

施用改良剂对岩溶地区矿山污染农田 土壤中锌生物有效性的影响

施春婷¹, 顾明华^{1*}, 黄崇玲¹, 张超兰², 何冰¹, 梁富妮¹

1. 广西大学农学院, 广西 南宁 530005; 2. 广西大学环境学院, 广西 南宁 530005

摘要:以玉米 (*Zea mays* L.) 为研究对象, 采用盆栽试验, 观测在重金属锌污染的土壤 (总锌含量为 $1412.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上施用不同改良剂 (石灰、石灰+泥炭、石灰+胡敏酸钠、石灰+泥炭+硅肥、石灰+胡敏酸钠+硅肥, 分别简称 S、SN、SH、SNG、SHG) 对土壤锌形态、生物有效性及其在作物中富集的影响。结果表明, 施用各种改良剂均显著提高土壤 pH 值, 显著降低土壤弱酸可溶态锌和可还原态锌含量, 提高可氧化态锌和残渣态锌含量; 提高玉米生物量和产量, 增产效果为 $\text{SHG} > \text{SNG} > \text{SH} > \text{SN} > \text{S}$ 。施入改良剂可显著降低锌在玉米不同部位的吸收和转运, 植株根、茎、叶、籽粒锌富集明显下降, 以 SHG、SNG 的效果最明显, S 的效果最小。

关键词: 土壤改良剂; 玉米; 锌; 生物有效性

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 05-0952-05

我国铅锌矿蕴藏量十分丰富, 分布广泛, 遍及全国。随着铅锌矿的常年开采, 矿渣、矿井深处的地下水与选矿水不断排放到周围农田, 从而造成锌的环境污染^[1]。对于重金属污染的土壤, 可以采用改良土壤性能的方法, 使污染物变成难迁移态或从土壤中去掉。由于重金属在土壤中的存在形态及其生物有效性受土壤中重金属的浓度及性质、土壤类型、农业措施及生态因子等多种因素的影响^[1-4], 因此, 通过施用石灰^[2, 5]、泥炭^[6-7]、胡敏酸钠^[8]及硅肥^[9]等土壤改良剂与土壤中的重金属发生酸碱反应或改变土壤固液相中重金属的分配、固相中重金属的形态及其比例等, 降低土壤中重金属的迁移活动性和生物有效性^[1, 10-11], 可有效降低植物对重金属的吸收, 是当前化学修复重金属污染土壤的重要措施之一, 同时也是农业增产的一项措施, 已得到了较普遍的应用。目前, 就这 4 种改良剂对重金属污染土壤的改良效应及其对土壤重金属生物有效性的研究较多, 但是对它们的配施效果及控制重金属的机制鲜见报道。此外, 由于改良剂类型及研究条件的差异导致不同研究结果之间有差异, 已有的方法在不同地区间难以直接应用。因此, 只有在具体的土壤环境条件开展针对性研究的基础上才能更好地提出有效的控制措施, 实现土壤改良与修复^[12]。

广西是我国“有色金属之乡”, 矿山多分布在岩溶地区, 开展矿山污染土壤治理研究对促进环

境保护和保障农业生产安全有重要意义。本试验以石灰、硅肥、泥炭、胡敏酸钠为原料, 组配成不同的土壤改良剂 (组合), 以岩溶地区矿山锌污染农田土壤为供试土壤, 采用盆栽试验研究施用土壤改良剂对土壤—玉米系统中锌的生物有效性的影响及其机理, 以期为本地区农田污染土壤的改良、作物安全生产研究与实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为玉米 (*Zea mays* L.), 品种为 Haihe-14 品种。供试改良剂为石灰 (pH 为 12.85)、泥炭 (pH 为 4.09)、胡敏酸钠 (pH 为 5.07)、硅肥 (pH 为 13.97)。试验在广西大学农学院农业资源与环境科学系网室内进行。

盆栽试验土壤为广西岩溶地区某铅锌矿区周边农田 0~20 cm 土层的土壤, 土壤类型为第四纪红土发育的赤红壤。土壤经室温风干后过 5 mm 筛备用。土壤基本理化性质为: pH 值 5.44, 有机质 $24.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $2.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $12.13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全锌含量 $1412.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试土壤 Zn 含量为我国土壤环境质量 (GB15618-1995) 二级标准值 ($200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 7 倍。

1.2 盆栽试验设计

试验共设 6 个处理 (表 1), 每个处理重复 3 次。

1.3 试验过程

于 2011 年 5 月 18 日将土壤、改良剂及复合肥

基金项目: 广西科技攻关项目 (桂科攻 1123001-9B)

作者简介: 施春婷 (1985 年生), 女 (壮族), 硕士研究生, 研究方向为土壤环境生态。E-mail: shichunting23@163.com

*通信作者: 顾明华 (1962 年生), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: gumh@gxu.edu.cn

收稿日期: 2012-04-15

表 1 试验设计及添加物料用量
Table 1 Experimental design and applied amendments

处理	施用物质及用量
CK	—
S	2 g·kg ⁻¹ 石灰
SN	2 g·kg ⁻¹ 石灰+10 g·kg ⁻¹ 泥炭
SH	2 g·kg ⁻¹ 石灰+10 g·kg ⁻¹ 胡敏酸钠
SNG	2 g·kg ⁻¹ 石灰+10 g·kg ⁻¹ 泥炭+0.7 g·kg ⁻¹ 硅肥
SHG	2 g·kg ⁻¹ 石灰+10 g·kg ⁻¹ 胡敏酸钠+ 0.7 g·kg ⁻¹ 硅肥

(15-15-15)混匀后装入塑料桶(直径为25 cm,高35 cm)中,每桶装土14 kg,施用复合肥(15-15-15)4.69 g(335.0 mg·kg⁻¹土),用自来水浇至土壤的田间最大持水量,平衡10天;5月23日在育苗盘上播玉米种子育苗。5月28日挑选大小、高度均匀的玉米苗移栽桶中。于玉米大喇叭口期(7月10日)每桶追施4.69 g尿素。试验期间,苗期、拔节期及乳熟以后土壤含水量保持在田间持水量60%~70%(称重法),拔节期至抽雄期、灌浆期至乳熟期土壤含水量保持田间持水量的80%。生长3个月后至2011年8月24日收获植株,采集土壤样品,分析土壤pH值、不同形态锌的质量分数、植株生物量及不同部位锌的质量分数,并计算锌的富集系数。

1.4 样品分析测试方法

土壤基本理化性质参照鲁如坤^[13]的方法:土壤pH值采用1:2.5的土水比,用酸度计进行测定;土壤有机质采用H₂SO₄-K₂CrO₇外加热法测定;土壤全氮采用半微量开氏法测定;全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定;全钾采用NaOH熔融-火焰光度法测定。土壤样品中Zn测定采用HCl-HNO₃-HF-HClO₄消解体系—AAS法测定^[14]。土壤中Zn的形态分级采用欧共体参比司(European Community Bureau of Reference)于1987年提出的三步连续提取程序(即BCR法)提取—AAS法测定^[15]。植株锌含量参照郭晓方等^[16]的方法(干灰化—AAS法)测定。

实验所用塑料、玻璃器皿均事先在10% HNO₃中浸泡24 h以上,并用去离子水洗净烘干;所用试剂均为分析纯,试剂溶液均用去离子水配制。

1.5 试验数据计算及统计方法

采用 SAS 9.0 统计软件和 Microsoft Excel 2003 软件进行试验数据的处理、作图及相关统计分析,采用 Duncan 检验法进行多重比较检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 施用土壤改良剂对玉米生物量及产量的影响

在锌污染土壤上施用土壤改良剂可以显著促

进玉米生长、提高玉米籽粒产量(图1)。未施加改良剂处理(对照)的玉米根、地上部生物量最低,分别为7.13 g·盆⁻¹、49.85 g·盆⁻¹,施用土壤改良剂显著增加了玉米根和地上部的生物量($P<0.05$),增加幅度分别达到4.52%~17.18%,14.47%~27.37%。其中SHG处理增加效应最明显,显著高于S处理,而SNG、SH、SN、S处理之间差异不显著。

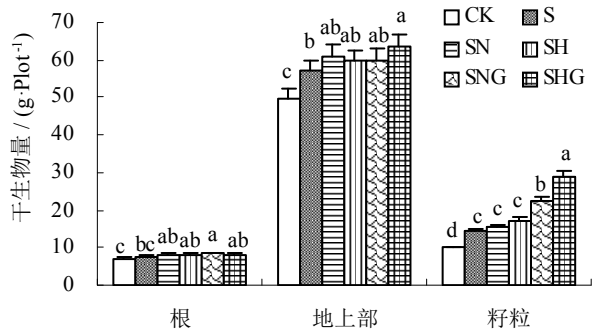


图 1 不同改良剂配施对玉米生物量干重的影响
(同一部位不同字母表示差异显著, $P<0.05$ 。下同)
Fig.1 The biomass of Maize in different treatments

施用改良剂后玉米籽粒产量均有显著提高,增产幅度达45.64%~193.25%。其中SHG处理的玉米籽粒产量最高,达到29.10 g·盆⁻¹,是对照的2.93倍,比其他改良剂处理增产29.05%~101.35%;其次是SNG处理,产量达22.55 g·盆⁻¹,是对照的2.72倍;SH、SN、S处理之间差异不显著。

2.2 施用土壤改良剂对土壤pH值及锌形态的影响

施用土壤改良剂的改良效果与其对土壤pH的影响程度有关。从表2可看出,施用土壤改良剂可提高土壤pH值,但不同改良剂效果差异显著($P<0.05$)。其中SHG改良剂的作用最明显,其次是SNG,分别提高了2.05和1.57个pH单位,而S改良剂的效果最小。

植物对重金属的吸收,不但取决于土壤中重金属的总量,还取决于其在土壤中的赋存形态。通过促进土壤中重金属向生物可利用性较低的形态转化,对降低重金属对植物的毒害有重要作用^[17]。从表2可看出,施用土壤改良剂显著改变了土壤中各种形态Zn的质量分数及其比例,显著降低弱酸可溶态Zn和可还原态Zn的质量分数,提高可氧化态Zn和残渣态Zn的质量分数。说明施入土壤改良剂有利于促进土壤中Zn向有效性低的形态转化,降低其生物有效性。其中,SHG处理的效应最明显,显著高于其它处理($P<0.05$);SNG仅次于SHG而显著优于其它处理;而S、SN、SH处理之间无显著差异。

表 2 不同处理土壤 pH 值及各形态锌的质量分数及比例
Table 2 The soil pH and the Zn forms in different treatments

处理	pH	弱酸可溶态 Zn		可还原态 Zn		可氧化态 Zn		残渣态 Zn	
		w(Zn)/(mg·kg ⁻¹)	%	w(Zn)/(mg·kg ⁻¹)	%	w(Zn)/(mg·kg ⁻¹)	%	w(Zn)/(mg·kg ⁻¹)	%
CK	5.56±0.01f	200.16±0.48a	14.28	165.45±0.46a	11.81	176.72±0.85d	12.61	859.16±2.54e	61.30
S	5.94±0.01e	168.25±1.03b	11.99	150.33±1.37b	10.72	202.02±0.90c	14.40	882.18±2.43d	62.89
SN	6.19±0.01d	157.09±0.94c	11.25	146.64±0.89c	10.50	204.20±0.55b	14.62	888.49±2.66bc	63.63
SH	6.67±0.04c	156.06±0.85c	11.15	144.81±0.51c	10.35	210.91±0.39a	15.07	887.67±1.14cd	63.43
SNG	7.13±0.01b	151.95±1.03d	10.88	144.38±0.52cd	10.34	206.04±0.55b	14.76	893.70±1.13ab	64.02
SHG	7.61±0.03a	149.08±1.23e	10.64	142.13±0.82d	10.15	210.16±0.53a	15.01	899.12±1.04a	64.20

w 表示 Zn 的质量分数; 表中数据为平均值±标准误, 同一列数据不同字母表示差异显著 (SAS, $P<0.05$)

土壤中 Zn 赋存形态的转化, 从而改变了各形态 Zn 的比例 (表 2)。对照处理土壤中弱酸可溶态 Zn、可还原态 Zn、可氧化态 Zn、残渣态 Zn 含量占全 Zn 量的比例分别为 14.28%、11.81%、12.61%、61.30%。施用土壤改良剂后, 前两种形态 Zn 的比例有较大幅度的下降, 分别下降 16.02%~25.46%、9.22%~14.04%, 而后两种形态 Zn 比例分别提高 14.21%~19.01%、2.58%~4.73%。同样, 以 SHG 和 SNG 的效应最明显。

可见, 改良剂的施用主要是促进了弱酸可溶态 Zn 和可还原态 Zn 向可氧化态 Zn 和残渣态 Zn 转化, 降低了前两种形态锌的质量分数及比例, 从而降低了土壤 Zn 的植物有效性。

2.3 施用土壤改良剂对玉米锌吸收和分配的影响

由图 2 可知, 锌在玉米不同部位的积累量表现为根>茎>叶>籽粒。对照处理的根、茎、叶和籽粒中锌的质量分数分别为 230.19、204.70、188.95 和 56.43 mg·kg⁻¹, 籽粒锌的质量分数已超出国家食品卫生标准 (50 mg·kg⁻¹) (GB/T 5009.10—2003)。施用土壤改良剂显著降低了玉米根、茎、叶及籽粒中锌的质量分数 ($P<0.05$), 降低幅度分别为 22.41%~28.66%、16.98%~21.84%、37.90%~45.78%、24.65%~30.90%, 以叶部锌的质量分数下降幅度最大, 籽粒锌的质量分数均降至

国家食品卫生标准的 50 mg·kg⁻¹ 以下。

可见, 在锌污染土壤上施用土壤改良剂可抑制玉米植株对锌的吸收及向地上部转运, 明显降低玉米根系、茎、叶和籽粒锌的质量分数。其中, 对降低玉米根系、茎、叶锌的质量分数的效应总体上表现为 SHG、SNG>SH>SN、S, SHG、SNG 和 SH 处理中玉米籽粒锌的质量分数稍低于 SN 和 S 处理。

2.4 施用土壤改良剂对玉米不同部位锌富集系数的影响

富集系数常用其来表征土壤-植物体系中元素迁移的难易程度, 是反映植物器官将重金属吸收转移到体内的能力大小的重要指标^[18-19]。由表 3 可看出, 玉米根部的锌富集能力最大, 其次为茎部, 最小的是籽粒, 说明锌大部分累积在根部 and 茎部。施用改良剂后, 玉米根、茎、叶、籽粒对锌的富集系数均有不同程度的下降, 降低幅度分别为 18.75%~25.00%, 17.2%~22.1%, 38.1%~45.5%, 25.0%~30.0%。不同改良剂的效应有一定的差异, 大致表现为 SHG≈SNG>SH>SN>S。说明改良剂的施入能不同程度地抑制植物根系和地上部对锌的吸收和富集, 且含有硅肥的处理抑制效果最明显。

表 3 锌在玉米体内的富集系数

Table 3 The bioconcentration factors of Zinc in different organs of maize

处理	富集系数			
	根	茎	叶	籽粒
CK	0.163	0.145	0.134	0.040
S	0.125	0.120	0.083	0.030
SN	0.126	0.117	0.081	0.030
SH	0.122	0.117	0.076	0.028
SNG	0.121	0.114	0.075	0.029
SHG	0.116	0.113	0.073	0.028

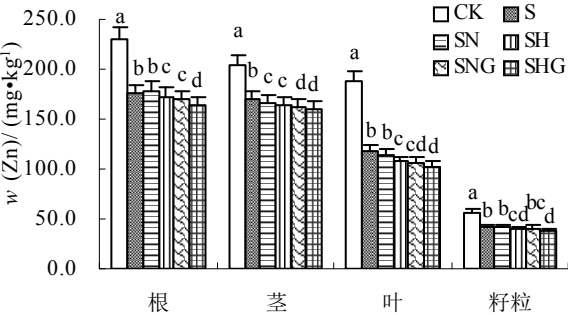


图 2 不同处理玉米不同部位锌的质量分数
Fig.2 The content of Zinc in different organ of maize in different treatments

3 讨论

3.1 单施石灰对玉米生长及 Zn 生物有效性的影响
石灰作为重金属污染土壤改良剂被认为是抑

制植株吸收重金属的有效措施。本研究结果表明,在 Zn 污染土壤中施加石灰显著提高了土壤 pH 值,土壤弱酸可溶态 Zn 和可还原态 Zn 含量显著降低,可氧化态 Zn 和残渣态 Zn 含量则明显提高。石灰中含有的较高浓度的 Ca^{2+} 也可能通过对根系表面交换位点的竞争机制来抑制植物对重金属的吸收^[20]。施入的石灰通过提高土壤 pH 及降低土壤中 Zn 的有效性,减轻土壤 Zn 对植物的毒害,从而促进玉米的生长和增产,玉米植株不同部位 Zn 的含量也得到显著降低,并使玉米籽粒 Zn 含量降至国家食品卫生标准的 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。高彬等^[21]研究也表明,在污染土壤中施用石灰后,土壤 pH 显著升高,莴苣、芹菜各部位 Cd、Zn 的含量呈下降趋势。

3.2 施用石灰+泥炭、石灰+胡敏酸钠对玉米生长及锌生物有效性的影响

尽管施用石灰可有效地降低土壤重金属的生物有效性,但是大量施用会对土壤理化性质产生不良影响^[10-11]。在本研究条件下,SN、SH 处理促进玉米生长和增产的效应、降低土壤 Zn 生物有效性及玉米 Zn 吸收的效应均显著高于 S 处理。这是因为石灰和泥炭、胡敏酸钠的配施,不仅显著提高土壤 pH,改良剂中有机物质含量较高,可有效改良土壤理化性状。而且有机物质含有较多的含氧功能团,能与金属氧化物、金属氢氧化物及金属离子形成化学和生物学稳定性的金属-有机络合物^[22],其稳定性随 pH 的提高而得到增强。更有利于土壤中弱酸可溶态 Zn 和可还原态 Zn 向可氧化态 Zn 和残渣态 Zn 转化。

本研究结果显示,SH 处理改良土壤效应较 SN 处理明显,这可能是因为:改良剂 SH 提高土壤 pH 的幅度较大;SH 中的胡敏酸含量较 SN 的高,而胡敏酸与重金属有很强的络合强度,通常高于结构相对较简单的有机配位体^[23]。而且由于泥炭中可溶性有机物含量较大及有机物料的分解等因素,会导致土壤中重金属的有效性提高或被固定的重金属重新释放出来^[7]。

3.3 施用石灰+泥炭+硅肥、石灰+胡敏酸钠+硅肥对玉米生长及 Zn 生物有效性的影响

研究表明,与其他改良剂相比,石灰+胡敏酸钠+硅肥 (SHG)、石灰+泥炭+硅肥 (SNG) 改良剂对提高土壤 pH、促进玉米的生长和增产效应、降低土壤有效 Zn 含量的效应最显著。这主要是由于这两个改良剂组合中硅肥的存在,改良剂本身的 pH 值高于其他改良剂,施入土壤后提高土壤 pH 更明显;硅酸盐物质可以与土壤中的锌形成硅酸锌沉淀,进而降低土壤锌的有效性,减少植物

对锌的吸收;硅可以促进植物的生长,并有增强作物抗重金属胁迫及增产优质的能力^[9, 24-25]。

4 结论

在锌污染土壤上施用 5 种土壤改良剂 (组合) 可显著提高土壤 pH 值,其效应 $\text{SHG} > \text{SNG} > \text{SH} > \text{SN} > \text{S}$; 并显著降低土壤中生物有效性较高的酸可溶态锌和可还原态锌含量及其比例,提高生物有效性较低的可氧化态锌和残渣态锌含量及其比例。土壤 pH 的提高是影响土壤锌形态转化的重要因素。

施入土壤改良剂后玉米籽粒产量和生物量显著增加,不同改良剂促进效应大小顺序依次为 $\text{SHG} > \text{SNG} > \text{SH} > \text{SN} > \text{S}$ 。

玉米植株各部位锌的分配规律为根>茎>叶>籽粒。施用土壤改良剂显著降低了玉米植株根、茎、叶的锌含量,其效果总体上表现为 $\text{SHG} > \text{SNG} > \text{SH} > \text{SN} > \text{S}$, SHG、SNG 和 SH 处理中玉米籽粒锌的含量稍低于 SN 和 S 处理,但是不同改良剂之间差异较小。

参考文献:

- [1] 陈怀满, 郑春荣, 陈英旭, 等. 土壤-植物系统中的重金属污染 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 255-256.
CHEN Huaiman, ZHENG Chunrong, CHEN Yingxu, et al. Heavy Metal Pollution in Soil-plant System [M]. Beijing: Science Press, 1996: 255-256.
- [2] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性机理研究 [J]. 农业环境保护, 1998, 17 (3): 101-103.
LIAO Min, HUANG Changyong, XIE Zhengmiao. Effects of Rare Earth Element Ions on Micronucleus Frequency in Root Tip Cell and Early Growth of Vicia Faba [J]. Agro-environmental protection, 1998, 17 (3): 101-103.
- [3] 杨亚提, 张一平. 陪伴离子对土壤胶体吸附 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的影响 [J]. 土壤通报, 2003, 40 (2): 208-223.
YANG Yati, ZHANG Yiping. Effects of accompanying ions on Cu^{2+} and Pb^{2+} adsorption on soil colloids [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 40 (2): 208-223.
- [4] 张磊, 宋凤斌, 崔良. 化肥施用对土壤中重金属生物有效性的影响研究 [J]. 中国生态农业学报, 2006, 14 (4): 122-125.
ZHANG Lei, SONG Fengbin, CUI Liang. Effects of application of chemical fertilizers on bioavailability of heavy metals in soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14 (4): 122-125.
- [5] 曹仁林, 霍文瑞, 何宗兰, 等. 不同改良剂抑制水稻吸收镉的研究: 在酸性土壤上 [J]. 农业环境保护, 1992, 11 (5): 195-198.
CAO Renlin, HUO Wenrui, HE Zonglan, et al. Research on Soil Modifiers in Relation to Inhibition of Cadmium Up-taking by Rice in Acid Soils [J]. Agro-environmental protection, 1992, 11 (5): 195-198.
- [6] 苏天明, 李杨瑞, 江泽普, 等. 泥炭对菜心-土壤系统中重金属生物有效性的效应研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (2): 339-344.
SU Tianming, LI Yangrui, JIANG Zepu, et al. Effect of peat on heavy metal bioavailability in soil system and flowering Chinese cabbage [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14 (2): 339-344.
- [7] IKSONG H, 胡林飞, 吴建军, 等. 泥炭对土壤镉有效性及镉形态变化的影响 [J]. 土壤通报, 2009, 40 (6): 1436-1441.
IKSONG H, HU Linfei, WU Jianjun, et al. Effects of Peat Applica-

- tion on the DTPA Extractable Cd and Cd Fractions in Two Contaminated Soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40 (6): 1436-1441.
- [8] 黄雪夏, 白厚义, 陈佩琼, 胡敏酸钠对镉锌复合污染的降毒研究[J]. 能源及环境, 2007 (17): 16-17.
HUANG Xuexia, BAI Houyi, CHEN Peiqiong. Study On Detoxification of Sodium Humate to Cadmium-zinc Compound Pollution[J]. China Science and Tecnology Information, 2007 (17): 16-17.
- [9] ALIN S, LI Zhaojun, ZHANG Jie, et al. Silicon-enhanced resistance to cadmium toxicity in *Brassica chinensis* L. Is attributed to Si-suppressed cadmium uptake and transport and Si-enhanced antioxidant defense capacity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172:74-83.
- [10] 孙铁珩, 李培军, 周启星, 等. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 210, 214.
SUN Tieheng, LI Peijun, ZHOU Qixing, et al. Pollution of soil forming mechanism and the repair technology[M]. Beijing: Science Press, 2005: 210, 214.
- [11] 李永涛, 吴启堂. 土壤污染治理方法研究[J]. 农业环境保护, 1997, 16 (3): 118-122.
LI Yongtao, WU Qitang. Study on Remedial Methods for soil Contamination[J]. Agro-environmental protection, 1997, 16(3): 118-122.
- [12] 李佳华, 林仁漳, 王世和, 等. 几种固定剂对镉污染土壤的原位化学固定修复效果[J]. 生态环境, 2008, 17 (6): 2271-2275.
LI Jiahua, LIN Renzhang, WANG Shihe, et al. Research on six amendments for in-situ chemo-immobilization of Cd contaminated soils[J]. Ecology and Environment, 2008, 17 (6): 2271-2275.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 12-20.
LU Rukun. Analysis methods of soil agro-chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 12-20.
- [14] GB/T 17138-1997 土壤质量铜、锌的测定[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 1997.
GB/T 17138-1997 Soil quality-Determination of copper, Zinc[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 1997
- [15] KEIVAN N, NOR KARTINI A B, ELHAM S, et al. A modification of the BCR sequential extraction procedure to investigate the potential mobility of copper and zinc in shrimp aquaculture sludge[J]. Microchemical Journal, 2009, 92: 165-169.
- [16] 郭晓方, 卫泽斌, 丘锦荣, 等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. 生态与农村环境学报, 2001, 26 (4): 367-371.
GUO Xiaofang, WEI Zebin, QIU Jinrong, et al. Differences Between Corn Cultivars in Accumulation and Translocation of Heavy Metals[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2001, 26 (4): 367-371.
- [17] 夏运生, 王凯荣, 张格丽. 土壤镉生物毒性的影响因素研究进展[J]. 农业环境保护, 2002, 21 (3): 272-275.
XIA Yunsheng, WANG Kairong, ZHANG Geli. Research Advances in Influence Factors of Phytotoxicity of Cadmium in Soil[J]. Agro-environmental Protection, 2002, 21 (3): 272-275.
- [18] 黄昀, 刘光德, 李其林, 等. 农产品对土壤中重金属的富集能力研究[J]. 中国农学通报, 2004, 20 (6): 285-289.
HUANG Yun, LIU Guangde, LI Qilin, et al. Investigation on accumulating ability of agricultural products to soil heavy metal[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20 (6): 285-289.
- [19] FAYIGA A. Arsenic Uptake by Two Hyper accumulator Ferns from Four Arsenic Contaminated Soils [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2005, 168 (1/4): 71-89.
- [20] 王凯荣, 张玉灿, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (2): 476-481.
WANG Kairong, ZHANG Yuzhu, HU Ronggui. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26 (2): 476-481.
- [21] 高彬, 王海燕. 土壤 pH 对植物吸收镉、锌的影响试验[J]. 广西农业科学, 2003, 3: 53-55.
GAO Bin, WANG Haiyan. The effect of soil pH on cadmium, zinc uptake by plant [J]. Guangxi Agricultural Science, 2003, 3: 53-55.
- [22] MARVIN S J, DABIES S H R. Effects of in-situ ozonation for the remediation of PAH contaminated soils[J]. Contam Hydrol, 1997, 28: 327-335.
- [23] 高卫国, 黄益宗. 堆肥和腐殖酸对土壤铅镉赋存形态的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 3 (3): 549-554.
GAO Weiguo, HUANG Yizong. Effects of humic acid and compost on speciation transformation of zinc and lead in soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3 (3): 549-554.
- [24] NEUMANN D, ZUR NIEDEN U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants[J]. Phytochemistry, 2001, 56, 685-692.
- [25] IWASAKI K, MAIER P, FECHT M, et al. Leaf apoplastic silicon enhances manganese tolerance of cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2002, 159: 167-173.

Effect of amendments on Zn bioavailability in polluted soil and Zn accumulation in maize

SHI Chunting¹, GU Minghua^{1*}, HUANG Chongling¹, ZHANG Chaolan², HE Bing¹, LIANG Funi¹

1. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China; 2. College of Environment, Guangxi University, Nanning 530005, China;

Abstract: A pot experiment of Maize (*Zea mays* L. var. Haihe-14) was conducted to study the effect of different amendments (Lime, Lime+Peat, Lime+Sodium Humate, Lime+Peat+Silicon fertilizer, Lime+Natrium Humate+Silicon fertilizer, which were labeled as S, SN, SH, SNG and SHG in short respectively) on the bioavailability and chemical form of Zinc in soil, and the accumulation of Zn in the maize in the contaminated soil by Zn, which total Zn content is 1412.09 mg·kg⁻¹. The results showed that the application of different amendments significantly increased soil pH, significantly reduced the content of acid soluble Zn and reducible Zn, and increased the content of oxidable Zn and residual Zn; increased the biomass and yield of maize. The influence degree followed the order: SHG>SNG>SH>SN>S. The amendments utilization significantly reduced the uptake and transportation of Zn among different organs of maize, and also reduced significantly the accumulation of Zinc in root, stem, leaf and grain of maize. And in the treatments SHG and SNG were most effective amendments, while it was the least with S amendment.

Key words: Soil amendments; Maize; Zinc; bioavailability