

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

张 晶¹, 李 敏^{1*}, 杨海燕², 崔龙鹏²

(1.北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083; 2.安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了解粉煤灰充填复垦下农作物的生长状况, 阐明复垦方式对土壤和农作物中重金属含量的影响, 以淮南田集电厂粉煤灰为例, 采用不同的覆土方式, 以全土为对照, 在 5 块试验田种植大豆和玉米, 定期观察其长势, 并利用 ICP-AES 和 HF-AFS 测得种植农作物后土壤、粉煤灰、大豆和玉米的茎叶和果实中的重金属含量。结果表明, 各种充填方式下, 表层土壤大部分重金属含量降低, 而 Hg 和 Se 含量增多, 并表现出随覆土厚度增大而减少的趋势; 复合充填下层土壤中 Hg 的污染指数为 5.732, 明显高于其他充填方式; 在覆土 30 cm 的充填方式下, 农作物的株高大于其他覆土方式; 并且在覆土 30、50 cm 方式下, 作物的茎叶和果实中所含的重金属的量比较接近全土种植下作物中重金属水平。所以, 相对于 50 cm 的覆土方式, 覆土 30 cm 充填方式是采煤塌陷地带生态修复和燃煤电厂粉煤灰处置较为经济的方式, 也是对农作物中重金属元素影响较小的措施。

关键词: 种植试验; 粉煤灰; 重金属; 生态修复

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2011)08-1586-08

Evaluation of Soybean and Corn Growth and Environmental Risk in Different Patterns of Reclaimed Land Filled with Fly Ash

ZHANG Jing¹, LI Min^{1*}, YANG Hai-yan², CUI Long-peng²

(1.School of Environmental Science and engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: In this study, fly ashes were used to reclaim the coal mining subsidence lands to investigate the growth situations of soybeans and corns. The concentrations of heavy metals in soils and crops of the reclaimed lands were also observed. The reclamation included four patterns with 20 cm, 30 cm, 50 cm and interlayers of soil covers respectively. Half soybeans and half corns were planted on each of the four reclaimed lands, as well as on a control field with ordinary local soils. The results showed that the concentration of most heavy metals decreased in surface soil layer, except for Hg and Se and the pollution index of Hg in subsoils of interlaid covering reclamation was 5.732 and significantly higher than those in other treatments. The plant height of crops in 30 cm soil covered reclamation was greater than those of other treatments. Furthermore, the concentrations of heavy metals in stem-leaves and grains of crops in reclaimed lands with 30 cm and 50 cm soil covers were As a result, compared with other treatments, the treatment with 30 cm soil covers was more suitable for Huainan restoration of the subsidence lands due to its more economic treatment and lower heavy metals contamination to crops.

Keywords: planting tests; fly ash; heavy metals; ecological restoration

收稿日期: 2011-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(50709001); 安徽省“十一五”科技攻关项目(06013065A)

作者简介: 张 晶(1985—), 女, 在读博士, 主要从事环境污染机制和治理研究。E-mail: bettyallen520@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 李 敏 E-mail: liminbjfu@126.com.cn

淮南市位于安徽省北部,是华东大型能源工业城市,多年来大规模的煤炭开采和燃煤发电推动了经济的发展,带来了可观的经济效益,然而也引发了一系列的生态环境问题,包括大量采煤沉陷地的形成和固体废弃物粉煤灰的堆积,使得淮南的环境状况日趋恶化。仅田集区域内,目前煤炭年产量2 300万t,采煤沉陷地面积已达1 067 hm²左右,煤电工业固废(主要为煤矸石和粉煤灰)产生量不断增加,2007年煤电工业固体废物年排放量1 519万t,预计到2020年可达3 246万t。

粉煤灰之所以能够在农业方面广泛应用,首先因为粉煤灰是理想肥料,其中含有N(0.02%~0.05%)、P(0.2%~0.8%)、K(2.7%~3%)、Ca(1%~8%)、Fe(6%~7.2%)以及Co、B、Mn、Cu、Zn、Mn等对农作物生长有利的微量元素^[1];其次,粉煤灰是形状不规则的颗粒物,具有松散性,能够改良土壤;除此之外,粉煤灰吸热性能好,能够提高地温,促进早出苗。德、美、英、澳等国家自20世纪20年代开始对矿山开采扰动的土地进行修复和利用,并逐渐形成了土地复垦技术,但不同的国家对修复后土地的利用模式有所不同,如美国的复垦技术主要用于恢复土地破坏前的形貌和生态状态,而很少再次用于农业生产,英国通过参考“土壤污染物指导限值”为污染土地的修复利用提供指导^[2]。粉煤灰用于土地复垦,既能妥善处理工业固废,又能恢复土地,是解决矿区环境问题比较合理的途径。由于粉煤灰中的重金属通过食物链进入作物,进而对人体健康产生影响,已经引起众多学者的关注。Haynes总结了前人的研究成果,得出粉煤灰用于复垦后,植物组织中的Mn、Zn、Cr、Cd含量减少,而As和Se有所积累,作物中As和Se的含量分别超过3.4 mg·kg⁻¹和5 mg·kg⁻¹很可能对牲畜产生毒害^[3]。我国从20世纪70年代开始研究粉煤灰的农用,目前已取得了一定进展。孙克刚等^[4]向每667 m²土地施用40 t粉煤灰,在砂姜黑土中小麦、玉米轮作,发现小麦、玉米等作物植株内Pb、Cd、Cr、Hg、As等重金属含量与对照田相比,未有显著差异,不同年份之间差异也不明显,均未超过国家食品卫生标准;有害元素在作物植株各器官的分布大体是根>叶>茎>籽粒。

我国将粉煤灰用于充填复垦的实例较多,例如安徽淮北、河北唐山、江苏徐州等矿区^[5],然而研究发现^[6]随着复垦时间的增加,表层复垦土壤的污染指数表现出递增趋势,粉煤灰中Cr、Ni等重金属元素能够累积于土壤中,进而通过根系吸收作用进入农作

物体内。所以,粉煤灰用于充填复垦带来的农作物的安全性问题值得关注,本文旨在通过设计不同的充填方式,覆土种植大豆和玉米,观察其长势和测定不同部位重金属含量,探寻最优的覆土方式,为淮南采煤沉陷地的农业再利用提供科学依据,对科学利用粉煤灰和农产品安全性评估具有一定的理论意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

项目区属于淮北平原,北亚热带半湿润季风型气候。年平均气温为14.3~16.4℃,年平均降水量937.2 mm,以8—9月降水量最多,占全年的25.7%,年平均蒸发量为1 493.7 mm,平均年日照时数为2 279.2~2 323.1 h,年无霜期地域平均为223 d,具有光能充裕、热量丰富、无霜期长、雨热同期的特点,有利于各种植物生长。试验田位于2004、2005年田集采煤沉陷地复垦项目区内,面积约为500 m²,北侧为矸石路,东侧有一小河,试验田概况见图1。

试验田土壤基本性状:土样取自正常农田,属黄棕壤,土壤质地粉砂质粘土,密度1.13 g·cm⁻³,pH7.5左右,含速效磷16.23 mg·kg⁻¹、速效钾229.7 mg·kg⁻¹、有机质15 160 mg·kg⁻¹,重金属含量见表1。

试验田粉煤灰基本性状:粉煤灰样取自田集电厂,呈灰白色,密度2.0~2.3 t·m⁻³,松散干容重550~650 kg·m⁻³,比表面积2 700~3 500 cm²·g⁻¹,孔隙率60%~75%,主要成分为SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃。电厂粉煤灰中重金属含量(mg·kg⁻¹):As 19.69、Cd 0.07、Cr 60.61、Cu 171.2、Hg 0.175、Mn 53.87、Pb 63.94、Se 26.08、Zn 116.0,而有机质含量极低。

供试玉米品种为天塔212,供试大豆品种为淮豆

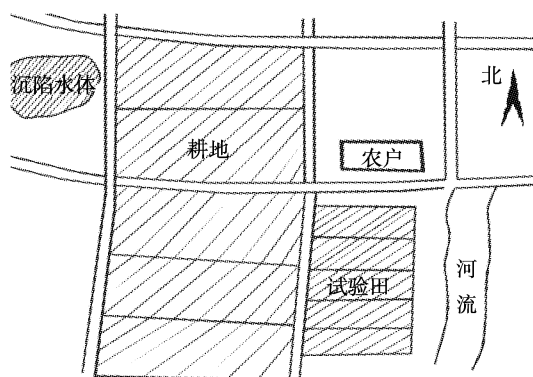


图1 试验田概况

Figure 1 Map of testing field

7 号。玉米株距 0.5 m,行距 0.8 m;大豆株距 0.25 m,行距 0.4 m。玉米和大豆同时于 5 月上旬播种,均为 8 月中旬收获,在此期间正常耕作,提供充足的水肥。在农作物生长周期内观察其长势情况,做好记录。

1.2 覆土方式

将试验田平均分成 5 块,每一小块试验田分别种植玉米和大豆,各占 1/2 面积。具体充填方式的剖面构造见图 2。

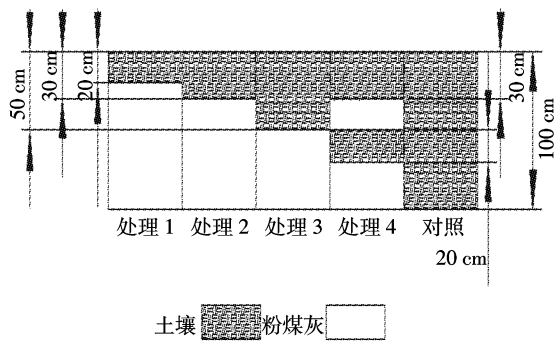


图 2 试验田充填方式剖面图

Figure 2 Profile map of the filling plots in testing field

1.3 样品采集和处理

1.3.1 样品采集

在每小块试验田,分别采集种植农作物后的土壤层中部的样品,根据试验田的面积和形状,采用对角线取样法,多点混合土壤样;粉煤灰样品取自粉煤灰层的上层和下层,充分混合;在作物生长周期,采集每块样地种植作物的茎叶、果实。各种测试 3 次重复。

1.3.2 样品处理

土壤样品在室温条件下风干,风干后的土壤样品和粉煤灰样品,研磨过 100 目筛,用于重金属测定;在仪器分析前,样品需要经过消解处理,As、Se 和 Hg 分

析用王水消解^[7],其他元素分析采用 HNO₃+HClO₄+HF 三酸消解。

植物样品在室温条件下风干后,用粉碎机制成粉末状,无需过筛,直接用于重金属含量测定;植物样品中 As、Se 和 Hg 分析用逆王水消解(HCl:HNO₃=1:3),其他元素分析用王水消解。

1.4 分析方法

电感耦合等离子原子发射光谱仪(ICP-AES,型号 POEMS II),仪器参数:功率 1 150 W,冷却气流量 15 L·min⁻¹,辅助气 0.50 L·min⁻¹,雾化气 0.45 L·min⁻¹,泵速 100 r·min⁻¹。

原子荧光光谱仪(AFS,型号 AF-640),用于 As、Se 和 Hg 的分析,仪器参数:PMT 电压 290 V,HCL 主阴极电流 A-0 mA、B-80 mA,HCL 辅助阴极电流 A-0 mA、B-20 mA,载气流量 700 mL·min⁻¹,原子化器温度 200 ℃,读数时间 16.0 s,延时时间 1.0 s。

采用 Microsoft Excel 软件进行数据处理;采用 Origin 6.0 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤和粉煤灰中重金属含量

根据我国农用粉煤灰中污染物控制标准(GB 8173—1987)和奚旦立等 in 环境监测卷中提到的“中国环境优先污染物黑名单”^[8],筛选出 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Mn、Pb、Se、Zn 9 种元素作为污染控制因子,进行环境污染评价。

测试所用土壤和粉煤灰样品均为种植农作物后的样品,所含重金属含量见表 1。复垦土壤中重金属含量较当地土壤变化不大,相对于当地土壤,由于降水的淋溶作用,表层土壤中重金属 As、Cd、Cr、Mn 和

表 1 试验田土壤和粉煤灰中重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Concentration of heavy metals in testing field soils and fly ash(mg·kg⁻¹)

	土壤					粉煤灰					当地土壤	土壤一级	GB/8173—1987
	20 cm 覆土	30 cm 覆土	50 cm 覆土	复合充填上	复合充填下	20 cm 覆土	30 cm 覆土	50 cm 覆土	复合充填上	复合充填下			
As	6.591	7.709	6.336	8.152	3.611	0.508	1.346	1.331	0.523	0.433	9.853	15.00	75.00
Cd	0.025	0.028	0.024	0.029	0.030	0.024	0.024	0.025	0.027	0.028	0.037	0.200	10.00
Cr	42.92	65.77	40.24	53.47	71.41	60.07	75.48	80.75	70.54	64.67	55.91	90.00	500.0
Cu	28.87	25.68	23.20	16.78	20.99	104.9	134.0	142.4	121.9	110.3	21.13	35.00	500.0
Hg	0.056	0.025	0.022	0.031	0.235	0.028	0.044	0.036	0.021	0.030	0.031	0.150	—
Mn	521.4	685.7	649.4	697.0	782.0	126.8	128.5	119.4	154.3	169.6	772.5	—	—
Pb	25.63	17.52	23.55	23.73	21.32	9.209	21.91	19.70	21.05	15.98	23.85	35.00	500.0
Se	0.080	0.076	0.073	0.047	0.046	0.692	1.067	0.999	0.537	0.572	0.069	—	15.00
Zn	52.00	55.83	38.06	77.47	62.18	46.01	143.7	142.4	96.02	62.96	59.54	100.0	—

注:“—”无相关数据。

Zn 含量降低, 其中 Cr、Mn 和 Zn 在复合充填下层发生积累, 这可能与粉煤灰较差的保水性和元素的地球化学性质存在密切关系, 即化学性质相对较活泼的重金属, 从上层土壤下渗至粉煤灰层, 由于粉煤灰的松散性, 继续下渗, 并且降水携带了粉煤灰中的部分重金属, 而复合充填的下层土壤对水体中溶解的重金属起到了截留作用, 导致部分元素在这一层发生积累; 复垦的表层土壤中 Hg 和 Se 相对于全土种植有所增加, 表现出随覆土厚度增大而减少的趋势, 推测与植物选择性吸收和元素的挥发性(Hg 和 Se 是易挥发性元素)存在密切关系, 并且随着土壤层厚度增大, 生长在粉煤灰层的植物根系就会越少, 下层粉煤灰中元素能够随着植物根系吸收向土壤表层迁移的量就会越少, 这与赵家峰和胡振琪的解释一致^[1,6]; 除复合充填下层土壤中 Hg, 其他充填方式下的重金属都低于土壤环境质量一级^[9], 主要原因是原状粉煤灰中 Hg 的含量很高为 $0.175 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 通过降水淋溶携带, 粉煤灰层中大量的 Hg 下渗至复合充填的下层。粉煤灰中重金属含量都在 GB 8173—1987 范围内。

重金属在表层土壤中表现出不同的变化规律, 可能受元素地球化学性质、水分下渗/蒸发、植物的选择性吸收等因素的影响, 具体哪一种因素起主导作用有待于进一步研究。

2.2 大豆和玉米长势及重金属含量

2.2.1 大豆和玉米长势

玉米和大豆在生长期的株高见图 3, 试验中共记录 4 次(5 月 20 日、6 月 20 日、7 月 5 日、8 月 4 日)玉米和大豆的株高。玉米从出苗至拔节初期, 各田块农作物长势基本一致, 然而生长 1 个月后, 在覆土 0.3 m 田块上的农作物长势逐渐与其他田块出现差异, 且一

直延续到农作物收获。各充填方式下玉米和大豆的株高在生长后期表现为处理 1<处理 3≈处理 4<处理 2≈对照(处理 1~4 分别对应 20、30、50 cm 和复合充填方式), 其中覆土 20 cm 最不利于作物生长, 而作物在覆土 30 cm 方式下与全土种植接近, 说明覆土厚度对作物生长能够产生影响, 厚度太小不利于植物对水分的吸收, 厚度太大粉煤灰中的有利于作物生长的元素就不会被充分利用。所以, 从农作物长势来看, 在以田集电厂粉煤灰充填、当地土壤覆土情况下, 覆土 30 cm 是较适合的覆土方式。另外, 试验发现, 在农作物生长期 6、7 月份, 玉米本应正好处在生长旺期, 但是由于气温较高, 土壤水分蒸发量大, 4 种充填方式都出现了叶面卷曲的现象, 且处理 1 最严重, 这是由于处理 1 覆土厚度较薄, 土壤中的水分和养分不能维持玉米正常生长, 同时又因底层粉煤灰的保水保肥性较差, 从而导致其长势显著弱于其他处理。

2.2.2 大豆和玉米茎叶中重金属含量

大豆和玉米茎叶中重金属含量见图 4。

大豆: 覆土 20 cm 充填方式与全土相比, As、Hg、Mn、Pb 和 Se 含量增加, Zn 的含量降低, Cd、Cr 和 Cu 元素变化不大; 覆土 30 cm 充填方式下, 大豆茎叶中重金属含量与全土种植相比, Cd、Cu、Hg、Mn、Pb 和 Zn 没有显著变化, 而 As、Cr 和 Se 含量升高, 但仍在粮食卫生标准上限(GB 2715—2005)之内; 覆土 50 cm 充填方式与全土相比, 茎叶中 As、Cu、Hg 和 Mn 含量升高, Se 降低, 其他元素含量变化不大。可以看出, 无论在哪种覆土方式下, As 在大豆茎叶中表现出富集的状态。

玉米: 覆土 20 cm 充填方式与全土相比, 除 As、Cr、Se 和 Zn, 大部分元素没有显著变化; 覆土 30 cm

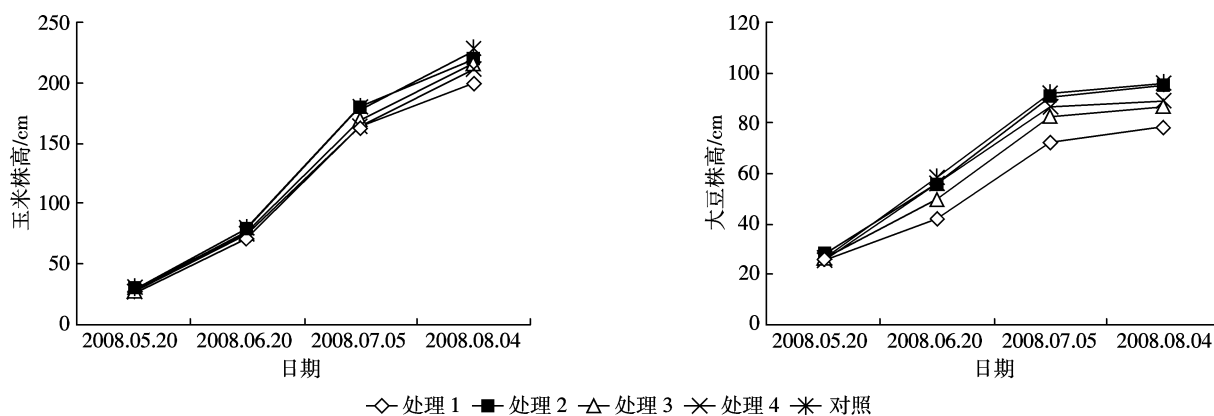


图 3 玉米和大豆在生长期的株高

Figure 3 Height of stem of corns and soybeans in growing period

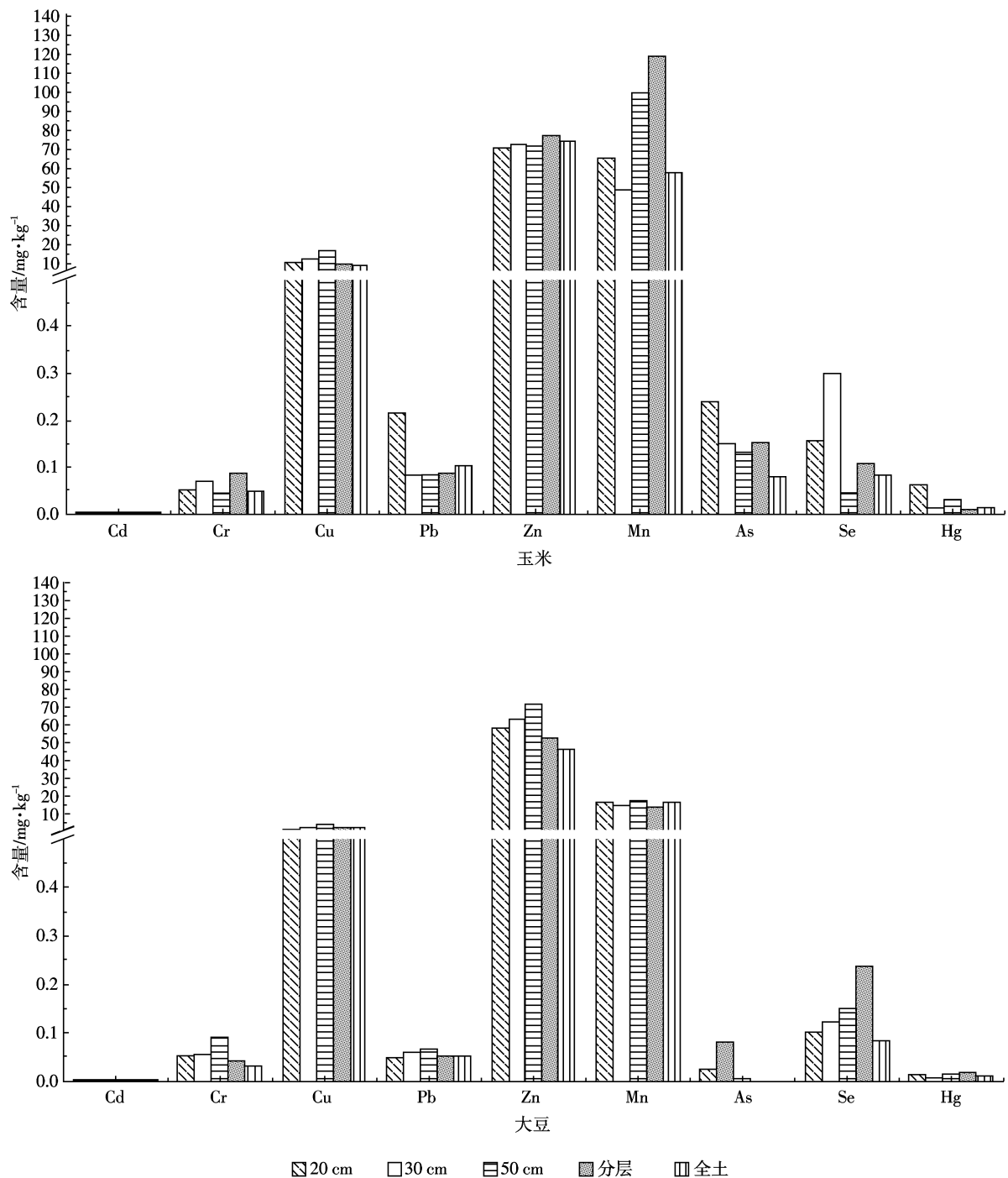


图 4 玉米和大豆茎叶中重金属含量

Figure 4 Concentration of heavy metals in stem leaves of coms and soybeans

充填方式下的玉米茎叶中重金属含量与全土种植相比, Cd、Cu、Hg、Mn、Pb 没有显著变化, 而 Cr、Se 和 Zn 略有升高, As 增加量较大, 但仍在粮食标准上限之内; 覆土 50 cm 充填方式与全土相比, 除 As、Cr、Cu、Se 和 Zn 外, 其他元素含量变化不大。可以看出, 在覆土种植的玉米茎叶中 As、Cr、Se 和 Zn 含量相对于全

土种植有增加的趋势。

总之, 在各种覆土方式中, 覆土 30 cm 的大豆和玉米茎叶中元素含量与全土种植相比, 大部分无显著变化, 可以认为是较适合的充填方式。

2.2.3 大豆和玉米子实中重金属含量

20 cm 充填方式下, 玉米粒中 Cu 和 Zn 表现最

高,这与农作物根系的长度有一定关系;覆土 30 cm 充填方式较 20 cm 充填方式,大部分元素含量表现出下降趋势;较 50 cm 充填方式和全土种植,大豆粒中 Cu、Hg 和 Zn,玉米粒中 Pb 和 Se 含量较高,其他元素均相近。然而,大豆和玉米子实中重金属含量全部在粮食标准上限之内。在为防止农作物通过根系吸收过量的重金属在作物子实中富集,同时减少充填过程的工作量,故覆土 30 cm 是较适合的充填方式。

3 讨论

3.1 覆土中重金属污染评价

本研究以淮南土壤元素背景值^[10]及中国土壤元素背景值为定量指标^[11],以种植大豆和玉米后土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Mn、Pb、Se 和 Zn 9 种重金属为评价因子(表 2),利用单因子污染指数 P_i 评价方法和内

梅罗综合污染指数 P_j 评价方法,确定主要的污染因子和污染程度^[12-13](表 3)。

根据土壤重金属污染等级划分标准^[14], P_i 以 1 为分界线,>1 为污染,<1 为未污染,覆土 20 cm 和复合充填下层土壤中 Hg,以及复合充填上层土壤中 Zn 都处于污染状态,其中复合充填下层土壤中 Hg 污染指数为 5.732,明显高于其他充填方式,除了与粉煤灰中 Hg 高含量有直接关系,可能与其处于淹水状态也有一定关系,因为在试验田旁边有一河流,导致周围地下水位升高,可能会使得该层土壤处于淹水状态。在覆土 30 cm 的充填方式中,土壤中各种重金属的污染指数都<1,土壤处于未污染状态。

从 P_j 来看,覆土 20、30、50 cm 和复合充填上层土壤综合污染指数 $0.7 < P_j \leq 1.0$,污染等级为警戒级,污染状况为尚清洁;而复合充填下层土壤 P_j 为 2.602,污

表 2 大豆和玉米籽实中重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 Concentrations of heavy metals in grains of corns and soybeans(mg·kg⁻¹)

农作物	覆土	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Pb	Se	Zn
大豆粒	20 cm	bdl	0.002	0.021	3.181	0.002	43.63	0.054	0.076	30.51
	30 cm	bdl	0.002	0.021	7.840	0.008	42.69	0.050	0.057	34.40
	50 cm	0.004	0.002	0.016	bdl	0.006	54.01	0.081	0.035	24.07
	分层	bdl	0.002	0.083	8.819	0.006	40.67	0.033	0.086	42.53
	全土	bdl	0.002	0.023	bdl	0.002	40.84	0.057	0.070	24.73
玉米粒	20 cm	0.009	0.001	0.024	3.027	0.011	17.56	0.026	0.035	19.10
	30 cm	bdl	0.001	0.030	bdl	0.002	13.83	0.047	0.068	9.104
	50 cm	bdl	0.002	0.025	6.582	0.001	22.05	0.026	0.038	26.99
	分层	bdl	0.002	0.012	bdl	0.002	13.41	0.001	0.112	12.75
	全土	bdl	0.001	0.030	bdl	0.001	bdl	0.027	0.042	13.50
GB 2715—2005		0.100	0.200	1.000	10.00	0.020	—	0.200	—	50.00

注:“bdl”检测限以下;“—”无相关数据。

表 3 种植农作物后土壤的污染指数及土壤背景值
Table 3 Pollution indexes of soils after planting and the background values of soil

元素	20 cm	30 cm	50 cm	复合充填上	复合充填下	土壤背景值
As	0.659	0.771	0.634	0.815	0.361	10.00*
Cd	0.050	0.056	0.048	0.058	0.060	0.500*
Cr	0.469	0.719	0.440	0.584	0.780	91.53
Cu	0.941	0.837	0.756	0.547	0.684	30.69
Hg	1.366	0.610	0.537	0.756	5.732	0.041
Mn	0.632	0.831	0.787	0.844	0.947	825.6
Pb	1.090	0.745	1.001	1.009	0.906	23.52
Se	0.160	0.152	0.146	0.094	0.092	0.500*
Zn	0.891	0.957	0.652	1.328	1.066	58.35
综合污染指数 P_j	0.713	0.812	0.745	0.711	2.602	

注:* 为中国土壤元素背景值,其他为淮南土壤元素背景值。

染等级为中污染,说明土壤受到中度污染。

3.2 影响大豆和玉米中重金属含量的因素

3.2.1 根系所处环境

农作物茎叶中部分重金属含量与根系吸收作用密切相关。一般情况下,根系生长在重金属富集的环境中,植物茎叶中重金属含量就会比正常环境中的高^[5]。玉米和大豆根质量的 85% 分布于 0~30 cm 土层^[6],在覆土为 20 cm 和 30 cm 时,根系能够从粉煤灰中吸收重金属,粉煤灰中 Cr 和 Se 含量较土壤偏高,所以覆土为 20 cm 和 30 cm 时大豆茎叶中 Cr 和 Se 的含量高于其他充填方式。除了农作物根系所处环境的影响,重金属的存在形态影响植物的吸收作用。

3.2.2 农作物对重金属的选择性吸收

土壤中可溶态重金属含量直接影响重金属在土壤-农作物的迁移和农作物中重金属含量^[7],所以部分元素与土壤中该元素的总量不存在明显相关关系。土壤中重金属的氧化态为可溶性,还原态为难溶性,并且针对不同的重金属其形态分类也有所不同。农作物难吸收的元素有 As、Cd 和 Hg,吸收不多的元素 Cr、Mn 和 Pb,容易吸收的元素 Cu 和 Zn^[8],所以大豆和玉米子实中的 As、Cd 和 Hg 含量很低,其中 As 的含量几乎在检测线以下;大豆和玉米子实中 Zn 含量较高,最大值占土壤中该元素含量的 63.2%,原因是 Zn 本身就是容易吸收的元素,并且作为农作物必需元素,在植物体内以代谢吸收为主^[8],所以 Zn 的含量高于其他以被动吸收为主的元素的含量。此外,大豆中大部分重金属的含量高于玉米,说明不同农作物对重金属吸收也存在差异。

3.3 大豆和玉米茎叶与子实中重金属含量关系

对比大豆和玉米茎、叶和子实中重金属含量,茎、叶中的含量明显高于子实,这与胡振琪^[6]和王兆锋得出结论一致^[9]。主要由于农作物的茎在为子实输送营养过程中对重金属的截留作用^[14],并且重金属具有不易向地上部位转移的特点^[20]。所以子实中重金属含量明显低于茎、叶中的含量。

4 结论

通过测试不同充填方式下试验田中土壤和粉煤灰中重金属含量,与供试土壤和粉煤灰比较,得出表层土壤重金属 As、Cd、Cr、Mn 和 Zn 含量降低,其中 Cr、Mn 和 Zn 在复合充填下层发生积累,通过污染指数评价,表明复合充填的下层土壤处于中度污染状态;表层土壤中 Hg 和 Se 含量增多,表现出随覆土厚

度增大而减少的趋势。对于以上元素含量的变化,应采取针对性的措施,防止部分重金属继续下渗可能造成的地下水污染问题。通过测试大豆和玉米的茎、叶和籽实中的重金属含量,得出 30 cm 覆土方式是该试验田污染较小和较为经济的充填方式。

此外,今后在研究土壤中重金属对农作物中元素含量影响时,需要进一步测试重金属在土壤中的赋存形态,这对研究重金属土壤-农作物的迁移机制和规律有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 赵家峰. 浅谈粉煤灰在农业生产上的应用[J]. 农村经济与科技, 2002, 13(123):34.
ZHAO Jia-feng. Discussion on the application of fly ash in agriculture[J]. *Rural Economy and Science-Technology*, 2002, 13(123):34.
- [2] 李 艺, 李明顺, 赖燕平, 等. 广西思荣锰矿复垦区的重金属污染影响与生态恢复探讨[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2172-2177.
LI Yi, LI Ming-shun, LAI Yan-ping, et al. Impact of heavy metal contamination in the reclaimed Mn mineland in Si-rong, Guangxi and suggestion for ecological restoration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2172-2177.
- [3] Haynes R J. Reclamation and revegetation of fly ash disposal sites—challenges and research needs[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009 (90):43-53.
- [4] 孙克刚, 侯传伟, 张子武, 等. 粉煤灰磁化肥中有害元素在菜类作物中的富集情况[J]. 河南农业科学, 2000(3):33-34.
SUN Ke-gang, HOU Chuan-wei, ZHANG Zi-wu, et al. Enrichment status of harmful elements in vegetable crops from fly ash magnetic fertilizer[J]. *Henan Agricultural Science*, 2000(3):33-34.
- [5] 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, 3(26):33-35.
YANG Xiu-hong, HU Zhen-qi, ZHANG Xue-li. Risk assessment of reclaimed land filled with fly ash and stabilization remediation technology[J]. *Science & Technology*, 2006, 3(26):33-35.
- [6] 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 Zhen-qi, QI Jia-zhong, SI Ji-tao. Contamination and assessment of heavy metals in fly ash reclaimed soil[J]. *Transaction of the CSAE*, 2003, 19(2):214-218.
- [7] 郑秀琴, 詹晓珠, 洪曾纯. 水体系消解-原子荧光法同时测定土壤中砷和汞的研究[J]. 农业环境与发展, 2006(6):70-72.
ZHENG Xiu-qin, ZHAN Xiao-zhu, HONG Ceng-chun. Study on the monitoring As and Hg in soil by the aqua regia digestion-atomic fluorescence method[J]. *Agro-Environment & Development*, 2006(6):70-72.
- [8] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社, 2007:5-6.
XI Dan-li, SUN Yu-sheng, LIU Xiu-ying. *Environmental monitoring*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007:5-6.

- [9] 中华人民共和国国家标准, GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 国家环境保护局, 1995: 235–237.
National Standards of Peoples Republic of China, GB 15618—1995 Soil quality standards[S]. Beijing: State Bureau of Environmental Protection, 1995: 235–237.
- [10] 杨晓勇, 孙立广, 张兆峰, 等. 淮南市土壤元素背景值与土壤环境质量评估[J]. 土壤学报, 1997, 34(3): 345–347.
YANG Xiao-yong, SUN Li-guang, ZHANG Zhao-feng, et al. the soil element background values and assessment on the soil environmental quality in Huainan area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997, 34(3): 345–347.
- [11] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 1–36.
China Environment Monitoring Center. The background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 1–36.
- [12] 石平, 魏忠义, 王恩德, 等. 某尾矿废弃地土壤重金属污染调查与治理研究[J]. 金属矿山, 2009(6): 158–162.
SHI Ping, WEI Zhong-yi, WANG En-de, et al. Investigation on the soil heavy metal contamination of a abandoned tailing land and its soil remediation[J]. *Metal Mine*, 2009(6): 158–162.
- [13] 谢小进, 康建成, 李卫江, 等. 上海城郊地区城市化进程与农用土壤重金属污染的关系研究[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1250–1256.
XIE Xiao-jin, KANG Jian-cheng, LI Wei-jiang, et al. Relationship between urbanization and heavy metal pollution in soils in Shanghai suburb[J]. *Resources Science*, 2009, 31(7): 1250–1256.
- [14] 李静. 重金属和氟的土壤环境质量评价及健康基准研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
LI Jing. Soil environmental quality assessment of heavy metals and fluorine and research in health standard [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [15] 梁丽娜, 黄雅曦, 杨合法, 等. 污泥农用对土壤和作物重金属累积及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 81–86.
LIANG Li-na, HUANG Ya-xi, YANG He-fa, et al. Effect of farmland application of sewage sludge on crop yields and heavy metal accumulation in soil and crop[J]. *Transaction of the CSAE*, 2009, 25(6): 81–86.
- [16] 高阳, 段爱旺, 刘战东, 等. 玉米/大豆间作条件下的作物根系生长及水分吸收[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 307–313.
GAO Yang, DUAN Ai-wang, LIU Zhan-dong, et al. Crop root growth and water uptake in maize/soybean strip intercropping[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 307–313.
- [17] 卢声. 土壤因素对农作物中重金属含量的影响分析[J]. 丹东纺专学报, 2004, 11(3): 34–35.
LU Sheng. Analysis of heavy metal concentrations in crops by influencing of soil factors[J]. *Journal of Dandong Textile College*, 2004, 11(3): 34–35.
- [18] 杨志军, 张志国, 曹金勇, 等. 土壤与农作物重金属含量相关性的初步研究[J]. 淮阴工学院学报, 2003, 12(3): 85–88.
YANG Zhi-jun, ZHANG Zhi-guo, CAO Jin-yong. The primary correlation study of the heavy metal content between the cropper and soil[J]. *Journal of Huaiyin Institute of Technology*, 2003, 12(3): 85–88.
- [19] 王兆锋, 冯永军, 张蕾娜. 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(自然科学版), 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 Agriculture University(Natural Science)*, 2003, 34(1): 152–156.
- [20] 康立娟, 赵明亮, 庄国臣. 铜的单元及复合污染中水稻对铜吸收双积规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 503–504.
KANG Li-juan, ZHAO Ming-liang, ZHUANG Guo-chen. Accumulation of Cu as single and complex pollutants in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4): 503–504.