢复植被的大部分是豆科植物,有一定的固氮能力,因此 C 区土壤碱解氮养分含量相对较高,整体来看不同充填复垦模式下土壤碱解氮含量为:C 区>A 区>B 区。

## 2.2 不同充填复垦模式对土壤交换性阳离子的影响

由表 2 可见,土壤中的各种交换性阳离子在化工垃圾充填区有显著的变化。

根据全国第二次土壤普查分级标准,B 区内 5 号点澄清池附近土壤 CEC 为 5.63,处于极缺乏水平,其他区域土壤 CEC 处于很丰富和丰富水平。越接近澄清池 CEC 及交换性  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  离子含量越低,而土壤交换性  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  浓度和碱化度含量越高,澄清池附近土壤碱化度(ESP)高达 22%,表明该区域土壤已存在碱化现象。现场调查澄清池附近现挖坑内水质呈现棕色,这可能与该区曾生产的泡花碱(青绿色或棕色的固体或粘稠液体)和沸石有很大关系。沸石可以借水的渗滤作用,进行阳离子的交换,其成分中的  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  可与水溶液中的  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  等离子交换,由表 2 可知澄清池附近交换性  $\text{Na}^{+}$  浓度均高于其他区域,交换性  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  浓度趋势相反,同时沸石的交换作用也对澄清池附近土壤 CEC 的下降有一定的贡献。

## 2.3 不同充填复垦模式对土壤中重金属含量的影响

土壤重金属结果如表 3 所示。根据土壤环境质量标准(GB15618—1995) II 级标准计算的各种重金属的单因子污染指数来看,矿区最主要的污染元素为 Cd,其含量分布波动较大,其中煤矸石充填斜坡上的 9 号点 Cd 含量超标 11.3 倍,A 区超标程度最低。土壤 Cr 含量超标在 1.53~1.95,B 区 Cr 含量低于其他区,这可能与土壤碱性及化工垃圾中含有的可与其发生螯合作用的物质有关。而样品中 Pb,Cu 平均值均达到 II 级标准,所有样品中 Hg 含量均达到 I 级标准。可见,不同的充填复垦模式对不同重金属的含量分布影响不同,但综合来看,A 区这 5 种重金属含量要低于其他区域。

表 3 大通煤矿塌陷区不同复垦模式下不同位置土壤重金属元素含量变化特征

编号	复垦模式 及位置	土壤重金属元素含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
		Hg	Cu	Pb	Cr	Cd
1	A 坡面	28.34	100.64	382.23	1.21	0.02
2	A 坡底	31.53	103.86	397.30	1.20	0.02
3	B 调节池	30.99	103.84	397.22	3.39	0.01
4	B 混合池	29.75	101.69	392.30	5.95	0.02
5	B 澄清池	37.09	107.22	402.66	2.30	0.02
6	B 坡底	28.32	103.90	382.08	5.58	0.04
7	C 坡底	34.19	100.50	389.38	1.20	0.04
8	C 坡面	28.33	100.62	366.78	3.39	0.01
9	C 坡顶	32.07	100.58	382.00	1.20	0.01
平均值		31.18	102.54	387.99	2.83	0.02
标准方差		2.99	2.32	10.96	1.90	0.01
变异系数%		9.60	2.30	2.80	67.10	48.70
淮南土壤背景值		24.20	30.47	64.90	0.06	0.04
环境质量 II 级标准		100.00	350.00	250.00	0.60	1.00

## 2.4 塌陷区土壤肥力及重金属污染修复评价

选取土壤 C% (TC), C/N, H% (TH), TN, TP, 碱解性氮 (AN), CEC, ESP, 速效磷 (AP), 速效钾 (AK), TK, pH 值, 交换性  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  16 个环境因子作为主成分分析评价指标。煤矿塌陷区内土壤环境复杂, 离群数据较多并且分级标准很难界定, 本文采用 SPSS 里 Z-score 标准化方法进行数据标准化, 能客观处理离群数据, 规避主观影响。根据标准化数据再求出各指标相关系数矩阵, 计算出特征值、特征向量和贡献率、累积贡献率, 根据主成分特征值 > 1 的原则提取主成份, 分别为交换性  $Na^+$ , C%, TP, H%, 速效 P, 它们总方差的贡献率之和 80.96%, 即这 5 个主成分能反映出土壤全部指标提供信息的 80.96%。因此, 利用主成分分析土壤肥力状况是可靠的<sup>[18]</sup>。最后得到主成分得分即土壤肥力状况综合得分  $F$ 。主成分是原各指标的线性组合, 各指标的权数为特征向量  $b_j$ , 它表示各单项指标对于主成分的重要程度, 并决定了该主成分的实际意义, 根据主成分计算公式, 可得到 5 个主成分与原 16 项指标的线性组合。

$$F_1 = -0.413TH - 0.883pH + 0.549TN + 0.489TC + 0.497C/N + 0.490AN + 0.179TP + 0.103AP - 0.247AK - 0.025SK + 0.352K^+ - 0.887Na^+ + 0.855Ca^{2+} + 0.498Mg^{2+} + 0.856CEC - 0.803ESP \quad (1)$$

$$F_2 = 0.441TH + 0.176pH + 0.724TN + 0.734TC + 0.666C/N + 0.371AN + 0.360TP + 0.329AP + 0.571AK + 0.658SK + 0.615K^+ + 0.231Na^+ - 0.276Ca^{2+} - 0.577Mg^{2+} - 0.213CEC + 0.223ESP \quad (2)$$

$$F_3 = +0.250TH - 0.064pH + 0.125TN + 0.234TC + 0.189C/N - 0.359AN + 0.668TP + 0.559AP - 0.325AK - 0.307SK - 0.524K^+ - 0.065Na^+ - 0.090Ca^{2+} + 0.245Mg^{2+} - 0.136CEC + 0.151ESP \quad (3)$$

$$F_4 = 0.419TH + 0.138pH + 0.048TN - 0.131TC - 0.203C/N - 0.100AN - 0.156TP + 0.276AP - 0.363AK + 0.357SK + 0.238K^+ + 0.199Na^+ + 0.348Ca^{2+} + 0.203Mg^{2+} + 0.391CEC + 0.299ESP \quad (4)$$

$$F_5 = -0.396TH - 0.017pH - 0.132TN - 0.310TC - 0.320C/N - 0.011AN + 0.379TP + 0.533AP + 0.354AK + 0.198SK + 0.151K^+ + 0.089Na^+ + 0.044Ca^{2+} - 0.038Mg^{2+} + 0.064CEC - 0.163ESP \quad (5)$$

其中(1)~(5)式中 TH, pH, TN, TC, C/N, AN, TP, AP, AK, SK,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  CEC, ESP 分别代表土壤中氢百分含量、酸碱度、氮、碳含量、碳氮比、碱解性氮、总磷、速效磷、总钾、速效钾、交换性钾、钠、钙、镁、阳离子交换容量, 碱化度数据经过标准化后的数值。将标准化数据代入上式, 可得到 5 个主成分的得分,  $F_1$ — $F_5$  分别为交换性钠, 碳含量, 总磷, 氢百分含量, 速效 P 这 5 个主成分得分。再根据:

$$F = \sum b_j F_j = b_1 F_1 + b_2 F_2 + \dots + b_k F_k \text{ 得}$$

$$F = 0.334 F_1 + 0.238 F_2 + 0.103 F_3 + 0.070 F_4 + 0.064 F_5 \quad (6)$$

式中:  $b_j$ ——第  $j$  个因子的方差贡献率;  $F_j$ ——各主成份因子得分。从而求得综合得分  $F$ 。土壤重金属按照 II 级土壤环境质量标准采用内梅罗综合指数法评价结果见表 4。

表 4 大通煤矿塌陷区不同充填复垦模式下不同位置土壤肥力及重金属污染状况

编号	位置	污染指数 $P_i$	污染程度	肥力指数 $F$	肥力状况
1	A 坡面	1.53	轻度	0.51	缺乏
2	A 坡底	1.54	轻度	0.57	缺乏
3	B 调节池	4.15	重度	-0.58	很缺乏
4	B 混合池	7.21	重度	-3.64	很缺乏
5	B 澄清池	2.85	中度	-9.01	极缺乏
6	B 坡底	6.78	重度	-0.35	很缺乏
7	C 坡底	2.99	中度	-0.30	很缺乏
8	C 坡面	8.23	重度	-0.26	很缺乏
9	C 坡顶	1.54	轻度	0.25	缺乏

根据内梅罗综合污染指数计算土壤中重金属污染状况,  $P_i$  (综合)  $\leq 1$  为非污染;  $1 < P_i$  综合  $\leq 2$  为轻度污染;  $2 < P_i$  综合  $\leq 3$  为中度污染;  $P_i$  综合  $> 3$  为重度污染。将土壤肥力  $F$  进行了分级,  $F \leq -5$  为极缺乏;  $-5 < F \leq 0$  为很缺乏;  $0 < F \leq 1$  为缺乏;  $1 < F \leq 2$  为中等;  $2 < F \leq 3$  为丰富;  $F > 3$  为很丰富。

由表 4 可知, A 区重金属为轻度污染, B 区属于中度—重度污染, C 区由于坡度和植被的影响, 重金属污染状况不一。土壤肥力综合得分  $F$  为: A 区  $>$  C 区  $>$  B 区, 综合土壤肥力和重金属污染两大环境因素, 土壤质量修复效果为: A 区  $>$  C 区  $>$  B 区。可见修复后的煤矿塌陷区仍存在严重的土壤环境问题, 用于充填塌陷区的化工垃圾俨然成为该区域内最主要的二次污染源之一。

## 2.5 塌陷区其他土壤环境因素修复评价

研究区内植被类型相对单一, A 区几乎全部为早年人工栽植林, 主要有水杉林、麻栋林、洋槐林、杨树林及侧柏林, 树间距离相等, 树龄一致, 修剪一致, 由

于当年栽种时树木密度大,树木长大后林下透光性差,缺少亚乔木层和灌木层,林下缺少更新层。B区由于土壤偏碱性,且养分丰缺不一,某些盐分含量过高导致植被分布不均,有些地方芦苇异常高壮,有些地方寸草不生使得该区域呈现斑块状植物群落,景观表现差。C区由于煤矸石的持水能力差,营养元素含量低,造成植物生长困难,植被覆盖低。

塌陷区内地形复杂多样,各积水坑之间互不贯通,水质颜色较深,严重富营养化,对周围土壤造成污染。径流几乎全部是干沟,属于季节性径流,景观效果较差,基本表现为冲刷严重,沟深坡陡,很容易造成滑坡和水土流失,生态系统整体表现极差。

目前大通湿地为免费开发的居民休闲娱乐场所,区域内有游客随处丢弃的垃圾,还有市民在林内地挖红土,有的树根已被挖出,根须干枯外露,严重破坏了塌陷区土壤自然修复过程。大通湿地生态区还需加强维护管理。

### 3 结论

(1) 不同充填模式下土壤酸碱度为: $B > A > C$ ;速效磷为: $A > B > C$ ;碱解氮为: $C > A > B$ , Cu, Pb, Cr, Cd, Hg 这5种重金属含量在A区低于其他区域,钾素的变化规律性不强。

(2) 研究区土壤普遍呈现碱性,速效氮、速效磷严重缺乏,部分样点速效钾缺乏,土壤肥力为: $A > C > B$ 。土壤重金属A区为轻度污染,B区属于中度—重度污染,C区由于坡度和植被影响,重金属污染状况不一。土壤Cr, Cd, Cu, Pb总含量不同程度地超过了淮南背景值, Cd超标最为突出, Hg未超出。B区特别是澄清池附近土壤交换性 $\text{Na}^+$ 浓度为其他土壤的3倍,而CEC和交换性 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 浓度显著低于其他区域土壤。

(3) 研究区内植被类型相对单一,地形复杂多样,塌陷水域互不贯通,水质颜色很深,严重富营养化,景观效果较差,基本表现为冲刷严重,沟深坡陡,生态系统整体表现极差。大通湿地生态区还需进一步修复并加强维护管理。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 胡振琪,魏忠义,秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005, 37(1): 8-12.  
[2] Cheng Wei, Bian Zhengfu, Dong Jihong. Soil enzyme

and microbial and properties in mine filling reclamation soil with high groundwater level [M]. International Workshop on Diffuse Pollution: Management Measures and Control Technique. 2010:249-255.

- [3] 李新举,胡振琪,李晶,等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276-280.  
[4] Liu Haibin, Liu Zhenling. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(12): 1331-1340.  
[5] 李海霞,胡振琪,李宁,等. 淮南某废弃矿区污染场的土壤重金属污染风险评价[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 423-426.  
[6] 马祥爱,白中科,秦俊梅,等. 矿区复垦土壤环境质量模糊评价:以平朔安太堡露天煤矿为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 387-389.  
[7] 张治国,严家平,郑永红. 淮南市矿区部分蔬菜中铅污染现状评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(9): 138-141.  
[8] 崔龙鹏,白建峰,史永红,等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 896-904.  
[9] 蔡峰,刘泽功,林柏泉,等. 淮南矿区煤矸石中微量元素的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(8): 892-897.  
[10] 汪明勇,郭小平,张平,等. 矿化垃圾施用林地重金属污染潜在生态风险评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 62-67.  
[11] Dong Jihong, Yu Min, Bian Zhengfu, et al. The safety study of heavy metal pollution in wheat planted in reclaimed soil of mining areas in Xuzhou, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(2): 673-682.  
[12] 高晓云,陈萍. 浅议采煤塌陷区复垦技术研究[J]. 能源环境保护, 2013, 27(1): 14-16, 24.  
[13] 于兆水,胡外英,张勤. 多目标地球化学调查土壤样品中氮和碳的快速测定[J]. 岩矿测试, 2007, 26(3): 235-237.  
[14] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.  
[15] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.  
[16] 王丽艳,韩有志,张成梁,等. 不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6429-6441.  
[17] 王芳,黄玫,孙希华,等. 大小兴安岭林区不同林型土壤养分综合评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 182-187.  
[18] 张水清,黄绍敏,郭斗斗,等. 基于主成分分析法的土壤肥力评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2): 1096-1097.