

施用石灰和有机物质对酸性镉污染土壤的改良效果及其影响因素

董宁宇^{1,2}, 陈中敏³, 宋丽娜³, 郑绍建³, 何云峰³

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 总参部环境监测中心站, 北京 100088; 3. 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州 310029)

摘要:通过在受铜冶炼厂“三废”污染的镉污染土壤上施用不同水平的石灰和有机物质(泥炭或堆肥),研究了施用石灰和有机物质对降低黑麦草吸收镉效果的影响。结果表明,施用石灰和有机物质可明显改善黑麦草的生长状况,以至在低水平石灰用量时还能表现出提高了黑麦草体内含镉量的现象;施用石灰不仅提高了土壤 pH,降低了 0.05 mol·L⁻¹CaCl₂ 提取的活性镉,而且还在一定程度上影响了镉在植物体内的分配,使镉在根系的累积增加,导致根系和地上部分含镉量之比明显上升;二种有机物质,堆肥的效果总体上优于泥炭,这与泥炭本身的 pH 较低有关,但配合施用石灰后效果均得到明显的改善。在本实验条件下,用土壤 pH 和 0.05 mol·L⁻¹ CaCl₂ 提取的活性镉均不能很好的反映出施用石灰和有机物质对黑麦草吸收镉的影响。

关键词: 镉污染土壤;石灰;有机物质;黑麦草

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)02-0590-06

Effect of Liming and Organic Matter Application on Cd Uptake by Ryegrass in a Cadmium (Cd) Contaminated Soil and Its Influencing Factors

DONG Ning-yu^{1,2}, CHEN Zhong-min³, SONG Li-na³, ZHENG Shao-jian³, HE Yun-feng³

(1. College of Resource and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Environmental Monitoring Center of the Headquarter of the General Staff, Beijing 100088, China; 3. College of Environment and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: One acidic Cd-contaminated soil was collected near a copper smelter to study the effect of liming and application of compost and peat on Cd uptake by ryegrass. The treatments consisted of three levels of liming, i.e. 2, 4 and 6 g·kg⁻¹ soil, and two levels of organic matter, i.e. 2.5% and 5% in a complete random design. Results showed that the application of both lime and organic matter significantly improved the growth of ryegrass. Liming remarkably increased soil pH and decreased 0.05 mol·L⁻¹ CaCl₂ extractable soil available Cd, however, the Cd content in ryegrass showed no significant decrease and even an increase in root, thus resulting in an increased R/S ratio of the Cd content in ryegrass, suggesting that liming can partly affect the translocation of Cd from root to shoot. Organic matter application could decrease Cd uptake, and such an effect was further improved with the addition of liming. Compost had better effect than peat due to the acidic property of the later, so it was important to take the pH of the organic matter into consideration when applying different organic matters to remediate Cd contaminated soils. It was highly recommended to apply acidic organic matter together with lime. Under the current experimental condition, soil pH and 0.05 mol·L⁻¹ CaCl₂ extractable available Cd were not the good index to reflect the impact of liming and organic matter application on Cd uptake by ryegrass.

Keywords: Cd contamination; liming; organic matter; ryegrass

镉是环境中对动物和人体毒性很大的重金属元素之一, 自上世纪 60 年代日本富山神通川流域居民

因长期食用镉污染土壤上所生产的“镉米”而发生了震惊世界的“骨痛病”公害事件以来, 日益引起了社会各界的深切关注。据报道, 目前我国遭受“三废”污染的农田已达 1 000 万 hm² [1]。农田污染不仅造成减产, 而且对人畜的健康构成威胁 [1,2]。大多数城市近郊土壤都受到了不同程度的污染, 如广州郊区老污灌区,

收稿日期: 2007-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(30570324)

作者简介: 董宁宇(1970—), 女, 高级工程师, 现从事环境监测工作。

E-mail: dongningyu2005@yahoo.com.cn

通讯作者: 何云峰 E-mail: yfhe@zju.edu.cn

土壤中 Cd 的含量最高达 $228 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $6.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 沈阳张土灌区有 $2\,533 \text{ hm}^2$ 土地遭受 Cd 的污染, 其中严重污染的占 13%^[3,4]。如何改良已受镉污染的土壤, 减少镉进入食物链就成为农业资源与环境工作者共同关心的问题。

镉污染土壤的治理国内外采用的方法大致有工程治理法、生物改良法和化学改良法 3 类。其中工程治理法因耗资巨大, 不宜大面积作业; 生物改良法对于进行大面积耕作制度的改变 (农作物→非农作物) 还需要多方面的合作, 而新近提出的筛选镉吸收和转移能力均弱的农作物品种以适应污染土壤, 虽前途诱人, 但该项工作尚处于起步阶段; 此外, 还可以通过种植超积累植物来修复受污染的土壤和水体^[5,6], 但由于目前报道的超积累植物基本上都存在着生长量小、生长速度慢的限制因子^[6], 使得修复过程极其漫长, 迄今尚没有在生产实际中广泛应用。因此, 化学改良法在今后一段时期内仍是一个应用广泛的方法。国内外众多学者对施用各种化学改良剂降低镉进入食物链的效果进行了大量的研究^[7-9], 一般认为在酸性污染土壤上施加石灰等碱性物质或一些有机物质均能起到降低作物体内含镉量的作用^[10-12]。但是也有一些相反的报道, 如 Pepper 等^[13]报道施加 CaCO_3 将土壤 pH 从 4.5 提高到 6.5 时, 并没有降低玉米体内的含镉量; 余贵芬等^[14]认为有机物质在土壤中易矿化和分解成有机酸类物质, 反而能增加部分植物对金属镉的吸收; Takijima 等^[15]报道施用厩肥可以降低水稻糙米含镉量, 但施加其他有机物质则效果不佳。最近, 李瑞美等^[16]比较了石灰与有机物质 (猪粪和泥炭) 对控制农作物吸收镉铅的影响, 结果发现, 石灰、石灰+泥炭和石灰+猪粪处理均能显著提高作物产量, 其中大部分处理能抑制水稻、花生对铜镉铅的吸收, 糙米中铅的含量在食品卫生标准范围内, 但是该研究所用供试土壤的 pH 近中性 (pH 6.3), 这对研究施用石灰的影响效果不是很合适。对此, 我们认为出现结果不一致的原因, 一是在石灰的用量上, 不同土壤 pH 存在着差异, 施加的石灰用量也应不尽相同; 二是有机物质的种类不同导致效果的差异; 三是供试土壤酸碱度不

同造成的差异。因此, 本文将研究石灰和两类性状差异很大的有机物质, 以不同水平单施和配施于受镉污染的酸性土壤上, 通过生物试验, 分析两者对污染土壤的改良效果, 并对影响其效果的可能因素进行探讨。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

污染土壤采自湖北省大冶有色金属公司铜冶炼厂附近受镉、锌、铜复合污染的水稻田。土壤 pH 4.63, 全 Cd 含量为 $9.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤有机质含量为 $29.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 物理性粘粒含量 49.6% ($<0.01 \text{ mm}$)。

1.2 生物试验

为了研究添加石灰和有机物质的效果, 本试验设置了不同石灰用量、不同有机物质种类及用量的处理。供试植物为黑麦草。

试验处理包括 3 个石灰水平, 分别为 2、4、6 $\text{g CaCO}_3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 土。为了研究不同有机物质的影响, 本试验采用了两类性质截然不同的有机物质: 一种是较易分解的堆肥 (以 A 表示), 另一种是性质较稳定抗分解的泥炭 (以 B 表示)。两者部分性状见表 1。有机物质设 2 个水平, 分别按重量比 2.5% 和 5% 加入。

按 3 个石灰水平, 2 个有机质水平进行完全随机区组设计, 有机物质 1 水平时不设石灰 3 水平, 共得 18 个处理, 见表 2。每个处理重复 3 次。按上述各处理的石灰和堆肥或泥炭用量均匀地混入镉污染土壤中, 加水至田间持水量的 70%, 在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 的培养箱中培养一年, 期间每隔 3 d 用称重法补充蒸发的水分。培养结束后, 将土壤风干, 彻底混匀后, 以 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, K_2HPO_4 和 KCl 形式施入基肥, 用量为 $\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O} = 0.15-0.10-0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 加水至田间持水量的 70% 后, 播种黑麦草, 两周后定苗为 $15 \text{ 棵} \cdot \text{盆}^{-1}$, 生长期间每天定量补充水分。两个月后收割黑麦草, 并取出根系, 同时采取土壤样品。将植物样洗净后, 在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 0.5 h, $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重。称重, 磨细, 备用。土样经风干磨细过 20 目筛备用。

1.3 测试项目与方法

表 1 堆肥和泥炭的有关性状

Table 1 The properties of the manure and peat

| 有机物质 | pH | 腐植酸总量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 游离腐植酸/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 粗灰分/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 总 Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
|------|------|--|--|--------------------------------------|--|
| A | 7.47 | 16.17 | 13.43 | 34.00 | n.d |
| B | 5.03 | 22.25 | 19.60 | 19.94 | n.d |

注: n.d 为未检出。

表2 试验设计组成表

Table 2 Symbols representing the treatments

| 石灰 | 堆肥 A | | 泥炭 B | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 1 水平 (2.5%) | 2 水平 (5%) | 1 水平 (2.5%) | 2 水平 (5%) |
| CK (0 g·kg ⁻¹) | A ₁₀ | A ₂₀ | B ₁₀ | B ₂₀ |
| 01 (2 g·kg ⁻¹) | A ₁₁ | A ₂₁ | B ₁₁ | B ₂₁ |
| 02 (4 g·kg ⁻¹) | A ₁₂ | A ₂₂ | B ₁₂ | B ₂₂ |
| 03 (6 g·kg ⁻¹) | | A ₂₃ | | B ₂₃ |

以 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 浸提,水土比 1:1, Beckman pH 计测定土壤 pH^[17];按郑绍建等提出的方法^[18],以 0.05 mol·L⁻¹ CaCl₂ 为提取剂,液土比 5:1,振荡 1.5 h 提取土壤活性镉;酸熔法消化土壤全镉^[17];地上部和根系样品,以 1 mol·L⁻¹ HCl 为提取剂,液样比 50:1,振荡 1.5 h 提取植物体内全镉^[17]。所有土壤浸提液或植株浸提液中的镉均采用原子吸收分光光度法测定。

所得结果用 DPS 软件进行相关分析和多重比较分析,以大写的英文字母表示 1%水平上的极显著差异。

2 结果与分析

2.1 施用石灰和有机物质对黑麦草生长的影响

无论是单施石灰、有机物质还是两者配合施用,均明显地改善了黑麦草的生长状况,其中又以配施的效果为最佳(表 3)。可见,在酸性镉污染土壤上,施加石灰和有机物质能提高植物生物量,减少镉及其他重金属污染及土壤自身基本性状不良对植物生长的影响。

2.2 施用石灰和有机物质对黑麦草吸收镉的影响

施用石灰后,黑麦草地上部分的含镉量明显下降,且石灰水平越高,下降越多,施 3 水平石灰时下降至 CK 的 60%(表 4),这与施用石灰后土壤 pH 明显提高,0.05 mol·L⁻¹ CaCl₂ 提取土壤活性镉明显下降的变化趋势是一致的。但根系含镉量却因施用石灰而有所提高,这可能一方面是由于施用石灰后极大地改善了根系的生长状况,反而增强了根系的吸收能力;另一方面是由于随着石灰施用量的提高,根系对镉的固定能力增加,从而减少了向地上部分的运转所致(表中 R/S 一项)。添加 3 水平石灰时 R/S 比是对照的近 3 倍,表明施用石灰还能在很大程度上改变镉在植株体内的分布。

添加堆肥和泥炭也能明显降低黑麦草体内的含镉量,且也随着添加用量的增加而进一步下降(表 5)。施 2 水平有机物质与单独施用石灰的相比,对地上部分含镉量的影响其效果明显优于 1、2 水平石灰,而与 3 水平石灰相当。这可能与施加有机物质后,提高了土壤的 CEC 有关。施 1 水平堆肥和泥炭时,土壤

表3 施用石灰和有机物质对黑麦草生长的影响 (g·盆⁻¹)Table 3 Effect of liming and organic matter application on the growth of ryegrass (g·pot⁻¹)

| 部位 | CK | | 施 CaCO ₃ | | 施 OM | | 两者配施 | |
|----|-----------|-----|---------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | 平均 | % | 平均 | % | 平均 | % | 平均 | % |
| S | 1.30±0.05 | 100 | 2.48±0.09 | 191.8 | 2.83±0.85 | 217.7 | 3.17±0.30 | 243.7 |
| R | 0.28±0.02 | 100 | 0.75±0.06 | 267.9 | 0.65±0.27 | 232.1 | 0.96±0.19 | 342.5 |

注:S为地上部分;R为根系。

表4 施用石灰对黑麦草吸收镉及土壤活性镉的影响

Table 4 Effect of liming on Cd uptake by ryegrass and soil available Cd

| 处理 | 黑麦草体内含镉量/mg·kg ⁻¹ | | | 土壤活性镉/mg·kg ⁻¹ | pH |
|----|------------------------------|--------------|-------|---------------------------|------------|
| | S | R | R/S | | |
| CK | 28.24±3.10A | 69.94±4.16C | 2.47C | 6.70±0.41A | 4.66±0.29A |
| 01 | 26.30±2.18A | 91.56±5.17B | 3.48B | 4.74±0.32B | 5.69±0.18B |
| 02 | 24.40±3.96A | 86.84±3.62B | 3.56B | 1.30±0.23C | 6.93±0.22C |
| 03 | 17.01±1.83B | 115.56±6.32A | 6.79A | 0.35±0.06D | 7.56±0.03D |

注:表中不同大写字母表示 1%水平上的极显著差异。

CEC分别比对照增加近10%和13%;2水平时,相应增加近15%和30%。有研究表明,土壤CEC与植物吸镉量成负相关^[19,20],说明在本文所研究的污染土壤中,单施有机物也可降低植物体内含镉量。

从 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 提取的土壤活性镉提取量上进一步发现,泥炭处理的土壤活性镉含量均明显高于堆肥处理,但植物体内反映的却是堆肥和泥炭处理在相同水平下体内含镉量基本相当,且2水平泥炭的处理根系含镉量明显低于2水平堆肥,这与土壤活性镉的结果正好相反(表5)。但两者对黑麦草生长状况的影响却表现为,堆肥的效果要明显好于泥炭,这与本试验中采用的泥炭酸性较强有关。添加泥炭后土壤pH与CK相近,而施用堆肥后土壤pH明显上升,反而促进了黑麦草的生长和对镉的吸收。

在石灰水平固定的情况下施加有机物质,无论施堆肥还是泥炭,黑麦草体内含镉量均比相应的石灰水平单施低(表6)。就两种有机物质的效果而言,相同石灰水平的泥炭处理下,黑麦草体内含镉量要高于堆肥处理下。这可能与泥炭pH低有关。以2水平石灰为例,单施2水平石灰时的土壤pH平均值为 6.93 ± 0.22 ,施堆肥后pH为 7.01 ± 0.24 ,而施泥炭后pH为 6.31 ± 0.28 。

在有机物质种类和水平固定的情况下,配施石灰后影响黑麦草吸镉的结果表明(表6),在有机物质水平相同的条件下配施石灰,黑麦草体内含镉量基本与单施有机物质的接近,有的还明显高于单施有机物

质。比较所有处理中黑麦草地上部分含镉量可以发现,体内含镉量最低的处理分别为2水平堆肥配合3水平石灰,表明在以石灰和有机物质作为改良剂时,两者配合施用的效果最佳。因此,在计算石灰用量时,还应充分考虑不同有机物质的种类,以求得各自的最佳石灰用量。

2.3 影响石灰和有机物质改良效果因素的探讨

由上面的结果不难看出,外加石灰和有机物质对镉污染土壤的改良效果并非在任何条件下均能取得正效应。从黑麦草体内含镉量来看往往会表现出一定甚至明显的负效应。Pepper等^[13]及其他一些研究者也曾做过类似的报道。下面就影响石灰和有机物质改良效果的几个因素进行一些探讨。

2.3.1 生长状况

外加石灰和有机物质可明显促进黑麦草的生长,尤其是对于pH较低的和重金属污染严重以致产生生长毒害的土壤更是如此。因此,对于复合污染类型的土壤,在添加低水平石灰和有机物质条件下,往往表现出由于刺激了生长,同时也促进了镉吸收的现象。这一现象与施用有机物质和石灰降低土壤镉活性的现象并存,两者共同作用决定了黑麦草体内的含镉量。当前者起主导作用时,则使之表现出负效应。

2.3.2 pH

相关分析表明,土壤pH与 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CaCl}_2$ 提取土壤活性镉含量呈极显著负相关(-0.9778^{**}),表明提高土壤pH可以降低镉的化学活性。这与文献报

表5 施用有机物质对黑麦草吸收镉及土壤活性镉的影响

Table 5 Effect of organic matter application on Cd uptake by ryegrass and soil available Cd

| 处理 | 黑麦草体内含镉量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | | 黑麦草生物量/ $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ | | 土壤活性镉/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 土壤 pH |
|-----------------|--|-------------|--|------------|---|------------|
| | S | R | S | R | | |
| CK | 28.24±3.10A | 69.94±4.16A | 1.30±0.11D | 0.30±0.05C | 6.70±0.41A | 4.66±0.29A |
| A ₁₀ | 18.98±2.31B | 64.56±3.96A | 3.27±0.25B | 0.86±0.13A | 5.31±0.34B | 5.27±0.11B |
| A ₂₀ | 15.02±1.80C | 46.35±2.82B | 4.01±0.28A | 0.91±0.18A | 3.94±0.23C | 5.54±0.09B |
| B ₁₀ | 22.10±2.55B | 64.50±3.05A | 2.63±0.17C | 0.52±0.10B | 6.12±0.35A | 4.95±0.25A |
| B ₂₀ | 14.81±1.86C | 34.87±2.33C | 3.29±0.26B | 0.58±0.11B | 6.52±0.32A | 4.62±0.23A |

表6 同一石灰水平下施有机物质对黑麦草吸收镉的影响

Table 6 Effect of organic matter application with the same level of liming on Cd uptake by ryegrass

| 处理 | 1水平石灰 | | 2水平石灰 | | 3水平石灰 | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| | S | R | S | R | S | R |
| 石灰 | 26.30±2.18A | 91.56±5.17A | 24.4±3.96A | 88.62±3.62A | 17.01±1.83A | 115.56±6.32A |
| A ₁ * | 19.21±2.30B | 65.94±4.71B | 18.5±1.84B | 57.55±3.41C | | |
| A ₂ * | 11.2±1.05C | 43.72±3.56D | 14.5±1.23C | 52.18±2.89C | 10.9±0.85B | 44.25±3.26C |
| B ₁ * | 24.08±2.83A | 68.68±0.96B | 20.62±2.12A | 70.09±2.48B | | |
| B ₂ * | 16.51±1.95B | 49.92±1.23C | 15.24±0.56C | 56.41±1.25C | 12.6±1.04B | 54.10±2.17B |

道一致^[19-22]。但与黑麦草根系和地上部分含镉量没有相关性,而与根系和地上部分含镉之比 R/S 呈显著正相关(0.517 6*),这是由于一方面 R/S 比与 pH 呈一定的正相关,存在着 pH 升高,根系部分累积镉量会有所增加的可能;另一方面,在低水平石灰单施或在有机物质水平相同的情况下配施低水平石灰,都会表现出黑麦草体内含镉量反而高于对照的现象。这表明,在重金属复合污染并存在其他限制生长因素(如低 pH)的土壤上,单是应用传统的土壤 pH 测定和土壤活性镉含量变化的结果,很难确切反映出化学改良剂对降低植物吸收镉的影响。为此,本文建议,针对复合污染土壤,应用一些短期生物试验的方法来确定各种改良措施对降低植物吸收镉的影响程度。

2.3.3 有机物质种类

外加有机物质可以增强土壤对镉的吸附固定能力,而且它们也提高了土壤 CEC,还可以改变土壤的 pH,降低了土壤镉的活性。最近的研究表明,施用有机物质可以明显地降低土壤中交换态镉的含量^[23],这很好地解释了施用有机物质能降低土壤有效镉的原因,但降低的程度与有机物质的性状有关。供试的土壤为典型的酸性污染土壤。堆肥自身的 pH 高于泥炭。泥炭本身酸性强,其内部被金属离子置换而释放的 H⁺反过来又可以活化部分土壤中的金属离子^[24]。所以在降低土壤活性镉含量及植物地上部分含镉量方面,堆肥的控制效果好于泥炭。当然,由于在田间实际应用中不可能到达本试验中所添加的有机物质质量,因此,在实际情况下,施用有机物质来降低作物吸收镉的效果就不可能如此理想,本试验中高水平的有机物质处理效果远优于低水平的处理也证明了这一点。

2.3.4 元素间的相互作用

施用石灰可大幅度地降低黑麦草根系含镉量,而且随着石灰用量的提高呈不断下降的趋势,到 3 水平石灰时已不足对照的 1/4(表 7)。但对镉而言,虽然地上部分的含量呈下降的趋势,但根系含量均因施用石灰反而有所提高,在 3 水平石灰时尤为明显(表 4)。据文献报道,植物吸收镉和锌具有拮抗关系^[25]。根系镉含量的大幅度下降,会在一定程度上掩盖了镉下降的程度^[26]。这也从元素相互关系的角度部分解释了土壤 pH 并不能很好的反映施用石灰对根系含镉量的影响的原因。

3 结论

(1)在镉污染的土壤上,无论单施还是配施石灰

表 7 施用石灰对黑麦草根系锌含量的影响

Table 7 Effect of liming on Zn uptake by ryegrass root

| 处理 | 根系 Zn 含量/mg · kg ⁻¹ |
|----|--------------------------------|
| CK | 1844.06 ± 78.02 A |
| 01 | 1282.21 ± 35.44 B |
| 02 | 786.45 ± 19.36 C |
| 03 | 421.05 ± 22.68 D |

和有机物质,均可降低土壤镉的化学活性,改善土壤条件,提高植物生物量。

(2)单施石灰随着土壤 pH 的提高,植物地上部分含镉量明显下降,但根系却没有表现出与地上部分相同的趋势。

(3)施加有机物质在一定程度上降低了植物体内的含镉量。但仍需考虑有机质的具体成分与特性,在生产实践中单独施用本身酸性较强的有机物质作为改良剂是有风险的,如本文中的泥炭。

(4)在相同石灰水平上配施堆肥或泥炭,对黑麦草吸收镉效果优于泥炭。

(5)在重金属元素复合污染的土壤上,传统的土壤 pH 测定和 0.05 mol · L⁻¹ CaCl₂ 所提取的土壤活性镉含量并不能很好地反映外加石灰和有机物质对植物吸收镉的影响。因此,本文建议以短期生物试验来评价改良措施的好坏。

总之,单施石灰或单施有机物质都能起到降低镉吸收的作用,但还是提倡有机物质和石灰的配合施用,发挥彼此的交互作用。有机物质增加了土壤 CEC,提高了土壤环境容量,避免了单施石灰可能带来的危害,而有机物质所具有的营养与改土作用更是石灰所不能及的。至于两者的用量,需要根据污染土壤的酸度进行不同的配比。

参考文献:

- [1] 骆永明,滕 应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. 土壤, 2006, 38(5):505-508.
- [2] 顾继光,周启星,王 新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(2):143-151.
- [3] 徐应明,李军幸. 新型功能膜材料对污染土壤铅汞镉钝化作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 86-89.
- [4] 王凯荣. 我国农业重金属污染现状及其治理利用对策[J]. 农业环境保护, 1997, 16(6): 174-178.
- [5] 韦朝阳,陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7):1196-1203.
- [6] 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6):757-762.
- [7] Bolan N S, Adriano D C, Mani P A, et al. Immobilization and phytoavail-

- ability of cadmium in variable charge soils. II Effect of lime addition[J]. *J Plant and Soil*, 2003,251(2):187-198.
- [8] Maier N A, McLaughlin, Heap M, et al. Effect of nitrogen source and calcitic lime on soil pH and potato yield, leaf chemical composition, and tuber cadmium concentrations[J]. *J Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25 (3): 523-544.
- [9] 张丽霞,梁利芳. 稀土-苯氧乙酸二元、三元配合物的表征及其对植物铅、镉污染的影响[J]. 稀土, 2006, 27(2):66-69.
- [10] Sally B, Chaney R, Judith H, et al. In situ treatment to reduce the phyto and bioavailability of lead, zinc and cadmium[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33:522-531.
- [11] Urszula K, Rufus L C. Amelioration of nickel phytotoxicity in muck and mineral soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 1949-1960.
- [12] 郝秀珍,周东美,王玉军,等. 泥碳和化学肥料处理对黑麦草在铜尾矿砂上生长影响的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41 (4) :645-648.
- [13] Pepper I L, Bezedicek D F, Baker A S, et al. Silage corn uptake of sludge applied Zn and Cd as affected by soil pH[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983,12:270-275.
- [14] 余贵芬,蒋新,孙磊,等. 有机物质对土壤镉有效性的影响研究综述[J]. 生态学报, 2002,22(5):770-776.
- [15] Takijima Y, Katsumi F. Cadmium contamination of soils and plants caused by zinc mining. I. Production of high cadmium rice on the paddy fields in low reaches of mine station[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1973,19:29-38.
- [16] 李瑞美,王果,方玲. 石灰与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3):293-296.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1999.
- [18] 郑绍建,胡霁堂. 污染土壤活性镉提取剂的选择[J]. 农业环境保护, 1995,14(2):49-53.
- [19] Pinto A P, Vilar M T, Pinto F C, et al. Organic matter influence in cadmium uptake by sorghum[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2004, 27(12): 2175-2188.
- [20] Miller J E, Hassett J J, Koeppel D E. Uptake of cadmium by soybeans as influenced by soil cation exchange capacity, pH and available phosphorus[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1976, 5: 157-160.
- [21] 王新,周启星. 外源镉铅铜锌在土壤中形态分布特性及改性剂的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 541-545.
- [22] 杜彩艳,祖艳群,李元. pH和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539-543.
- [23] 张大庚,依艳丽,李亮亮,等. 水分和有机物料对土壤镉-铜形态及化学性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):939-944.
- [24] 张大庚,依艳丽,李亮亮,等. 草炭分解产物对铜、锌吸附的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 111-115.
- [25] 刘莉,钱琼秋. 影响作物对镉吸收的因素分析及土壤镉污染的防治对策[J]. 浙江农业学报, 2005, 17(2): 111-116.
- [26] Haghiri F. Plant uptake of cadmium as influenced by cation exchange capacity, organic matter, zinc and soil temperature [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1974, 3:180-183.