

粉煤灰充填复垦地理化特性与重金属分布特征研究 ——以淮南洛河电厂粉煤灰复垦地为例

徐良骥¹, 许善文¹, 杨秀芳¹, 严家平¹, Helmut Meuser², Lutz Makowsky²

(1. 安徽理工大学测绘学院, 安徽 淮南 232001; 2. University of Applied Sciences Osnabrück Oldenburger Landstrasse 24D~49090 Osnabrück, Germany)

摘要: 本文以淮南上窑储灰场中的粉煤灰充填复垦地为研究对象, 选择粉煤灰复垦地与灰场周边非复垦区对照地块进行布点采样, 在复垦地中分六层[H₁(0~20 cm)、H₂(20~40 cm)、H₃(40~60 cm)、H₄(60~80 cm)、H₅(80~100 cm)、H₆(100~120 cm)]分别采集土壤、粉煤灰样品并进行监测, 对照地块按照同样方法采样监测, 分析复垦地土壤理化性质和重金属的分布特征。研究结果显示, 随着采样深度的增加, 复垦地 pH 值从 8.21 到 8.49 呈递增的空间分布特征, 各采样层 pH 值均高于对照地块; 随着采样深度的增加, 复垦地的含水量呈增加的空间分布特征, 对照地块的含水量则是先增加后减少, 粉煤灰基质具有良好的保水性能; 养分含量在不同层位存在较大差异, 粉煤灰复垦地速效氮、速效钾含量从 H₁ 至 H₆ 层呈现减少后增加的空间分布特征, 在 H₃ 层处达到最小值 16.23 mg·kg⁻¹、158.97 mg·kg⁻¹, 复垦地各层位的速效氮含量均低于对照地块、速效钾含量均高于对照地块; 复垦地与对照地块的速效磷含量均呈现先减少后增加再减少的空间分布特征, 最大有效磷含量分别为 10.01 mg·kg⁻¹、11.91 mg·kg⁻¹。对比土壤养分分级标准, 复垦地土壤中速效氮、速效磷含量均处于缺乏水平, 应增施磷肥、氮肥或有机肥以增加土壤养分。粉煤灰复垦地表层土壤和粉煤灰中的 Cu、Cr、Pb、Zn、Cd、Ni 等元素中 Cr、Pb、Zn 含量均低于淮南土壤背景值和中国土壤背景值, 其中粉煤灰层中各重金属元素均处于土壤环境质量的二级范围内, 其余各层位重金属元素除 Cd 均处于土壤环境质量标准的一级范围内; 土壤中各重金属元素含量除 Zn 外均低于粉煤灰中的含量, 且粉煤灰层中重金属有向表土迁移的趋势。

关键词: 粉煤灰复垦地; 土壤养分; 重金属元素; 分布特征

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)12-2352-09

Study on Distribution Character of Physical and Chemical Properties and Heavy Metals in Reclaimed Land Filled with Fly Ash: A Case Study of Reclaimed Land of Luohe Power Plant in Huainan City

XU Liang-ji¹, XU Shan-wen¹, YANG Xiu-fang¹, YAN Jia-ping¹, Helmut Meuser², Lutz Makowsky²

(1. Faculty of Surveying and Mapping, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. University of Applied Sciences Osnabrück, Oldenburger Landstrasse 24D~49090 Osnabrück, Germany)

Abstract: For researching the distribution character of physical and chemical properties and heavy metals in reclaimed land, the fly ash reclaimed land in Shangyao fly ash ponds of Huainan City are choosed as research field. The fly ash reclaimed land and normal farmland (as compared farmland block) nearby the reclaimed land are choosed to take samples. During sampling, each sampling block are separated as 6 horizons[H₁(0~20 cm)、H₂(20~40 cm)、H₃(40~60 cm)、H₄(60~80 cm)、H₅(80~100 cm)、H₆(100~120 cm)] to collect samples for analysing physical and chemical properties and heavy metals contents. The result shows that pH values of reclaimed land are increased from 8.21 to 8.49 with the sampling depth increasing, at same horizon, the pH value of reclaimed land is higher than normal farmland. The moisture contents are increased with the samping depth increasing in reclaimed land, but moisture contents of normal land are increased at top horizons then decreased at bottom horizons. Nutrient contents are different at different sampling horizons, available nitrogen and available

收稿日期: 2012-04-13

基金项目: 安徽省自然科学基金; 安徽省国土资源科技项目; 安徽省博士后基金; 安徽省教育厅自然科学基金; 教育部留学回国人员科研启动基金
作者简介: 徐良骥(1978—), 男, 安徽潜山人, 博士、副教授, 主要从事矿山开采沉陷与土地复垦方面教学与研究。E-mail: ljxu@aust.edu.cn

potassium contents of reclamation land are decreased at top horizons then increased at bottom horizons, and minimum value are $16.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $158.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ at H_3 horizon respectively in reclaimed land, the available nitrogen content is lower than normal land at each same sampling horizon, but available potassium content is higher than normal land at each same sampling horizon. The available phosphorus contents in reclaimed land and normal farmland are decreased at top horizons then increased at middle horizons then decreased again at bottom horizons, the maximum content are $10.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $11.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. Compared with soil nutrient national standard, the available nitrogen and available phosphorus contents in reclaimed land are belongs to insufficiency level, the phosphatic fertilizer and nitrogenous fertilizer or organic fertilizer can be used to add the soil nutrient. the analysed result shows that the contents of Cr, Pb, Zn in topsoil and flyash are lower than Huainan soil background value and Chinese soil background values, the contents of Cd, Cu, Cr, Pb, Zn, Ni in fly ash are belongs the second level criterion of national soil quality standard, the contents of Cu, Cr, Pb, Zn, Ni in cover soil are belongs the first level criterion of national soil quality standard, all analysed heavy metal contents in cover soil are lower than heavy metal contents in fly ash except Zn, and heavy metals are migrated from fly ash to coversoil.

Keywords: fly ash reclaimed land; soil nutrient; heavy metal elements; distribution character

淮南矿区是我国十三个亿吨煤基地、六大煤电基地之一,随着矿区煤电一体化进程的加快,燃煤电厂产生的粉煤灰产量也在不断增加,粉煤灰在堆存过程中不仅占用大量土地,还可能造成土壤、水体和生物污染,危害生存环境。据统计 2010 年,淮南市工业固体废弃物总量 2 360.31 万 t,煤矸石产生量 1 479.7 万 t,粉煤灰产生量 721.4 万 t,预计到 2020 年全市燃煤电厂排放量将达 1 044.2 万 t^[1]。目前,国内外对粉煤灰的应用研究主要有作为土壤改良剂、制作肥料、纯灰种植以及作为充填复垦材料。

利用粉煤灰充填煤矿沉陷区或低平地进行土地复垦,既能妥善处理工业固废,又能恢复利用土地,是解决矿区环境与土地资源问题比较合理的途径,其经济、环境效益显著。粉煤灰并非严格意义上的土壤,充填复垦后重构土壤的理化性质与原土壤的理化性质差异、粉煤灰中重金属在复垦及耕作过程中是否会发生迁移污染表层土壤,是目前粉煤灰充填复垦工作中的热点问题,本文旨在通过实例研究分析粉煤灰充填复垦地与对照地块的土壤理化特性与重金属分布特征,为淮南矿区粉煤灰充填复垦地的农业再利用提供一定的科学依据。

淮南上窑灰场是在淮河、窑河相交的低平地上建起的,主要处置田家庵电厂和洛河电厂排出的粉煤灰,占地总面积超过 400 hm^2 ^[2],总储量超过 2000 万 m^3 ,并以每年 200 万 m^3 的速度在增加^[3]。本文的研究区域属于已停用的老灰场的复垦地,总面积约 65 hm^2 ,属于典型的储灰场复垦地,1999 年直接在粉煤灰场进行覆土复垦后用作农业用地,轮作种植小麦和黄豆,覆土厚度实测值为 30~50 cm。本文的研究区域属于同一时期的复垦地,其覆土土源均为周边采石场

渣土、窑河底泥及当地耕作熟土混合土壤,为避免人为因素干扰,本文从 65 hm^2 的复垦地块中间选择了农作物长势中等、不受田间主干道两侧人为因素扰动的小地块(约 0.067 hm^2)作为采样研究区域。

1 材料与方法

1.1 采样点设置与样品采集

土壤样品采集时间为 2010 年 4 月底 5 月初,采样方法为网格布点法。从 65 hm^2 的复垦地选择农作物长势中等、受道路两侧人为因素扰动少的地块(约 0.067 hm^2)作为采样地块。从采样地块东侧、南侧小田埂开始,在地块中按照 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 间距的布设采样格网,格网交点作为采样点,共计 18 个采样点。分别挖取 18 个采样点的土壤剖面,再在各剖面中分 6 层采集各样品,层位分别记为 $\text{H}_1(0 \sim 20 \text{ cm})$ 、 $\text{H}_2(20 \sim 40 \text{ cm})$ 、 $\text{H}_3(40 \sim 60 \text{ cm})$ 、 $\text{H}_4(60 \sim 80 \text{ cm})$ 、 $\text{H}_5(80 \sim 100 \text{ cm})$ 、 $\text{H}_6(100 \sim 120 \text{ cm})$,其中 H_1 、 H_2 层为覆土层,其余为粉煤灰基层,采用土壤剖面采样器在每层取 3 个平行样,将相应层次的 18 个样品混合均匀装袋,密封保存,为每个采样点各层的样品,供试样品共 108 个;同时每个层位采用环刀采集测试土壤含水量,共计 108 个样品。为对比研究复垦地土壤理化性质变化,选取复垦地西边非充填复垦区的耕地为对照实验地块,按照与粉煤灰复垦地相同方法布点分层采样,平行样 3 个,供试样品 18 个。

在小麦生长发育期(3—6 月)观察小麦长势,观测小麦株高平均值 4 次,小麦收割期间,以每个采样点为中心在 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 范围内收割小麦称重后计算平均产量,同时称取 3 个对照地块采样点为中心 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 范围内的小麦产量。

1.2 分析方法

采集的土壤及粉煤灰样品监测项目主要包括含水量、pH 值、有机质和速效 N、P、K 及重金属元素 Cr、Cu、Pb、Zn 含量。具体分析方法如下:(1)含水量采用烘干法测定,方法参照 NY/T 1121.3—2006 附录 A(规范性附录);(2)pH 采用玻璃电极法测定,参照 NY/T 1121.2—2006 土壤监测第二部分;(3)有机质采用重铬酸钾容量法-稀释热法,参照《土壤理化分析实验指导书》^[4];(4)速效氮采用碱水解法,参照《土壤理化分析实验指导书》^[4];(5)速效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠溶液浸提-钼锑抗比色法,参照 GB 12297—1990 石灰性土壤有效磷测定方法;(6)速效钾采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵溶液浸提-火焰光度法,参照 NY/T 889—2004 土壤速效钾和缓效钾含量测定;(7)重金属采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解法,参照《环境监测》^[5]。实验监测结果如表 1 所示,各项检测数据

均为平均值,表 2 是土壤养分分级标准。

2 结果与讨论

2.1 复垦地土壤理化性状分布特征

2.1.1 含水量分布特征

由图 1 可知,随采样深度增加,复垦地含水量呈

表 2 土壤养分分级标准^[6]
Table 2 Grading standard of soil nutrient

级别	项目			
	有机质/%	速效氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
1 很丰富	>4	>150	>40	>200
2 丰富	3~4	120~150	20~40	150~200
3 中等	2~3	90~120	10~20	100~150
4 缺乏	1~2	60~90	5~10	50~100
5 很缺乏	0.6~1	30~60	3~5	30~50
6 极缺乏	<0.6	<30	<3	<30

表 1 各项目监测结果
Table 1 Experimental datas of monitoring items

监测项目		采样层垂直深度/cm					
		H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅	H ₆
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
含水量/%	粉煤灰复垦地	17.23	17.01	22.53	24.01	24.95	26.12
	对照地块	19.23	19.06	25.11	28.65	24.18	22.07
pH	粉煤灰复垦地	8.21	8.24	8.42	8.44	8.47	8.49
	对照地块	8.13	8.18	8.27	8.26	8.21	8.11
有机质/g·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	6.52	5.55	5.02	6.07	5.73	5.56
	对照地块	17.53	11.02	8.06	7.55	6.54	6.81
速效氮/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	39.86	34.50	16.23	21.20	28.12	27.05
	对照地块	77.35	41.05	38.26	40.11	48.95	32.90
速效磷/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	4.22	3.15	8.26	10.01	9.54	8.36
	对照地块	7.86	6.83	6.74	7.30	11.91	11.25
速效钾/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	270.53	220.13	158.97	160.33	168.14	197.24
	对照地块	163.23	160.75	159.92	149.14	143.21	140.09
Cu/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	34.11	33.05	85.23	82.52	82.76	84.54
	对照地块	20.90	21.33	19.24	24.18	24.43	22.41
Zn/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	60.08	62.58	42.26	36.15	38.95	41.20
	对照地块	43.56	47.42	41.69	33.76	35.73	39.29
Pb/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	20.09	21.20	47.56	46.38	46.10	45.90
	对照地块	19.98	20.06	19.99	19.76	20.18	20.21
Cr/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	54.23	61.20	77.54	79.02	78.24	78.95
	对照地块	54.29	55.01	54.36	55.09	55.42	54.95
Cd/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	0.21	0.26	0.30	0.44	0.41	0.53
	对照地块	0.11	0.16	0.09	0.11	0.12	0.10
Ni/mg·kg ⁻¹	粉煤灰复垦地	33.21	48.73	52.19	56.96	50.78	54.20
	对照地块	23.21	27.19	27.00	23.35	19.74	20.49

逐渐增加的空间分布特征,对照地块的含水量呈先增加后减少的空间分布特征。复垦地的粉煤灰基质是电厂湿排粉煤灰,含水量高且具有良好的保水性能^[7],在植物根系提水作用、地表蒸发作用下,深层水分不断地向上层供给,补充表层土壤的水分。对照地块土质属于粘土,且经过多年耕作,地块密实度优于复垦地,复垦地的覆土源自于周边采石场渣土和窑河泥沙,覆土源对表层覆土的持水性影响最为显著,对深层粉煤灰的影响相对较小,整体持水性能低于对照地块。根据经验当土壤含水量为 8%~20%时,土地就适合耕作,复垦地含水量位于 17.01%~26.12%之间,满足耕作条件。

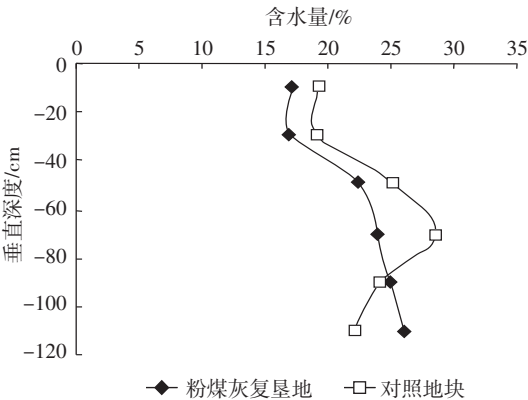


图 1 粉煤灰复垦地与对照地块中含水量分布
Figure 1 Soil moisture distribution of reclaimed land and comparison land

2.1.2 pH 值分布特征

由图 2 可知,随采样深度增加,复垦地 pH 值呈增大的空间分布特征,而对照地块 pH 值则呈先增加后减少的空间分布特征,复垦地各层 pH 值均高于对照地块 pH 值。复垦地 pH 值分布在 8.21~8.49 之间,在覆土施工及耕作过程中,部分粉煤灰可能与表层土壤混合,致使表土层 pH 值升高;同时在土壤水分运动作用下,粉煤灰将在很长的时间内影响其上覆土层的 pH 值。碱性过强的环境,土壤物理结构会遭破坏,土壤水、气、热循环状况会受影响,间接影响了养分转化及其有效性;土壤及粉煤灰的 pH 值也将影响重金属存在形态,抑制根系对高含量重金属的吸收^[8]。

2.1.3 有机质分布特征

由图 3 可知,随采样深度增加,复垦地有机质含量呈先减少后增加至趋于稳定的空间分布特征,对照地块有机质含量呈现迅速减少至趋于稳定的空间分布特征。复垦地下层粉煤灰的有机质含量并不比表层

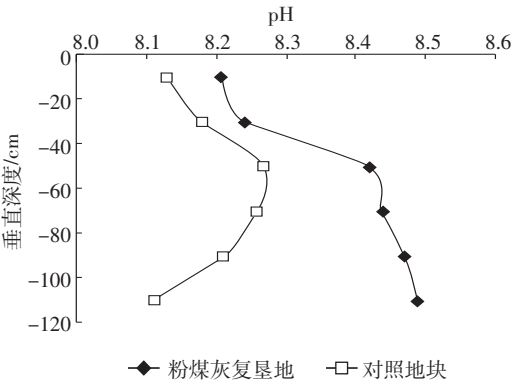


图 2 粉煤灰复垦地与对照地块中 pH 分布
Figure 2 pH value distribution of reclaimed land and comparison land

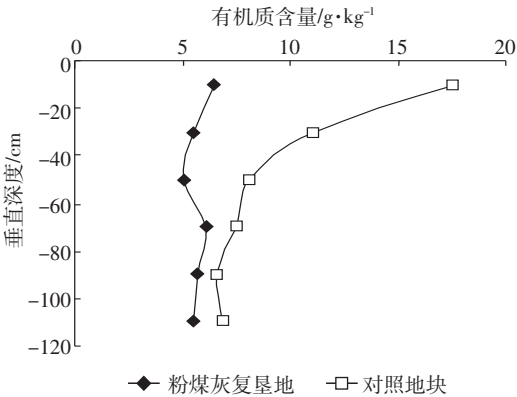


图 3 粉煤灰复垦地与对照地块中有机质分布
Figure 3 Organic matter distribution of reclaimed land and comparison land

土壤地低,甚至高于表土部分层位,体现了粉煤灰充填复垦重构土壤与农业土壤的差别。

有研究表明复垦年限达到 12 年的土壤与农业土壤的有机质含量相似^[9],对比土壤养分分级标准(表 2)分析,对照地块表层土壤的有机质含量处于 4 级,处于缺乏水平,而采样区复垦地有机质含量低于自然熟化土壤有机质的含量,复垦地各采样层有机质含量均小于 0.6%,处于极缺乏水平,分析原因可能为原覆土土质较差和后期土地利用过程中没有很好的积累有机质,因此需要在以后的耕作过程中通过增施有机肥料、秸秆还田、种植绿肥及粮肥轮作等专门措施来提高有机质的含量,适当培肥,可使作物产量明显提高^[10]。

2.1.4 速效氮分布特征

由图 4 可知,随采样深度增加,复垦地速效氮含量呈先减少后增加的空间分布特征,表层土壤里的水解氮含量明显高于粉煤灰的速效氮含量。对比土壤养

分分级标准,复垦地表层土壤速效氮含量处于很缺乏水平、粉煤灰速效氮含量处于极度缺乏水平。复垦地虽经过 12 年的耕作田间管理施肥,但各层土壤随着时间的推移,速效氮含量没有明显提高,其含量远低于对照地块的含量,应专门增施氮肥和有机肥。

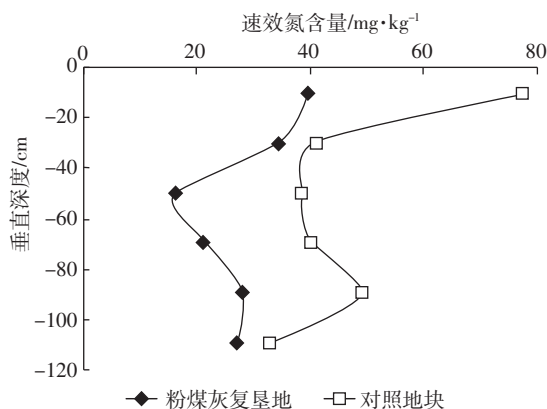


图 4 粉煤灰复垦地与对照地块中速效氮含量分布

Figure 4 Rapidly available nitrogen value distribution of reclaimed land and comparison land

2.1.5 速效磷分布特征

由图 5 知,随采样深度增加,复垦地与对照地块的速效磷含量均呈现先减少后增加再减少的空间分布特征,复垦地表层土壤速效磷含量要远低于粉煤灰层的含量。对比土壤养分分级标准,复垦地表层土壤中速效磷含量处于很缺乏水平、粉煤灰速效磷含量处于缺乏水平。研究发现复垦地表层土壤缺磷严重,低于对照地块水平,说明粉煤灰复垦土壤需要增施磷肥,以改善土壤养分状况。同时土壤 pH 值对速效磷含量的影响较大,pH 值越高速效磷含量越低,碱性土壤磷的活化程度低^[11],这也在一定程度上降低了复垦

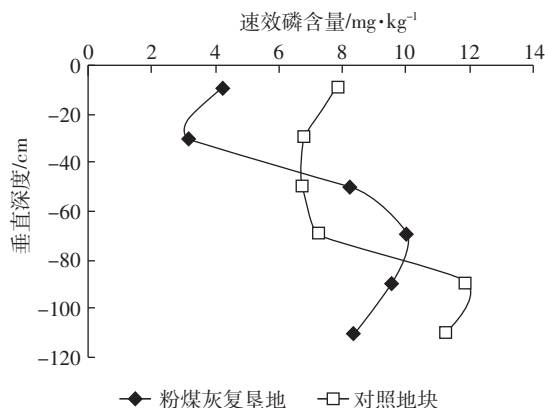


图 5 粉煤灰复垦地与对照地块中速效磷含量分布

Figure 5 Rapidly available phosphorus value distribution of reclaimed land and comparison land

地土壤速效磷含量。

2.1.6 速效钾分布特征

由图 6 可知,随采样深度的增加,复垦地速效钾含量呈现先减少后增加的空间分布特征,对照地块速效钾含量呈缓慢递减的空间分布特征。采样时冬小麦处于拔节孕穗期,是冬小麦快速生长期,其根系在趋肥性和重力作用下向粉煤灰层生长以吸收大量的钾素,而粉煤灰中的速效钾较多,较易被作物吸收,随着水分的蒸发,会上升至表层土壤供作物吸收,因而复垦地速效钾含量在 H₃ 层达到最小值。

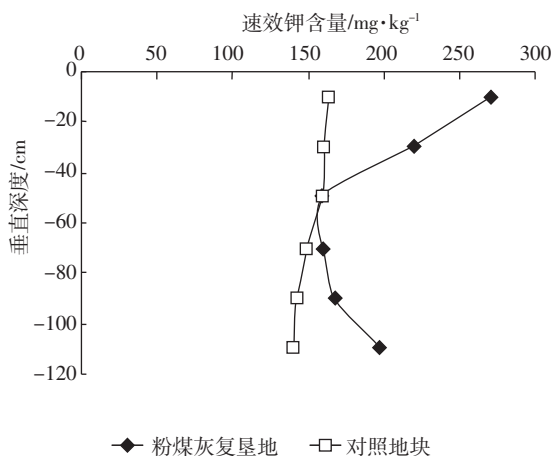


图 6 粉煤灰复垦地与对照地块中速效钾含量分布图

Figure 6 Rapidly available potassium value distribution of reclaimed land and comparison land

粉煤灰中含有丰富的钾源,全钾含量甚至高达 5000~18 000 mg·kg⁻¹,通过释钾效应,粉煤灰中的钾元素可转化为有效态钾,并随着土壤水分蒸发由下至上缓慢向表土运移,供植物吸收利用^[12]。复垦地经过 12 年的耕作,表层土壤和粉煤灰基质里的速效钾维持了较高的含量水平,对比土壤养分分级标准,分别处于很丰富和丰富水平,超过了对照地块的含量,因此无需专门增施钾肥。

2.2 复垦地土壤重金属元素分布特征

淮南矿区已有近百年的煤炭开采历史,对淮南大通、潘集等矿区的研究表明,矿区土壤中的重金属含量均没有超过国家土壤环境质量二级污染标准^[13],对于粉煤灰复垦地而言,当粉煤灰中微量元素进入土壤超过其临界值时,土壤不仅会向环境输出污染物,使其他环境要素受到污染,而且土壤的组成、构成及功能均会发生变化。

2.2.1 Cu 元素分布特征

Cu 含量分布如图 7 所示,对照地块 Cu 含量在淮

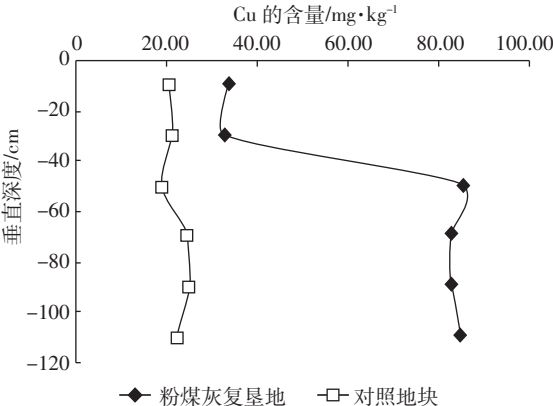


图 7 粉煤灰复垦地中 Cu 的分布

Figure 7 Distribution map of Cu value of reclaimed land

南土壤背景值($24.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)范围之内,远小于粉煤灰中 Cu 的含量,与对照地块比较发现,复垦地土壤剖面位置上含 Cu 量呈不断增大的空间分布特征。表层土壤 H_1 、 H_2 层 Cu 含量小于其他层位,粉煤灰各层中 Cu 含量普遍较高且在 H_3 、 H_4 、 H_5 层间呈很微弱的递减趋势,说明铜随着土壤水分的蒸发向上层缓慢迁移,但迁移能力微弱。

对比《土壤环境质量标准》^[14]可知,经过 12 年耕作,粉煤灰复垦地表层土壤中 Cu 的含量虽高于淮南土壤背景值($24.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和中国土壤背景值($22.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但仍在土壤环境质量一级标准($35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)范围内;粉煤灰中 Cu 的含量在土壤环境质量二级标准($100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)范围内,说明在本研究区中,粉煤灰复垦地 Cu 元素不会单独对土壤构成污染。

2.2.2 Cr 元素分布特征

由图 8 可知,对照地块 Cr 含量随垂直深度的增加变化不大,均在 $60.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以内,表层与粉煤灰

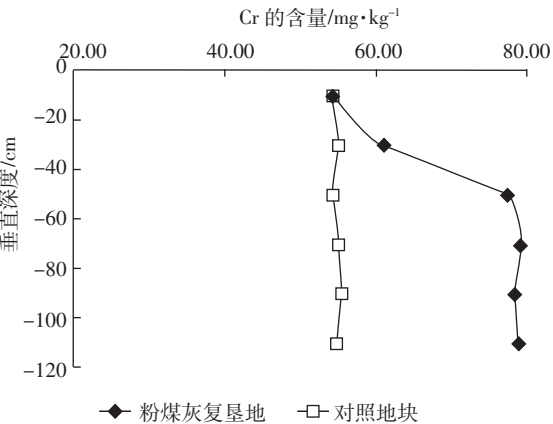


图 8 粉煤灰复垦地中 Cr 含量分布

Figure 8 Distribution map of Cr value of reclaimed land

复垦地含量相差不大,在 H_2 层以下含量明显小于复垦地的 Cr 的含量;粉煤灰复垦地随采样深度的增加,Cr 的含量呈先增加后减少的空间分布特征。原因为土壤的酸碱程度可以改变 Cr 的化合物形态,由于复垦地各层土壤均偏碱性且随着采样深度增加 pH 值不断增加,深层粉煤灰中的 Cr^{3+} 会化合成 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 沉淀而失去活性,从而降低了 Cr 的迁移能力,但仍会有微量的 Cr 随着水分运动缓慢向上运移,致使 H_2 层中 Cr 的含量比 H_1 增大。

对比土壤环境质量标准,粉煤灰复垦地表层土壤中 Cr 含量低于淮南土壤背景值($64.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), H_2 层 Cr 含量略高于中国土壤背景值($61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);但表层土壤与粉煤灰中的 Cr 含量仍在土壤环境质量一级标准范围($90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)之内,说明在本研究区中,Cr 不会单独对土壤造成污染,可以维持自然背景的土壤环境质量。

2.2.3 Pb 元素分布特征

由图 9 可知,对照地块重金属含量在 H_1 层和 H_2 层与粉煤灰复垦地 Pb 含量相当,在 H_2 层以下 Pb 含量明显下降,这是由于粉煤灰中含有较大的 Pb 元素;粉煤灰中 Pb 的含量远远高于覆土中 Pb 的含量,而在同一介质中 Pb 的含量基本相同,粉煤灰层中 Pb 的含量随取样深度的增加呈微弱的递减趋势。这是因为粉煤灰中 Pb 含量较高,主要以 $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ 或 PbCO_3 形态存在,而可溶态的 Pb 含量很低^[15],在土壤水分作用下,Pb 向上的迁移量微小。

对比土壤环境质量标准,粉煤灰复垦地表层土壤中 Pb 的含量低于淮南土壤背景值($30.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和中国土壤背景值($26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),在土壤环境质量一级标准范围($35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)之内;粉煤灰层中 Pb 含量略高

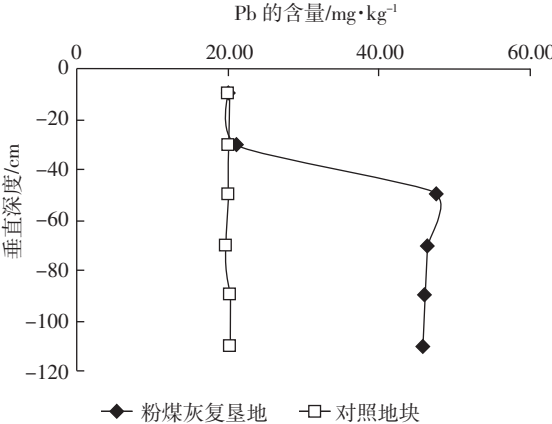


图 9 粉煤灰复垦地中 Pb 含量分布

Figure 9 Distribution map of Pb value of reclaimed land

于一级标准限值,只占土壤环境质量二级标准($350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的13%左右,说明在本研究区中Pb不会单独对土壤构成污染。

2.2.4 Zn元素分布特征

由图10可知,在 H_1 至 H_2 层对照地块的Zn含量明显小于粉煤灰复垦地,低于淮南土壤背景值($80.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),在 H_3 至 H_6 层,相对应层位上Zn含量略低于粉煤灰复垦地;粉煤灰复垦地表层土壤中Zn的含量高于粉煤灰层,且土灰交界处的 H_2 层(20~40 cm)中Zn含量比其他各层稍高,说明Zn元素随着复垦时间的增加,逐渐在这一层富集。原因可能是田间耕作施加的肥料增加了表层土壤中Zn含量,锌元素随着水分渗透向下转移,粉煤灰中锌元素随着水分的蒸发向上运动,导致表层土壤与粉煤灰交界处(H_2 层)锌元素富集。

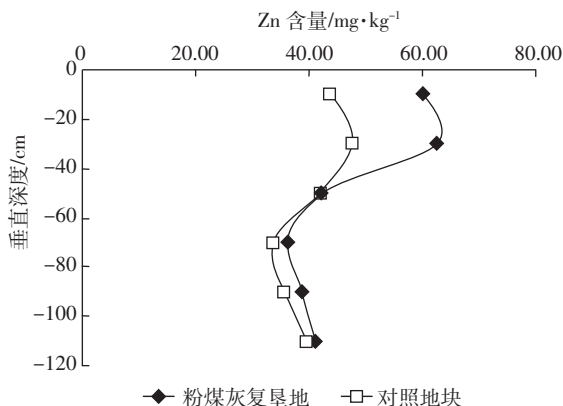


图10 粉煤灰复垦地中Zn含量分布

Figure 10 Distribution map of Zn value of reclaimed land

对比土壤环境质量标准,粉煤灰复垦地表层土壤和粉煤灰中Zn含量均低于淮南土壤背景值($80.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和中国土壤背景值($74.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),且在土壤环境质量一级标准范围($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)内,说明在本研究区中锌不会单独对土壤构成污染,可以维持自然背景的土壤环境质量。

2.2.5 Cd元素分布特征

Cd含量如图11所示,对照地块的Cd含量远远低于粉煤灰复垦地上Cd的含量,均在 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右,而复垦地土壤剖面位置上Cd含量随着深度的增加呈递增的空间分布特征。 H_1 土层中Cd的含量较 H_2 土层中Cd的含量低的另一个原因是:由于覆土太薄,在耕作的过程中 H_3 层的粉煤灰与 H_2 层的土壤混合,致使 H_2 层中Cd的含量增大。 H_3 层中的Cd主要受排灰场粉煤灰中Cd含量影响,新鲜湿排粉煤灰中

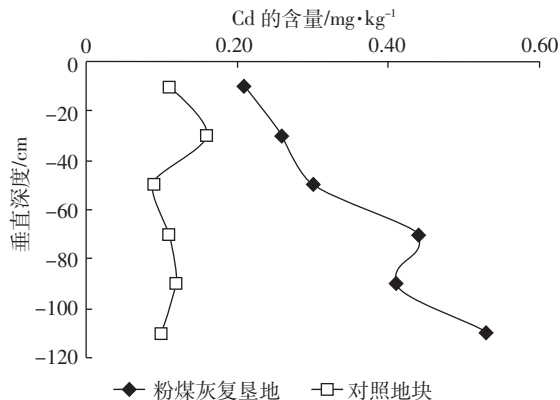


图11 粉煤灰复垦地中Cd含量分布

Figure 11 Distribution map of Cd value of reclaimed land

的Cd含量分布在 $0.32 \sim 0.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[16], H_3 层中的Cd含量相对于此值有明显的减少,反映出Cd有随着水分的蒸发以及微生物的活动向上迁移的趋势。

对比土壤环境质量标准,粉煤灰复垦地表层土壤和粉煤灰中Cd虽在土壤环境质量二级标准范围($0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)内,但含量远高于淮南土壤背景值($0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和中国土壤背景值($0.097 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),体现出在本研究区中Cd污染的累积性,应予以重视。

2.2.6 Ni元素分布特征

Ni含量如图12所示,对照地块上表层土壤中Ni的含量明显低于粉煤灰复垦地的含量,并在相对应于粉煤灰层位上的Ni含量呈减小的趋势;而粉煤灰复垦地土壤剖面随着深度的增加,Ni的含量呈先急剧增加再趋于平稳,转折点在 H_4 层。这是因为粉煤灰中镍主要以稳定的残渣态的形式存在,可溶态镍的含量较少,致使Ni的溶出少而迁移能力较弱。 H_1 土层中Ni的含量较 H_2 土层中Ni的含量低,是由于覆土太薄,在耕作的过程中 H_3 层的粉煤灰与 H_2 层的土壤混

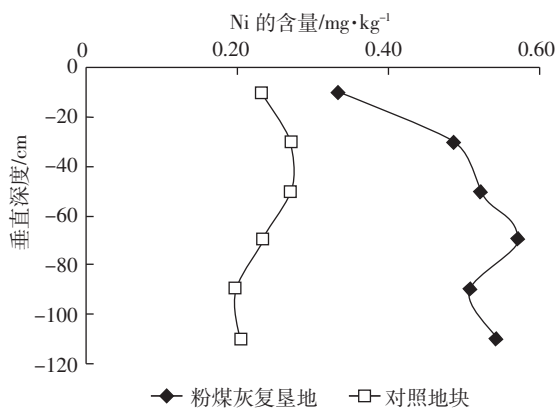


图12 粉煤灰复垦地中Ni含量分布

Figure 12 Distribution map of Ni value of reclaimed land

合,致使 H₂ 层中 Ni 的含量增大。

对比土壤环境质量标准,粉煤灰复垦地各层 Ni 的含量均高于淮南土壤背景值(25.7 mg·kg⁻¹)和中国土壤背景值(26.9 mg·kg⁻¹),其中 H₁ 层仍处于国家规定的土壤一级标准(40 mg·kg⁻¹)范围之内,其余各层均在二级标准(60 mg·kg⁻¹)范围之内,说明在本研究区域中 Ni 对土壤的环境质量已经构成了潜在的威胁。

2.2.7 复垦地各重金属垂向分布特征的差异性分析

对粉煤灰复垦地中各重金属元素在垂直方向上的相互关系进行相关性分析,由图 7~图 11 及表 3 可看出,除锌元素与其他 5 种元素呈显著负相关外,其他 5 种元素均呈显著正相关,相关系数在 0.75 以上,表明复垦地中各重金属元素在垂直方向上的分布表现出较高的一致性。除锌外,其余 5 种元素覆土中的含量要低于粉煤灰层中的含量;H₁ 层中重金属的含量低于 H₂ 层中重金属的含量;粉煤灰层中各重金属的含量随深度的增加变化幅度很小,各元素的性质不同导致各元素在垂直方向上的分布情况有差异。

表 3 粉煤灰复垦地垂直方向上各种重金属之间的相关系数
Table 3 The correlation between each heavy metal in vertical direction of fly ash reclaimed

项目	Cu	Cr	Pb	Zn	Cd	Ni
Cu	1	0.974	0.998	-0.974	0.777	0.762
Cr	0.974	1	0.981	-0.951	0.822	0.883
Pb	0.998	0.981	1	-0.974	0.765	0.785
Zn	-0.974	-0.951	-0.974	1	-0.791	-0.743
Cd	0.777	0.822	0.765	-0.791	1	0.748
Ni	0.762	0.883	0.785	-0.743	0.748	1

2.3 小麦长势与产量分析

图 13 为粉煤灰复垦地和对照地块的小麦株高观测值,试验共观测了 4 次(3 月 3 日、4 月 3 日、5 月 3 日、6 月 3 日)小麦株高,3—4 月,两地块小麦长势基本一致,5—6 月复垦地的小麦长势逐渐与对照地块出现差异直至收割。复垦地由于覆土厚度较薄的影响,导致 5—6 月气温升高时,土壤中的水分和养分不能与对照地块一样维持小麦的正常生长,同时又由于底层粉煤灰的保水保肥性较差,从而导致其小麦长势弱于对照地块。粉煤灰复垦地上小麦产量均值为 0.469 kg·m⁻²,对照地块为 0.549 kg·m⁻²,粉煤灰复垦地小麦产量偏低,结合复垦地对对照地块的土壤理化特性及作物产量分析,对照地块的土壤环

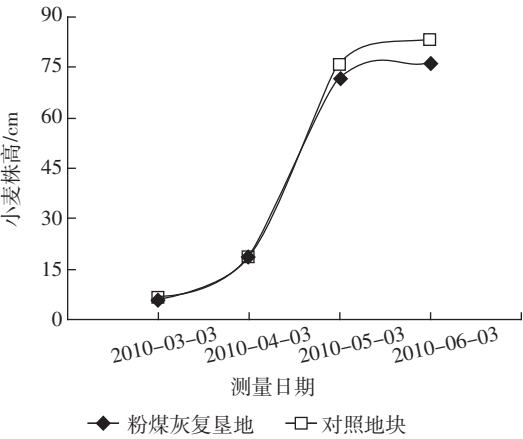


图 13 小麦株高分析

Figure 13 Plant height analyses of wheat

境相对于复垦地更适于小麦生长需求。相关研究表明淮南矿区粉煤灰复垦地种植农作物的子实受重金属影响表现为无污染或较小污染^[17]。

3 结论

(1)复垦地 pH 值随采样深度增加呈现从 8.21 到 8.49 递增的空间分布特征,各层 pH 值高于对照地块;随采样深度增加复垦地含水量呈现增加的空间分布特征,粉煤灰基质具有良好的保水性能;随采样深度增加,粉煤灰复垦地速效氮、速效钾含量呈现先减少后增加的空间分布特征,复垦地与对照地块的速效磷含量均呈现先减少后增加再减少的空间分布特征,复垦地各层位的速效氮含量低于对照地块、表层土壤速效磷远低于对照地块水平、各层位速效钾含量均高于正常地块。

复垦地经过 12 年的耕作,速效氮与速效磷含量仍远低于正常地块,对比土壤养分分级标准均处于缺乏水平,因此需增施磷肥、氮肥和有机肥等肥料以增加土壤养分,恢复土地使用功能。

(2)监测结果显示,对照地块各种金属元素含量均在淮南土壤背景值范围之内,低于粉煤灰复垦地的重金属元素含量;粉煤灰复垦地表层土壤和粉煤灰中的 Cu、Cr、Pb、Zn、Cd、Ni 等元素中 Cr、Pb、Zn 含量均低于淮南土壤背景值和中国土壤背景值,其中粉煤灰层中各重金属元素均处于土壤环境质量标准的二级范围内,其余各层位重金属元素除 Cd 外,均处于土壤环境质量标准的一级范围内。

(3)随取样深度的增加复垦地中各重金属元素的分布表现出较高的一致性,粉煤灰中重金属均有向上迁移的趋势,除 Zn 外,其他重金属迁移能力均较弱,

且表土中其他监测的重金属含量均小于充填基质粉煤灰中的含量。

(4)复垦12年的土地与非复垦地农作物长势与产量观测结果显示,研究区域内粉煤灰复垦地小麦的长势劣于对照地块,其产量低于对照地块,粉煤灰复垦地的土壤环境相对正常土壤来说不利于小麦的生长,应当在耕种过程中注意增加土壤肥力。

参考文献:

- [1] 史永红. 淮南粉煤灰环境影响及沉陷地生态修复模式初探[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2005.
SHI Yong-hong. Environmental impact of hazardous elements in coal-combustion by-products and pilot discussion on the ecological restoration mode of coal-mining subsidence in Huainan[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2005.
- [2] 任平, 赵志根, 臧传宝. 浅析淮南市粉煤灰的资源化利用[J]. 煤炭工程, 2010, 27(2):53-55.
REN Ping, ZHAO Zhi-gen, ZANG Chuan-bao, et al. Analysis of fly ash utilization in Huainan City [J]. *Coal Engineering*, 2010, 27(2):53-55.
- [3] YANG Xiu-fang, YAN Jia-ping, LIU Xin-yao, et al. Spatial distribution of heavy metals in fly ash reclamation[M]//International Workshop on Diffuse Pollution Management Measures and Control Technique. 2010: 240-243.
- [4] 北京林业大学. 土壤理化分析实验指导书[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
Beijing Forestry University. The experimental instructions of soil physical and chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002.
- [5] 奚旦立. 环境监测[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
XI Dan-li. Environmental monitoring[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [6] 全国土壤普查办公室. 全国第二次土壤普查暂行技术规程 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1979.
National Soil Survey Office. Second national soil survey provisional technical regulations of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1979.
- [7] 刘长瑜, 孙守栋, 刘学山, 等. 粉煤灰充填采煤塌陷地覆土还田的实践与探讨[J]. 土地资源(国际土地复垦学术研讨会专辑), 2000:20-22.
LIU Chang-yu, SUN Shou-dong, LIU Xue-shan, et al. Study on land reclamation by filling coal mining subsided area with fly ash and soil[J]. *Land Resources(Album of International Land Reclamation Symposium)*, 2000:20-22.
- [8] 董霁红, 卞正富, 于敏, 等. 矿区充填复垦土壤重金属分布特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(3):335-341.
DONG Ji-hong, BIAN Zheng-fu, YU Min, et al. Distribution of heavy metals in reclamation soils of mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(3):335-341.
- [9] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛, 等. 粉煤灰充填复垦土壤理化性状研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 639-643.
HU Zhen-qi, QI Jia-zhong, SI Ji-tao, et al. The study of soil physical-chemical properties in fly ash filling reclamation land[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(6):639-643.
- [10] 王兆锋, 冯永军, 张雷娜. 粉煤灰农业利用对作物影响的研究进展[J]. 山东农业大学学报, 2003, 34(1):152-156.
WANG Zhao-feng, FENG Yong-jun, ZHANG Lei-na. Advances in studies in effects of fine coal ash on agriculture crops [J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science)*, 2003, 34(1):152-156.
- [11] 朱江, 周俊. 粉煤灰对土壤中有效磷的影响[J]. 农业环境保护, 1999, 18(4):189-191.
ZHU Jiang, ZHOU Jun. The effects of available phosphorus by fly ash in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1999, 18(4):189-191.
- [12] 毕银丽, 胡俊波, 王震, 等. 释钾菌的筛选及其对粉煤灰的释钾效应[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(6):1141-1144.
BI Yin-li, HU Jun-bo, WANG Zhen, et al. Potassium-dissolving bacteria isolated and their effects release available K in coal fly ash[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2010, 29(6):1141-1144.
- [13] 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.
CUI Long-peng, BAI Jian-feng, SHI Yong-hong, et al. Heavy metals in soil contaminated by coal mining activity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6):896-904.
- [14] GB/T 15618—1995. 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社.
GB/T 15618—1995. Soil environmental quality standards[S]. Beijing: Standards Press of China.
- [15] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛, 等. 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 Zheng-qi, QI Jia-zhong, SI Ji-tao, et al. Contamination and assessment of heavy metals contamination and assessment of heavy metals [J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2):214-218.
- [16] 樊雯. 基于粉煤灰充填复垦土地的复垦效应研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
FAN Wen. Study on reclamation effect based on reclaimed land filling with fly ash[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2010.
- [17] 张晶, 李敏, 杨海燕, 等. 粉煤灰充填复垦下大豆和玉米的生长状况及环境风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8):1586-1593.
ZHANG Jing, LI Min, YANG Hai-yan, et al. Evaluation of soybean and corn growth and environmental risk in different patterns of reclaimed land filled with fly ash[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8):1586-1593.