

湖南 4 个典型工矿区大豆种植土壤 Pb Cd Zn 污染调查与评价

周 航¹, 曾 敏², 刘 俊³, 廖柏寒^{1*}

(1.中南林业科技大学生物技术开放性中心实验室, 长沙 410004; 2.中南林业科技大学林学院, 长沙 410004; 3.南华大学药学与生命科学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:通过对湖南 4 个典型工矿区(郴州柿竹园矿区、郴州宝山矿区、衡阳水口山矿区、株洲清水塘工业区)大豆以及其种植土壤的采样调查,综合评价了 4 个工矿区大豆及其种植土壤重金属污染程度。结果显示:(1)4 个工矿区 21 个采样点的大豆及其种植土壤已经受到了重金属污染。土壤中 Pb、Cd、Zn 的浓度范围分别为 269.02~6 450.35、3.04~23.93、104.22~381.91 mg·kg⁻¹,大豆籽粒中这 3 种重金属的浓度范围分别为 4.69~20.05、0.81~5.48、24.87~190.48 mg·kg⁻¹,均已超过相应的标准。(2)21 个采样点中大豆植株对 Pb、Cd 和 Zn 的生物富集系数大小依次为 Cd>Zn>Pb,表明大豆植株对 Cd 富集能力大于 Zn 和 Pb。(3)21 个土壤样品中交换态 Pb、Cd、Zn 含量与大豆植株样品各部位中这 3 种重金属元素含量基本上存在着显著或极显著的正的线性关系。

关键词:工矿区;土壤;Pb;Cd;Zn;大豆

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)03-0476-06

Investigation and Evaluation of Pb, Cd, Zn Contamination in Soybean Planting Soils of 4 Typical Mine Zones in Hunan Province, China

ZHOU Hang¹, ZENG Min², LIU Jun³, LIAO Bo-han^{1*}

(1.Biotechnology Core Facilities, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2.College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 3.College of Pharmacy and Life Science, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to evaluate heavy metal pollution in soybean plants and the soils round four mine zones in Hunan Province, central south of China, sampling and surveys were conducted in Shizhuyuan and Baoshan in Chenzhou, Qingshuitang in Zhuzhou, Shuikoushan in Hengyang. The results indicated that: (1) Soybean plants and the soils were polluted by heavy metals in all the 21 sampling sites. Concentration ranges of Pb, Cd, and Zn in soybean planting soils were 269.02~6 450.35 mg·kg⁻¹, 3.04~23.93 mg·kg⁻¹ and 104.22~381.91 mg·kg⁻¹, respectively; concentration ranges of these three heavy metals in soybean plants were 4.69~20.05 mg·kg⁻¹, 0.81~5.48 mg·kg⁻¹, 24.87~190.48 mg·kg⁻¹, respectively. Contents of these three heavy metals in all samples were higher than the national standards. (2) Bioconcentration factors of Pb, Cd, and Zn in soybean plants were in the sequence of Cd>Zn>Pb in the 21 sampling sites, indicating that accumulation ability of Cd in soybean plants was higher than those of Zn or Pb. (3) Significant or highly significant positive linear relations were found between the contents of exchangeable Pb, Cd, and Zn in soils and the contents of Pb, Cd, and Zn in different soybean organs.

Keywords: mine zone; soil; Pb; Cd; Zn; soybean

收稿日期:2010-08-25

基金项目: 国家环保部公益性项目:重金属污染耕地农业利用风险控制技术研究(201009047);国家科技重大专项“水体污染控制与治理”:湘江流域面源污染控制技术(2008ZX07212-001-05);湖南省科技计划项目(2009SK4031);湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介:周 航(1984—),男,硕士研究生,主要从事土壤污染与防治研究。E-mail:evileyes.z@163.com

*** 通讯作者:**廖柏寒 E-mail:liaobh1020@163.com

土壤重金属污染导致人们对农产品食用安全的日益关注。土壤中重金属来源广泛,主要由采矿、冶炼、电镀、化工等工业“三废”的排放以及污水灌溉、污泥农用、农药和化肥的不合理施用引起的^[1]。土壤中的重金属无法被微生物所降解,可能通过植物进入食物链,对人体造成危害^[2]。湖南省有色金属矿藏十分丰富,享有世界“有色金属之乡”的称誉。有色金属矿产的大规模开发给湖南省带来巨大经济效益的同时也加重了对矿区周围生态环境的污染和破坏。尤其近年有色金属矿业规模的不断扩大,以及众多的个人小型采矿作坊的非法开采、违规作业以及废水、废渣随意排放,使矿区周围大气、水体以及土壤中重金属污染日益严重^[3]。污染的主要来源就是采矿中排放的大量酸性矿井水、粉尘以及尾矿砂中所包含的高浓度重金属,对大多数植物的生长发育都将产生严重抑制和毒害作用^[4]。对于湖南采矿区和冶炼区土壤重金属污染已经有一些报道^[5-9],但由于湖南工矿区众多,且污染情况复杂,特别是对于工矿区周围农田的重金属污染状况的系统调查和综合评价资料很少。大豆作为一种粮食作物和经济作物,在湖南矿区有一定的种植规模,因此本文通过对湖南4个典型工矿区(郴州柿竹园矿区、郴州宝山矿区、衡阳水口山矿区、株洲清水塘工业区)的21个土壤样品和相应的大豆种植情况进行采样调查,对土壤重金属污染程度进行评价,对大豆籽粒中重金属含量进行分析,以期为湖南工矿区土壤重金属污染治理和耕地安全利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 4个典型工矿区概况

本实验涉及的湖南4个工矿区为郴州柿竹园矿区、郴州桂阳宝山矿区、衡阳水口山矿区、株洲清水塘工业区。郴州柿竹园矿区位于郴州市苏仙区,其主要矿种有Pb、Zn、Cu、Mn等,该区域东郊的东河流经柿竹园矿区,其上游有一大型铅锌矿——东坡矿。郴州宝山矿区位于郴州市桂阳县城郊西南,其境内有丰富的铅锌银矿和铜钨矿,生产的铅、锌、金、银、硫产品主供株洲冶炼集团公司和水口山冶炼集团公司,是湖南省重要的铅、锌冶炼原料供应基地。衡阳水口山矿区位于衡阳市常宁县,具有丰富的铅锌矿和金矿,有百余年的采矿历史,具有“世界铅都”之称,大型采矿场有康家湾矿、龙王山矿等。株洲清水塘工业区位于株洲市石峰区,工业发达,共有130余

家冶炼、化工企业,大型冶炼、化工企业有如株洲冶炼厂、株洲化工厂等。调查发现,4个工矿区多处农田已经荒废或改为他用,仍然在耕种的农田中主要农作物为水稻、大豆、高粱、烟叶、花生、玉米、辣椒、蔬菜等,且产量较低。

1.2 样品采集

于大豆成熟的季节(2009年7—8月份),在4个典型工矿区的21个大豆种植点进行了调查与采样分析,采样点的信息如表1。每个点选择具有一定面积的大豆种植土壤作为采样点,按梅花形法布设5个点。每个点分别采集5株大豆植株,用取土器采集0~20 cm的表层土壤,分别混合均匀,样品采集后带回实验室分析。

表1 湖南4个工矿区采样点信息

Table 1 The information of sampling sites of 4 industry and mine zones in Hunan

工矿区名称	土壤类型	年降水量/mm	采样点设置/个
郴州柿竹园矿区	黄壤	1 400~1 700	6
郴州宝山矿区	黄壤	1 400~1 700	5
株洲清水塘工业区	红壤	1 300~1 500	4
衡阳水口山矿区	红壤	1 400~1 500	6

1.3 样品处理与分析

土壤样品采回后,自然风干,去除杂物,磨碎后过100目尼龙筛,混合均匀,保存待测。大豆植株采回后,用自来水和蒸馏水清洗,晾干后放入烘箱,在105℃杀青30 min,然后在70℃下烘干至恒重。分别收集恒重后的根、茎、叶、豆荚和籽粒,使用非金属器械粉碎,磨细(0.5 mm),用塑料封口袋密封保存待测。

土壤总Pb、Cd、Zn用王水-高氯酸消解;大豆植株各部位重金属总量采用硝酸-高氯酸消解^[10];土壤中重金属交换态含量分析采用1.0 mol·L⁻¹ Mg(NO₃)₂溶液提取^[11];样品中重金属元素的浓度用原子吸收分光光度计(日立Z-2000)测定。

1.4 数据分析

采用综合污染指数法(内梅罗污染指数法)对采样点土壤Pb、Cd、Zn的复合污染进行综合评价^[12-13]。综合污染指数法评价模式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{max}})^2 + (\bar{P}_i)^2}{2}}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为某测定土壤综合污染指数, P_{max} 为污染物中数值最大的单项污染指数(P_i), $\bar{P}_i$ 为土壤各重金属污染指数的平均值,其计算公式分别为:

$$P_i=\frac{C_i}{S_i}$$
$$\bar{P}_i=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n P_i$$

式中: P_i 为土壤和大豆籽粒中 Pb、Cd、Zn 的单项污染指数, C_i 为采样点土壤或大豆籽粒中 Pb、Cd、Zn 元素含量, S_i 为 Pb、Cd、Zn 的评价标准(国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)的三级标准)。 $P_{\text{综}}<1$ 表示未受污染, $P_{\text{综}}>1$ 表示受到了污染, $P_{\text{综}}$ 值越大,表明污染越严重。

2 结果与分析

2.1 土壤样品 Pb、Cd、Zn 含量

表 2 表明,4 个矿区多处采样点土壤重金属存在超标。Pb、Cd、Zn 总量平均值在郴州柿竹园 6 个土壤样品中分别为 833.84、5.80、256.63 mg·kg⁻¹,郴州宝山 5 个土壤样品中分别为 1 531.76、8.79、180.70 mg·kg⁻¹,株洲清水塘 4 个土壤样品中分别为 504.03、12.43、334.22 mg·kg⁻¹,衡阳水口山 6 个土壤样品中分别为 556.38、8.81、237.06 mg·kg⁻¹。从 21 个样品的统计数据

看,土壤中 Pb、Cd、Zn 含量范围分别为 269.02~6 450.35 mg·kg⁻¹,3.04~23.93 mg·kg⁻¹,104.22~381.91 mg·kg⁻¹,总量平均值分别为 857.92、8.63、247.74 mg·kg⁻¹,Pb 和 Cd 的含量超过国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)的三级标准(Pb≤500 mg·kg⁻¹,Cd≤1.0 mg·kg⁻¹),Zn 含量未超过土壤环境质量标准的三级标准(Zn≤500 mg·kg⁻¹)。

所有 21 个采样点中, $P_{\text{综}}$ 均大于 1,说明 4 个工矿区周边大豆种植土壤均受到不同程度的重金属污染。其中,郴州柿竹园矿区的石虎埔村和板桥村为 Pb、Cd 复合污染,香山坪村、麻田村受到单一的 Cd 污染;郴州宝山的共和农场、子龙村、七里埔村、富阳村为单一 Cd 污染,而半边月村为 Pb、Cd 复合污染;株洲清水塘的 4 个采样点中,1#、2# 采样点为 Pb、Cd 复合污染,且 Cd 污染很严重,3#、4# 采样点为单一 Cd 污染;衡阳水口山三香村、新桐村 1#、松柏镇为单一 Cd 污染,朱坡村 1#、朱坡村 2#、新桐村 2# 为 Pb、Cd 复合污染。综合比较可知(表 2),郴州桂阳宝山的半边月村污染状况最为严重,株洲清水塘 1#、2# 采样点的污染状况也相当严重。

2.2 大豆籽粒中 Pb、Cd、Zn 含量分析

表 3 为 21 个采样点大豆籽粒中 Pb、Cd、Zn 含量。郴州柿竹园 6 个大豆籽粒样品中 Pb、Cd、Zn 含量平均值分别为 8.90、2.46、45.18 mg·kg⁻¹,郴州宝山 5 个样品中分别为 13.08、1.59、50.04 mg·kg⁻¹,株洲清水塘 4 个样品中分别为 17.18、3.41、143.21 mg·kg⁻¹,衡阳水口山 6 个样品中分别为 18.00、4.07、88.18 mg·kg⁻¹。综合分析 21 个样品,大豆籽粒中 Pb、Cd、Zn 的浓度范围分别为 4.69~20.05、0.81~5.48、24.87~190.48 mg·kg⁻¹,平均值分别为 14.07、2.89、77.30 mg·kg⁻¹。

根据内梅罗污染指数评价法以及豆类食品中 Pb 和 Cd 限量标准(GB 2762—2005,Pb≤0.2 mg·kg⁻¹,Cd≤0.2 mg·kg⁻¹),以及豆类食品中 Zn 限量卫生标准(GB 13106—1991,Zn≤100 mg·kg⁻¹),所有 21 个采样点大豆籽粒的 $P_{\text{综}}$ 均大于 1,说明所有采样点种植的大豆均受到不同程度的重金属污染(表 3)。所有大豆籽粒样品中 Pb、Cd 含量超标,而且有 6 个采样点的大豆籽粒中 Zn 含量超标(郴州宝山半边月村,株洲清水塘 1#、3#、4# 采样点,衡阳水口山的朱坡村 2#、松柏镇)。Zn 污染在株洲清水塘工业区表现得较为严重,主要是因为株洲冶炼厂附近土壤中总 Zn 含量较高而导致交换态 Zn 含量高于其他 3 个采样点。根据综合污染指标的排序,株洲清水塘的 4 号采样

表 2 采样点土壤重金属污染评价
Table 2 Evaluation on heavy metals contamination for the tested soils

采样矿区	采样点	重金属总量/mg·kg ⁻¹			污染元素	$P_{\text{综}}$
		Pb	Cd	Zn		
郴州柿竹园矿区 n=6	香山坪村	349.24	5.06	196.06	Cd	3.86
	麻田村	310.02	3.04	204.99	Cd	2.35
	石虎埔 1#	1 001.05	6.50	280.83	Cd/Pb	5.07
	石虎埔 2#	1 031.68	7.30	286.74	Cd/Pb	5.67
	石虎埔 3#	1 234.99	6.87	300.10	Cd/Pb	5.39
	板桥村	1 076.08	6.04	271.04	Cd/Pb	4.74
郴州宝山矿区 n=5	共和农场	303.31	4.52	173.55	Cd	3.45
	子龙村	280.06	6.53	152.85	Cd	4.94
	七里埔	356.08	5.34	135.48	Cd	4.06
	富阳村	269.02	3.63	104.22	Cd	2.77
	半边月村	6 450.35	23.93	337.42	Cd/Pb	19.09
株洲清水塘工业区 n=4	清水塘 1#	679.20	19.19	381.91	Cd/Pb	14.47
	清水塘 2#	627.13	13.92	373.14	Cd/Pb	10.53
	清水塘 3#	409.61	10.27	325.83	Cd	7.77
	清水塘 4#	300.19	6.35	256.01	Cd	4.82
衡阳水口山矿区 n=6	三香村	387.85	6.93	210.56	Cd	5.26
	朱坡村 1#	653.50	11.61	268.17	Cd/Pb	8.80
	朱坡村 2#	887.50	11.78	298.22	Cd/Pb	8.97
	新桐村 1#	427.77	7.56	217.45	Cd	5.74
	新桐村 2#	529.77	7.76	224.52	Cd/Pb	5.91
	松柏镇	451.91	7.19	203.46	Cd	5.46

表 3 采样点大豆籽粒重金属污染评价						
Table 3 Evaluation on heavy metals of soybean seeds from						
sampling sites						
采样 矿区	采样点	重金属含量/mg·kg ⁻¹			污染元素	<i>P</i> _综
		Pb	Cd	Zn		
郴州柿 竹园矿 区 <i>n</i> =6	香山坪村	4.69	2.63	27.10	Pb/Cd	18.72
	麻田村	7.50	3.05	75.98	Pb/Cd	29.36
	石虎埔 1#	5.77	2.94	29.08	Pb/Cd	22.87
	石虎埔 2#	11.11	2.33	41.07	Pb/Cd	42.39
	石虎埔 3#	11.53	2.67	34.44	Pb/Cd	44.10
	板桥村	12.81	1.14	63.43	Pb/Cd	48.23
郴州宝 山矿区 <i>n</i> =5	共和农场	12.06	1.04	24.87	Pb/Cd	45.37
	子龙村	7.83	2.27	24.98	Pb/Cd	30.16
	七里埔	13.04	0.81	26.6	Pb/Cd	48.93
	富阳村	14.06	2.00	72.75	Pb/Cd	53.25
	半边月村	18.41	1.84	101.02	Pb/Cd/Zn	69.41
株洲清 水塘工 业区 <i>n</i> =4	清水塘 1#	14.48	3.11	190.48	Pb/Cd/Zn	55.40
	清水塘 2#	16.45	3.93	163.90	Pb/Cd/Zn	63.07
	清水塘 3#	17.73	3.05	83.60	Pb/Cd	67.37
	清水塘 4#	20.05	3.54	134.86	Pb/Cd/Zn	76.26
衡阳水 口山矿 区 <i>n</i> =6	三香村	17.83	3.67	76.34	Pb/Cd	68.01
	朱坡村 1#	18.64	3.82	55.69	Pb/Cd	71.07
	朱坡村 2#	18.84	4.92	146.82	Pb/Cd/Zn	72.39
	新桐村 1#	17.83	4.05	71.62	Pb/Cd	68.17
	新桐村 2#	17.73	2.45	73.86	Pb/Cd	67.11
	松柏镇	17.10	5.48	104.76	Pb/Cd/Zn	66.15

点大豆籽粒污染最为严重，衡阳水口山的朱坡村 1#、朱坡村 2# 采样点和郴州宝山的半边月村污染也较为严重。

2.3 大豆植株中 Pb、Cd、Zn 的富集系数分析

通常用生物富集系数来评价植物将重金属吸收转移到体内能力的大小，它反映了重金属在土壤-植物系统中迁移的难易程度。生物富集系数是指植物中某元素质量分数与土壤中元素质量分数之比，即：生物富集系数=地上部植物中元素质量分数/土壤中元素质量分数^[14-15]。

表 4 为采样点大豆植株中 Pb、Cd、Zn 的富集系数。可以看出，21 个采样点中 Pb 的富集系数为 0.01~0.22，Cd 的富集系数为 0.27~1.64，Zn 的富集系数为 0.14~1.18。大豆植株对这 3 种重金属富集系数大小依次为 Cd>Zn>Pb，表明大豆植株对 Cd 富集能力大于 Zn 和 Pb。

2.4 土壤中交换态 Pb、Cd、Zn 含量与大豆各部位中 Pb、Cd、Zn 含量关系

图 1 表示土壤中交换态 Pb、Cd、Zn 含量与大豆植株各部位中这 3 种重金属元素含量的关系。图 1a

表 4 采样点大豆植株中 Pb、Cd、Zn 的生物富集系数分析				
Table 4 Bioconcentration factors analysis of Pb, Cd, Zn in soybean				
采样矿区	采样点	plants from sampling sites		
		大豆植株中重金属富集系数		
		Pb	Cd	Zn
郴州柿竹 园矿区 $n=6$	香山坪村	0.04	0.34	0.25
	麻田村	0.08	1.26	0.56
	石虎埔 1#	0.02	0.33	0.14
	石虎埔 2#	0.01	0.30	0.16
	石虎埔 3#	0.01	0.40	0.18
	板桥村	0.02	0.77	0.38
郴州宝山 矿区 $n=5$	共和农场	0.04	0.60	0.32
	子龙村	0.06	1.00	0.32
	七里埔	0.03	0.42	0.29
	富阳村	0.06	1.64	0.87
	半边月村	0.01	0.46	0.45
株洲清水塘 工业区 $n=4$	清水塘 1#	0.02	0.27	0.36
	清水塘 2#	0.06	0.66	0.57
	清水塘 3#	0.06	0.49	0.28
	清水塘 4#	0.22	1.54	1.09
衡阳水口 山矿区 $n=6$	三香村	0.08	1.39	0.72
	朱坡村 1#	0.11	0.74	0.44
	朱坡村 2#	0.09	1.14	0.91
	新桐村 1#	0.08	1.19	0.88
	新桐村 2#	0.06	0.83	0.55
	松柏镇	0.07	1.23	1.18

表明，土壤交换态 Pb 含量与大豆根、茎、叶中 Pb 含量之间存在着极显著正的线性关系 ($R^2=0.331\sim 0.790, n=21, R_{0.01}^2=0.301, R_{0.05}^2=0.187$)，与豆荚和籽粒之间的关系不显著 ($R_{\text{豆荚}}^2=0.101, R_{\text{籽粒}}^2=0.148$)。大豆各部位中 Pb 含量排列顺序为：叶片>茎秆>根系>豆荚≈籽粒。从图 1b 可以看出，土壤交换态 Cd 含量与大豆各部位 Cd 含量之间存在着显著或极显著正的线性关系 ($R^2=0.189\sim 0.594$)。大豆各部位中 Cd 含量排列顺序为：叶片>茎秆>根系>豆荚>籽粒。从图 1c 可以看出，土壤交换态 Zn 含量与大豆根、茎、叶、豆荚中 Zn 含量之间存在着极显著正的线性关系 ($R^2=0.400\sim 0.821$)，与籽粒之间的关系不显著 ($R_{\text{籽粒}}^2=0.074$)。大豆各部位中 Zn 含量排列顺序为：叶片>茎秆>根系>豆荚>籽粒。所有 21 个采样点中，大豆植株叶片中 Pb、Cd、Zn 含量均显著高于大豆植株其他部位的重金属含量，其主要原因可能是由于污染区大气中含重金属土壤颗粒在大豆植株叶片上的沉降和冶炼厂附近大气层中含有重金属气溶胶对植株叶片的长期作用。

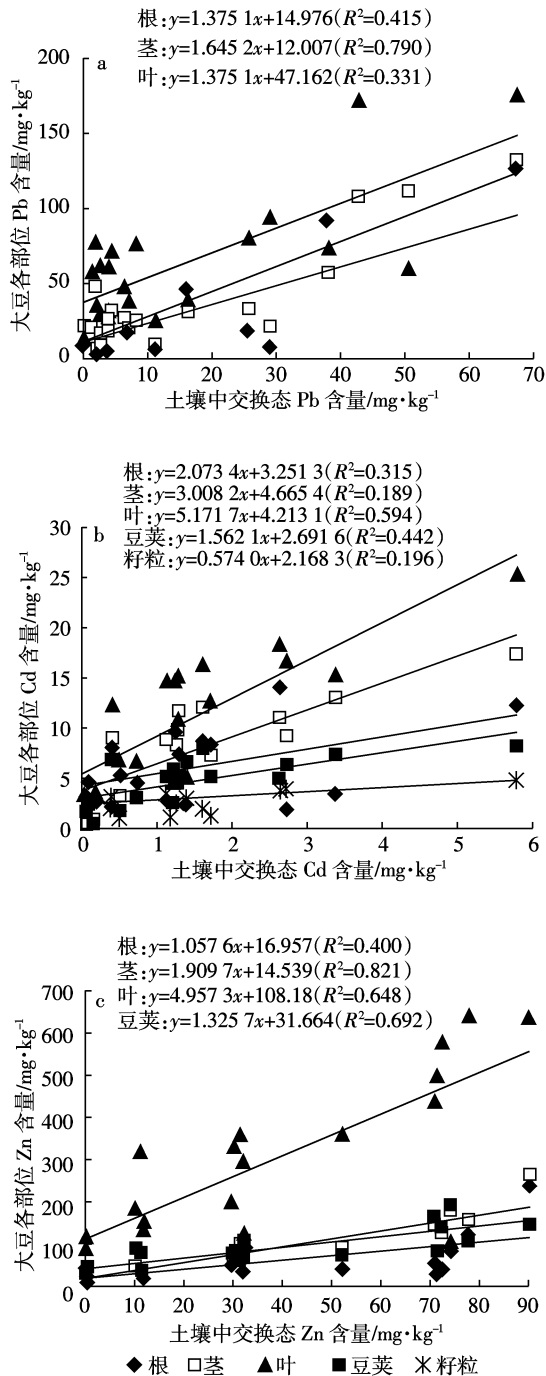


图 1 4 个工矿区土壤中交换态 Pb、Cd、Zn 含量与大豆各部位 Pb、Cd、Zn 含量的关系

Figure 1 Relations between the exchangeable contents of Pb, Cd and Zn in sampling soils of four industry and mine zones and the contents of Pb, Cd and Zn in various organs of soybean plants

3 结论

(1)参照土壤环境质量三级标准和食品中污染物限量标准中豆类标准,湖南省郴州柿竹园矿区、郴州桂阳宝山矿区、衡阳水口山矿区、株洲清水塘工业

区附近农田 21 个采样点的大豆籽粒样品及土壤样品已经受到了重金属污染。土壤中 Pb、Cd、Zn 的浓度范围分别为 269.02~6 450.35、3.04~23.93、104.22~381.91 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;大豆籽粒中这 3 种重金属的浓度范围分别为 4.69~20.05、0.81~5.48、24.87~190.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均已超过相应的标准。土壤污染最严重的是郴州宝山半边月村, $P_{\text{综}} = 19.09$;大豆籽粒污染最严重的为株洲清水塘 4# 采样点, $P_{\text{综}} = 76.26$ 。

(2)21 个采样点中大豆植株对 Pb、Cd 和 Zn 富集系数大小依次为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$,表明大豆植株对 Cd 富集能力大于 Zn 和 Pb。

(3)21 个土壤样品中交换态 Pb、Cd、Zn 含量与大豆植株样品各部位中这 3 种重金属元素含量存在着显著或极显著的正的线性关系。

参考文献:

- [1] 丛艳国,魏立华.土壤环境重金属污染物来源的现状分析[J].现代化农业,2002,27(1):18-21.
CONG Y G, WEI L H. Analysis of the source of heavy metal pollutants in soil environments[J]. *Modernization of Agriculture*, 2002, 27(1):18-21.
- [2] Akar T, Tunali S. Biosorption performance of *Botrytis cinerea* fungal by products for removal of Cd(II) and Cu(II) ions from aqueous solutions [J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(11):1099-1109.
- [3] 孙 健,铁柏清,钱 湛,等.湖南省有色金属矿区重金属污染土壤的植物修复[J].中南林业科技大学学报,2006,26(1):125-128.
SUN J, TIE B Q, QIAN Z, et al. Analysis of the feasibility of utilizing plants to repair heavy metal-contaminated soils of non-ferrous metal mine area in Hunan Province[J]. *Journal of Central of South Forestry University*, 2006, 26(1):125-128.
- [4] 雷 梅,岳庆玲,陈同斌,等.湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J].生态学报,2005,25(5):1146-1151.
LEI M, YUE Q L, CHEN T B, et al. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province[J]. *Acta Ecological Sinica*, 2005, 25(5):1146-1151.
- [5] Liao B H, Guo Z H, Probst A, et al. Soil heavy metal contamination and acid deposition:experimental approach on two forest soils in Hunan, Southern China[J]. *Geoderma*, 2005, 127:91-103.
- [6] 曾 敏,廖柏寒,曾清如,等.湖南郴州、石门、冷水江 3 个矿区 As 污染状况的初步调查[J].农业环境科学学报,2006,25(2):418-421.
ZENG M, LIAO B H, ZENG Q R, et al. Investigation of arsenic pollution of 3 mining areas in Chenzhou, Shimen, and Lengshuijiang, 3 cities in Hunan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2):418-421.
- [7] 何 谈,廖柏寒,曾 敏,等.湖南 4 个矿区稻田 As 污染状况的初步调查[J].生态毒理学报,2007,25(2):418-421.
HE T, LIAO B H, ZENG M, et al. Investigation on arsenic pollution of paddy fields in 4 mining areas in Southern Hunan [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 25(2):418-421.
- [8] 雷 鸣,曾 敏,郑袁明,等.湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污

- 染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6):1212-1220.
- LEI M, ZENG M, ZHENG Y M, et, al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(6):1212-1220.
- [9] 姬艳芳, 李永华, 孙宏飞, 等. 凤凰铅锌矿区土壤-水稻系统中重金属的行为特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2143-2150.
- JI Y F, LI Y H, SUN H F, et, al. Translocation and accumulation of heavy metals in soil-paddy system at Fenghuang lead-zinc deposit area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2143-2150.
- [10] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-851.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12-14, 109, 208-211, 334-335.
- Lu R K. Chemical analysis of soil agricultural[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 12-14, 109, 208-211, 334-335.
- [12] 陆书玉. 环境影响评价[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 121-123.
- Lu S Y. Environmental impact assessment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 121-123.
- [13] 柴立元, 何德文. 环境影响评价学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006: 255-280.
- CHAI L Y, HE D W. Environmental impact assessment[M]. Changsha: Central South University Press, 2006: 255-280.
- [14] Patrick A, Christiane C. Heavy metal phytoremediation from a meta-analytical perspective[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(1):231-237.
- [15] Sutapa B, Bhattacharyya A K. Heavy metal accumulation in wheat plant grown in soil amended with industrial sludge[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(7):1264-1272.