

石灰及其后效对玉米吸收重金属影响的田间实例研究

邵 乐, 郭晓方, 史学峰, 许田芬, 卫泽斌, 吴启堂

(农业部生态农业重点开放实验室, 华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系, 广州 510642)

摘 要:通过田间试验方法,研究了在铅锌矿废水污染的土壤上施用石灰 1 a 后,继续施用石灰和石灰后效处理对后续第 1、2 季低累积玉米(*Zea mays*)的产量以及重金属 Cd、Pb、Zn 和 Cu 含量的影响,并分析了土壤 pH、土壤 DTPA 提取态重金属含量和土壤重金属全量的变化。结果表明,连续施用石灰和石灰后效均显著提高玉米产量,其中连续施用石灰处理效果最佳,第 1 季籽粒产量是对照(无石灰)的 6 倍,第 2 季是对照的 3.8 倍。与对照相比,连续施用石灰处理显著降低了 2 季玉米籽粒 Cd、Pb、Zn 和 Cu 含量,石灰后效只能降低第 2 季玉米茎叶 Cd、Pb 和 Cu 含量,而籽粒 Cd、Pb 含量与对照相比略有升高,说明石灰后效能维持一年半左右。对照处理土壤 Cd 和 Zn 全量显著低于石灰处理,可能是土壤中 Cd 和 Zn 随着雨水的淋洗向下层迁移造成的。施用石灰可防止 Cd 和 Zn 对地下水的污染。

关键词:玉米;石灰后效;重金属

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)10-1986-06

Effect of Lime on Heavy Metals Uptake by *Zea mays* and the Persistence of the Liming Effect

SHAOL Le, GUO Xiao-fang, SHI Xue-feng, XU Tian-fen, WEI Ze-bin, WU Qi-tang

(Key Laboratory on Eco-agriculture of the Ministry of Agriculture, Department of Environmental Science and Engineering, College of Natural and Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Liming can generally decrease the phyto-availability of heavy metals to the immediately subsequent crop. How long it can maintain of this liming effect is still to be verified. A field experiment was carried out one year after the first liming, to study the continuous application of lime and the residual effects of lime on growth and heavy metals(Cd, Pb, Zn, Cu) concentration of a low-accumulating cultivar of *Zea mays* in a soil contaminated by waste water from a lead /zinc mine. Changes in soil pH, DTPA-extractable heavy metals contents and total heavy metals contents as affected by application of lime were also determined. Results showed that the yield of the plant increased significantly for both treatments of continuous application and residual effect of lime, but the better treatments was continuous application of lime, where the grain yield was 6 times as the control in the first crop and 3.8 times in the second crop. The treatments of continuous application of lime lowered the heavy metals(Cd, Pb, Zn, Cu) content significantly in grains as compared with the control. Residual effect of lime did not decrease the heavy metals(Cd, Pb, Zn, Cu) contents in corn grains in the second crop as compared with the control. It showed that the persistence of liming effect was only one and a half years. The soil total Cd and Zn of the control without any lime addition were significant lower than limed treatments, indicating that Cd and Zn in the soil were leached to the deep layer of the soil with the rain water, and the application of lime can prevent the contamination of underground water by Cd and Zn.

Keywords: *Z. mays*; residual effect of lime; heavy metals

随着工业的发展和农业生产的现代化,土壤-植物-环境系统中重金属污染问题日趋严重^[1]。重金属污染土壤后,不仅严重危害作物产量和质量,而且进入

食物链危害人畜健康^[2]。因此,有必要采取措施阻隔重金属进入食物链。

在中轻度重金属污染的土壤上,不种叶菜、块茎类蔬菜而改种食用部位污染物累积少的作物,如瓜果类蔬菜或果树等,能有效降低农产品的重金属含量^[3]。不同作物对污染物的吸收累积不同,同一作物的不同品种对污染物的吸收累积也不同^[4-5]。我们已经筛选出一些低累积玉米品种,在污染土壤上种植可以生产出符合食品或饲料卫生标准的籽粒^[6-8]。因此,根据我国

收稿日期:2010-04-27

基金项目:国家 863 项目(2008AA10Z405, 2007AA061001-3);国家自然科学基金项目(40801115);广东省科技计划项目(2007A032303001, 2009B030802016, 2009A020101005)

作者简介:邵 乐(1984—),女,湖南人,硕士研究生,主要从事污染土壤修复研究。E-mail:swlh030601@yahoo.com.cn

通讯作者:吴启堂 E-mail:wuqitang@scau.edu.cn

人多地少、农业产品短缺的基本国情,在中轻度重金属污染土壤上,种植低累积玉米品种,可明显减轻农产品中污染物的含量,是提高我国重金属污染土壤生产力潜力的方法。

此外,添加土壤改良剂改变土壤的理化性质,通过对重金属的吸附、沉淀或共沉淀等作用,改变重金属在土壤中的存在形态,从而降低其生物有效性和迁移性^[9]。近年来的研究表明,石灰、有机肥、钙镁磷肥、工农业废渣等可以降低重金属的生物有效性,抑制作物吸收重金属,从而阻隔重金属进入食物链^[10-17]。目前,对于石灰改良土壤、降低作物对重金属的吸收已经开展了大量研究,包括田间试验条件下施用石灰对当季作物的影响^[8]。但是石灰的后效能维持多久,未见相关报道。本文进一步研究石灰及其后效对低累积玉米的生长和吸收重金属的影响,为重金属污染农田的有效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

日本 HITACHI 公司原子吸收光谱仪(火焰法)Z-2300;雷磁精密 pH 计 PHS-3C;江苏太仓市实验设备厂恒温振荡器 THZ-4;上海实验电炉厂箱式电阻炉 SX-4-10;上海迅能电热设备有限公司电热鼓风恒温干燥箱 101-3AS 等。

1.2 供试材料

供试作物:玉米(*Zea mays*),Huidan-4 号品种,重金属低累积品种^[6]。

供试改良剂:石灰,基本理化性质见表 1。

1.3 试验设计

试验在广东省清远市佛冈县某铅锌矿废水污染

的农田进行,试验地土壤基本理化性质见表 1。试验共设 3 个处理:连续施加石灰处理、石灰后效处理以及无石灰的对照处理,连续施加石灰处理是在 2008 年 3 月施过石灰(0.4 kg·m⁻²)的小区上继续追施相同用量的石灰,后效处理是在 2008 年 3 月施过石灰(0.4 kg·m⁻²)的小区上不再追施石灰,对照处理是从未施过石灰的小区,每个处理 4 个重复,共计 12 个小区,每小区面积为长 2 m×宽 1.2 m,每次重复集中在一个区组内,区组内处理随机分布。

试验在 2009 年 3 月开始,播种玉米前,连续石灰处理的小区,先将石灰与土壤混合均匀。2009 年 3 月播种玉米,每个小区种 12 棵(50 cm×60 cm)。种植期间按常规方法进行田间管理。3 个月后收获玉米,收获第 1 季后,2009 年 7 月将土壤翻耕后继续种植第 2 季,种植前不再施加石灰。玉米分籽粒和茎叶两部分收获,样品用去离子水洗净,烘干称重,磨细测定植物 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量。收获后分别采取小区耕层土壤,风干过筛后测定全量重金属含量、DTPA 提取态重金属含量和 pH。

1.4 分析与测定方法

土壤全 Cd、全 Pb、全 Cu、全 Zn 采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消煮-原子吸收光谱法(GB/T17138—1997)。土壤 pH 以电位测定法测定,水土比 2.5:1(鲁如坤,2000);土壤 DTPA-Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量以 DTPA-TEA-CaCl₂ 浸提,火焰原子吸收分光光度计(Z-2300)测定(鲁如坤,2000);植物样 Cd、Pb、Cu 和 Zn 含量测定,称取植物粉碎样,先在低温电炉上使其炭化至无烟后移入马弗炉中,(500±25)℃灰化约 8 h 后取出坩锅,冷却后加盐酸(1:11)溶解,用火焰原子吸收分光光度计(Z-2300)测定(GB/T5009.14—1996)。

表 1 供试土壤及改良剂基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of tested soil and amendment

土壤及改良剂 Soil and amendment	CEC/cmol·kg ⁻¹	pH	有机质 OM/ g·kg ⁻¹	全 N Total N/ g·kg ⁻¹	全 P Total P/ g·kg ⁻¹	全 K Total K/ g·kg ⁻¹	碱解 N Available N/mg·kg ⁻¹
土壤 Soil	5.02	4.60	43.3	2.04	0.75	21.1	168
石灰 Lime	2.10	12.6	—	0.02	0.14	4.4	—

土壤及改良剂 Soil and amendment	速效 P Available P/ mg·kg ⁻¹	速效 K Available K/ mg·kg ⁻¹	重金属总量 Total heavy metals/mg·kg ⁻¹			
			Cd	Pb	Cu	Zn
土壤 Soil	73.3	127	0.80(0.3)	127.8(250)	86.64(50)	199.1(200)
石灰 Lime	1.34	191	0.4	19.9	ND	14.7

注:括号内数据为国家土壤环境质量标准GB15618—1995 二级标准中土壤 pH<6.5 时标准值;ND,未检出。
Note: Values in the parentheses was the standard values of heavy metals in agricultural soils with pH<6.5 according to the Chinese National Standard GB15618—1995; ND=Not detected

1.5 数据分析方法

数据采用 Excel2003 处理,多重比较统计分析由 SAS9.0 数据统计软件完成。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对玉米生物产量的影响

第 1 季田间试验,从整个生长季节来看,对照(无石灰)处理的玉米出苗后,叶片发黄,生长缓慢,这可能是土壤 pH 较低的原因。连续石灰处理和石灰后效处理明显提高玉米籽粒和茎叶产量(图 1),处理间达到显著差异,其中石灰处理生物量最高,籽粒产量是对照的 6 倍,茎叶产量是对照的 2.1 倍。石灰后效处理与对照相比也显著提高了玉米籽粒和茎叶的生物量,但显著低于连续石灰处理,这说明经过一年多的时间,石灰仍然有一定后效,但后效逐渐减弱。

与对照处理相比,连续石灰处理和石灰后效处理显著提高了第 2 季玉米籽粒和茎叶产量(图 1),说

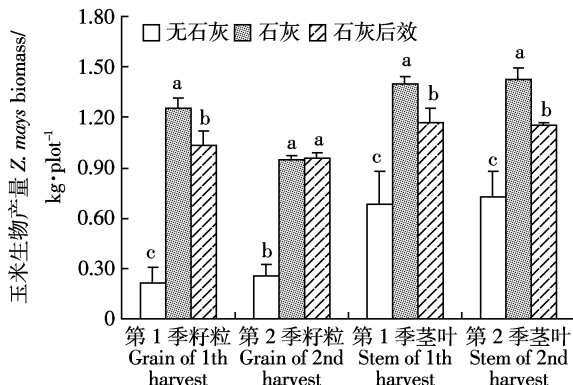


图 1 不同处理对玉米生物量的影响

Figure1 Biomass yield of two crops of *Z. mays* in different treatments

明施石灰半年和一年半后,对玉米的产量均有一定的后效。

连续石灰处理和石灰后效处理均显著提高连续两季玉米的生物量,主要原因可能是石灰改变了土壤酸性环境和降低了重金属毒性,从而增加玉米产量。在本试验条件下连续 2 a 施用石灰尚未显示出长期施用石灰造成土壤板结对作物产生的负面影响,可能是施用时间还不够长,或者本试验的土壤属砂质土壤不易造成板结有关。

2.2 不同处理对玉米重金属含量的影响

2.2.1 不同处理玉米籽粒重金属含量

第 1 季田间试验结果表明(表 2),连续石灰处理和石灰后效处理均显著降低了玉米籽粒 Cd、Pb、Zn 和 Cu 含量。与对照相比,连续石灰处理玉米籽粒 Cd、Pb、Zn 和 Cu 含量降低幅度分别为 66.7%、50.0%、13.8%和 31.8%,石灰后效处理籽粒 Cd、Pb、Zn 和 Cu 含量降低幅度小于连续石灰处理。连续石灰处理籽粒重金属含量显著低于对照处理(表 2),说明前期试验所施石灰抑制玉米吸收重金属有很好的后效作用。

连续石灰处理的第 2 季玉米籽粒重金属含量低于对照处理,说明半年后石灰还有较好的后效,而石灰后效处理的第 2 季玉米籽粒重金属含量高于对照处理(表 2),说明石灰后效能维持一年半左右,要想保持较好的效果,需继续施加石灰。

两季结果表明,连续石灰处理均能降低玉米对重金属的吸收。有研究表明,石灰中包含的 Ca^{2+} 对重金属离子具有拮抗作用,参与竞争植物根系上的吸收位点,抑制植物对重金属的吸收,从而降低玉米籽粒 Cd、Pb、Zn 和 Cu 的含量^[19-20]。

从表 2 还可以看出,所有处理的两季玉米籽粒重

表 2 不同处理两季玉米籽粒重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Concentrations($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)of Cd,Pb,Zn and Cu in the grains of *Z. mays* in different treatments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatment		Cd	Pb	Zn	Cu
第 1 季 1st harvest	无石灰 Control	0.09±0.01a	0.12±0.01a	39.1±3.8a	4.40±0.90a
	石灰 lime addition	0.03±0.01b	0.06±0.00c	33.7±1.7b	3.00±0.20b
	石灰后效 lime residue effect	0.04±0.00b	0.09±0.01b	34.7±1.1b	3.40±0.50b
第 2 季 2nd harvest	无石灰 Control	0.09±0.01ab	0.11±0.02b	36.9±5.1ab	3.98±0.66a
	石灰 lime addition	0.05±0.005b	0.10±0.00b	31.5±0.8b	3.62±0.18a
	石灰后效 lime residue effect	0.10±0.04a	0.15±0.01a	38.4±0.4a	3.78±0.31a
食品卫生标准 Standards of Foods		0.1	0.2	50	10
标准代码 Standard code		GB 2762—2005	GB 2762—2005	GB 13106—1991	GB 15199—1994

注:表中数据为平均值±标准误;同一季同列具有相同字母的数据间无显著性差异($P=0.05$)。下同。

Note: The values in the table were Mean±STD; Within the same column, values followed by the same letter are insignificantly different from one another at $P=0.05$. The same below.

金属含量都符合食品卫生标准,但石灰有一定的后效期,在施加石灰一年半后连续施加石灰才能使玉米籽粒重金属含量更低。因此,在此重金属污染农田上施加石灰种植玉米生产粮食是可行的。

2.2.2 不同处理玉米茎叶重金属含量

由表 3 可见,连续石灰处理和石灰后效处理均降低了第 1 季和第 2 季玉米茎叶 Cd、Pb 和 Zn 的含量。与玉米果实重金属含量不同,玉米茎叶 Cd 含量仍显示明显的石灰后效。然而连续石灰处理玉米茎叶 Cd、Pb、Zn 和 Cu 的含量最低,与对照相比,降低幅度分别为 69.0%、51.1%、46.6%和 49.0%。

所有处理玉米茎叶 Cd、Pb、Zn 和 Cu 含量均不高,连续石灰处理和石灰后效处理的玉米茎叶重金属含量均符合饲料卫生标准。在重金属污染土壤施加石灰种植玉米,产生的茎叶可以作为饲料。

2.3 不同处理对土壤 pH、DTPA 提取态重金属含量及土壤全量重金属含量的影响

土壤重金属对植物的毒害和植物对重金属的吸

收,在很大程度上取决于其在土壤中存在的形态,容易被植物吸收的形态也容易对植物的生长产生影响^[16]。土壤中以有效态形式存在的重金属容易被植物吸收^[21]。研究表明^[22],土壤 pH 值是影响土壤有效态重金属的重要因素。从表 4 可以看出,不同处理间土壤 pH 值差异显著,石灰处理土壤 pH 值最高,第 1 季比石灰后效处理提高了 1.39 个单位,第 2 季提高了 2.73 个单位;第 1 季连续石灰处理土壤 DTPA-Cd、DTPA-Pb、DTPA-Zn、DTPA-Cu 含量分别比石灰后效处理降低了 17.6%、19.2%、50.4%、16.4%,第 2 季分别降低了 16.2%、10.6%、42.2%、12.9%,这是石灰处理玉米籽粒 Cd、Pb、Zn 和 Cu 含量低于石灰后效处理的原因之一。

从表 4 还可以看出,两季结果均表明,连续石灰处理和石灰后效处理土壤 pH 值显著高于对照处理,但对照处理土壤 DTPA-Cd 和 DTPA-Zn 含量却显著低于连续石灰处理和石灰后效处理,这可能是由于对照处理土壤本身 pH 值较低,加上使用的化学氮肥

表 3 不同处理两季玉米茎叶重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 Concentrations(mg·kg⁻¹) of Cd,Pb,Zn and Cu in the stem of *Z. mays* in different treatments(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment		Cd	Pb	Zn	Cu
第 1 季 1st harvest	无石灰 Control	0.66±0.09a	3.00±1.00a	194±40a	9.9±3.4b
	石灰 lime addition	0.55±0.16a	2.60±0.30a	95±49b	18.6±2.6a
	石灰后效 lime residue effect	0.43±0.16a	1.00±0.30b	143±43ab	15.8±3.1a
第 2 季 2nd harvest	无石灰 Control	0.58±0.08a	2.82±0.32a	161±3a	8.74±0.74a
	石灰 lime addition	0.18±0.02b	1.38±0.14b	86±7b	4.46±0.23c
	石灰后效 lime residue effect	0.26±0.03b	1.52±0.39b	124±32ab	5.99±0.53b
饲料卫生标准		0.5	5	NP	NP
标准代码		GB 13078—2001	GB 13078—2001	NP	NP

注:NP,没有颁布。

Note: NP=Not published.

表 4 不同处理土壤 pH、DTPA 提取态重金属和全量重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 DTPA-extractable heavy metals content, total heavy metals content and pH of soil in different treatments(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment		pH	DTPA 提取 Cd DTPA-extractable Cd	全量 Cd Total Cd	DTPA 提取态 Pb DTPA-extractable Pb	全量 Pb Total Pb	DTPA 提取态 Zn DTPA-extractable Zn	全量 Zn Total Zn	DTPA 提取态 Cu DTPA-extractable Cu	全量 Cu Total Cu
第 1 季 1st harvest	无石灰 Control	4.10±0.06c	0.16±0.03c	0.48±0.05b	23.5±2.6a	137±17a	11.5±1.2b	217±6b	17.4±1.0a	126±9a
	石灰 lime addition	6.45±0.11a	0.28±0.02b	0.83±0.03a	16.4±1.4c	152±10a	10.8±0.8b	256±4a	14.3±1.1b	136±9a
	石灰后效 lime residue effect	5.06±0.18b	0.34±0.02a	0.85±0.04a	20.3±1.2b	147±4a	21.8±2.4a	260±10a	17.1±0.2a	143±15a
第 2 季 2nd harvest	无石灰 Control	4.16±0.17c	0.15±0.03c	0.46±0.06b	23.4±4.8a	124±29a	10.6±1.9c	213±7b	17.6±2.2a	125±12b
	石灰 lime addition	7.02±0.20a	0.31±0.05b	0.93±0.14a	20.3±0.7a	160±20a	13.7±0.7b	271±18a	17.5±0.9a	148±21ab
	石灰后效 lime residue effect	5.29±0.48b	0.37±0.02a	0.95±0.03a	22.7±2.3a	164±34a	23.7±1.7a	270±4a	20.1±1.3a	157±13a

NH_4^+ 的置换作用,经过雨水的淋洗,土壤中 Cd 和 Zn 向下层土壤迁移^[23],从而影响土壤 DTPA-Cd 和 DTPA-Zn 含量。另外,土壤全量 Pb 和 Cu 含量处理间无差异,可见石灰处理降低了土壤 DTPA-Pb 和 DTPA-Cu 含量。这也说明,土壤中 Cd 和 Zn 的迁移性大于土壤中 Pb 和 Cu,这与林文杰等^[24]研究结果相一致。从另外一方面可以说明,施加石灰可以防止 Cd 和 Zn 对下层土壤以及地下水的污染。

3 讨论

本试验所得出的关于对照处理土壤 DTPA-Cd 和 DTPA-Zn 含量显著低于连续石灰处理和石灰后效处理的结果与有关研究结果矛盾,有研究表明^[22],土壤 pH 值是影响土壤有效态重金属的重要因素。土壤 pH 越高,有效态重金属含量就越低,而本文加石灰的处理土壤 pH 高于对照处理,但是土壤 DTPA-Cd 和 DTPA-Zn 含量却显著高于对照处理,这可能是由于 DTPA 提取态中含有易被水淋洗的部分,而对照处理土壤本身 pH 值较低,加上使用的化学氮肥 NH_4^+ 的置换作用,经过雨水的淋洗,土壤中 Cd 和 Zn 就向下层土壤迁移了。本课题组前期通过土柱模拟试验得出佛冈土壤重金属全量和有效态含量都有向下层迁移的趋势^[23],因此本试验中对照处理土壤全 Cd 与全 Zn 与 DTPA-Cd 和 DTPA-Zn 才会低于石灰处理。

石灰的施用有可能导致土壤的结构、物化性质和生物学性质发生改变,但在本试验条件下连续 2 a 施用石灰尚未显示出长期施用石灰造成土壤板结对作物产生的负面影响,可能是施用时间还不够长,或者与本试验的土壤属砂质土壤不易板结有关。

4 结论

(1)连续石灰处理和石灰后效处理均显著提高玉米籽粒和茎叶产量,且玉米籽粒和茎叶 Cd、Pb、Zn 和 Cu 的含量均有降低,但连续石灰处理效果最佳,连续石灰处理玉米籽粒 Cd、Pb、Zn 和 Cu 的含量远低于食品卫生标准。

(2)酸性重金属复合污染土壤,石灰后效的持续时间为一年半左右,要想维持较好的效果,需在一年半左右时间施加一次石灰。

(3)酸性重金属复合污染土壤施加石灰处理,土壤表层重金属全量高于对照处理,说明石灰可将土壤中重金属固定在土壤的上层,防止其对地下水污染。

参考文献:

- [1] 陈怀满. 土壤-植物系统中重金属污染[M]. 北京:科学出版社, 1996: 71-125.
CHEN Huai-man. Heavy metals pollution in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996: 71-125.
- [2] Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals[J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 229-234.
- [3] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿, 等. 化肥种类对同品种菜心吸收累积 Cd 的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(1): 103-106.
WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou, et al. Effect of chemical fertilizer sources on uptake and accumulation of Cd by *Brassica chinensis* cultivars[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(1): 103-106.
- [4] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390: 301-310.
- [5] Yu H, Wang J L, Wei F, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370: 302-309.
- [6] Samake M, Wu Q T, Mo C H, et al. Plants grown on sewage sludge in South China and its relevance to sludge stabilization and metal removal [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 15: 622-627.
- [7] Wu Q T, We Z B, Ouyang Y. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting[J]. *Water Air Soil Pollut*, 2007, 180: 131-139.
- [8] 郭晓方, 黄细花, 卫泽斌, 等. 低累积作物与化学固定联合利用中度重金属污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 2122-2123.
GUO Xiao-fang, HUANG Xi-hua, WEI Ze-bin, et al. Agricultural production on heavy metal moderately-contaminated soil using low-accumulating crop with chemical fixation amendment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 2122-2123.
- [9] McGowen S L, Basta N T, Brown G O. Use of diammonium phosphate to reduce heavy metal solubility and transport in smelter-contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 493-500.
- [10] 林匡飞, 项雅玲, 刘雪峰, 等. 钙镁磷肥和硅肥对水稻产量及镉吸收的影响[J]. 土壤肥料, 1994, 6: 26-29.
LIN Kuang-fei, XIANG Ya-ling, LIU Xue-feng, et al. Effect of calcium magnesium phosphate and Si fertilizer on rice growth and Cd contents of rice[J]. *Soils and Fertilizers*, 1994, 6: 26-29.
- [11] 王 新, 吴燕玉. 改性措施对复合污染土壤重金属行为影响的研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 440-444.
WANG Xin, WU Yan-yu. Effect of modification treatments on behaviour of heavy metals in combined polluted soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(4): 440-444.
- [12] 傅显华, 吴启堂. 不同物料对叶菜吸收镉铅的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(4): 145-149.
FU Xian-hua, WU Qi-tang. Effects of some soil amendments on Cd and Pb uptake by leaf vegetables[J]. *Agro-Environmental Protection*,

- 1995, 14(4):145-149.
- [13] 屠乃美, 郑 华, 邹永霞, 等. 不同改良剂对铅镉污染稻田的改良效应研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(60):324-326.
- TU Nai-mei, ZHENG Hua, ZOU Yong-xia, et al. Effects of different modifiers on rice growth and Pb and Cd contents of rice and soil in Pb-Cd-contaminated paddy field[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(60):324-326.
- [14] Simon L. Stabilization of metals in acidic mine spoil with amendments and red fescue(*Festuca rubra* L.) growth[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2005, 27:289-300.
- [15] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克, 等. 3 种改良剂对不同土壤-水稻系统中 Cd 行为的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):834-840.
- ZONG Liang-gang, ZHANG Li-na, SUN Jing-ke, et al. Effects of three amendments on behaviors of cadmium in different soil-rice system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):834-840.
- [16] 孙 健, 铁柏清, 周 浩, 等. 不同改良剂对铅锌尾矿污染土壤中灯心草生长及重金属积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3):637-643.
- SUN Jian, TIE Bo-qing, ZHOU Hao, et al. Effects of different amendments on the growth and heavy metals accumulation of *Juncus effuses* grown on the soil polluted by lead/zinc mine tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):637-643.
- [17] Mishra M, Sahu R K, Padhy R N. Growth, yield and elemental status of rice(*Oryza sativa*) grown in fly ash amended soils[J]. *Ecotoxicology*, 2007, 16:271-278.
- [18] 黑 亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应[J]. 环境科学, 2007, 28(4):852-858.
- HEI Liang, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Effect of Co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):852-858.
- [19] 汪 洪, 周 卫, 林 葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1):78-87.
- WANG Hong, ZHOU Wei, LIN Bao. Effects of Ca on growth and some physiological characteristics of maize under Cd stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1):78-87.
- [20] 陈 宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、Cd、Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):549-552.
- CHEN Hong, CHEN Yu-cheng, YANG Xue-chun. Regulation of phyto-availability of Hg, Cd, Pb in soil by limestone[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5):549-552.
- [21] 尚爱安, 刘玉荣, 梁重山, 等. 土壤重金属的生物有效性研究进展[J]. 土壤, 2000(6):294-300.
- SHANG Ai-an, LIU Yu-rong, LIANG Zhong-shan, et al. Progress in study of the bioavailability of heavy metals in soils[J]. *Soils*, 2000(6):294-300.
- [22] Li P, Wang X X, Zhang T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20:449-455.
- [23] 周建利. 铅锌矿废水污染土壤联合修复技术及对地下水的影响[D]. 广州:华南农业大学, 2009:62-88.
- ZHOU Jian-li. Chelator-enhanced phytoremediation of lead-zinc mining wastewater contaminated soils and associated possible leaching risk[D]. Guangzhou:South China Agricultural University, 2009:62-88.
- [24] 林文杰, 肖唐付, 周晚春, 等. 黔西土法炼锌区 Pb、Zn、Cd 地球化学迁移特征[J]. 环境科学, 2009, 30(7):2065-2070.
- LIN Wen-jie, XIAO Tang-fu, ZHOU Wan-chun, et al. Environmental concerns on geochemical mobility of lead, zinc and cadmium from zinc smelting areas:Western Guizhou, China [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(7):2065-2070.