

石灰配施猪粪对 Cd、Pb 和 Zn 污染土壤中重金属形态和植物有效性的影响

杜彩艳^{1,2}, 祖艳群^{1*}, 李元¹

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南省农科院农业资源与环境研究所, 昆明 650205)

摘要: 通过盆栽试验, 研究在镉、铅和锌污染土壤上, 石灰和猪粪配施对土壤中不同形态镉、铅和锌含量及在蔬菜中累积的影响。结果表明: 施入石灰(L)、石灰加低量猪粪(LP₁)、石灰加高量猪粪(LP₂)后, 土壤中碳酸盐结合态 Cd、Pb 和 Zn 含量明显降低, 土壤中铁、锰氧化物结合态和有机物结合态 Cd、Pb 和 Zn 含量明显增加; 对大白菜吸收 Pb、Cd 和 Zn 均起到较好的抑制作用。单施石灰处理, 石灰用量为 5 g·kg⁻¹ 土时, 对大白菜吸收 Pb、Cd 和 Zn 的抑制效果最好; 石灰配施猪粪处理, 其中石灰 5 g·kg⁻¹ 土配施猪粪 7.5 g·kg⁻¹ 土以及石灰 5 g·kg⁻¹ 土配施猪粪 15 g·kg⁻¹ 土对大白菜吸收 Pb、Cd 和 Zn 的抑制效果最好。研究同时发现, 低量猪粪配施石灰的效果强于高量猪粪配施石灰的效果。

关键词: 石灰; 猪粪; 形态; 镉; 铅; 锌

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1000-470X(2008)02-0170-05

Effects of Lime with Pig Manure on Fractions of Cd, Pb and Zn in Soil and Phytoavailability

DU Cai-Yan^{1,2}, ZU Yan-Qun^{1*}, LI Yuan¹

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: A pot experiment was carried out to investigate the effects of lime with pig manure on the soil Pb, Cd and Zn fractions and plant uptake of these metal elements in the Chinese cabbage. The heavy metal fractions in soil were analyzed by using Tessier method. The results showed that with the treatments of lime(L), lime + lower pig manure (LP₁), lime + higher pig manure (LP₂), contents of exchangeable bound to carbonate cadmium, lead and zinc in the soil decreased; contents of Fe-Mn oxide combined and organic matter combined cadmium, lead and zinc in the soil increased. At the same time, contents of cadmium, lead and zinc in the shoot of Chinese cabbage significantly decreased on the treatments of lime, the obvious treatment which inhibited absorption of Pb, Cd and Zn by plant, is the treatment with 5 g lime for 1 kg soil. In the treatments of lime with pig manure, both of the treatment with 5 g lime and 7.5 g pig manure, and 5 g lime and 15 g pig manure were better than other treatments for 1 kg soil. The results also showed that the effect of lime with lower pig manure is better than the lime with higher pig manure.

Key words: Lime; Pig manure; Fractions; Cadmium; Zinc; Lead

重金属污染的酸性土壤上大多数作物的生长必然受到抑制。施用石灰能降低重金属的活性, 促进作物的生长^[1-4]。但大量施用石灰, 会使土壤的物理性质恶化, 整体肥力水平也下降, 而有机物料在改善土壤理化性状、特别是物理性状方面, 有着特殊的作用。在使用石灰的基础上配施有机物料, 有可能达到既抑制重金属的活性、促进作物的生长、又维持甚至提高土壤肥力的效果, 有利于被治理后的重金

属污染土壤的持续利用。虽然在石灰和有机物料改善土壤效应方面有过不少研究^[5-11], 但在云南还未见相关报道。

不同形态的重金属, 其生理活性和毒性有很大差异, 其中水溶态、交换态的活性、毒性最大, 残留态的活性、毒性最小, 而其它结合态活性、毒性居中^[12]。因此, 研究石灰和猪粪配施与重金属形态、毒性的关系, 以及对植物的影响, 具有重要的意义。

收稿日期: 2007-08-20, 修回日期: 2007-10-16。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30560034)。

作者简介: 杜彩艳(1977-), 女, 云南维西人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物营养和环境生态方面研究(E-mail: caiyandu@126.com)。

* 通讯作者: (E-mail: liyuanzu@public.km.yn.cn)。

云南省由于金属矿藏的大规模开采,以及较长的开采历史等因素的影响,省内形成了大量的采矿废弃地,严重影响了云南的农田环境及农业生产。针对这一现状,我们研究了在 Cd、Pb、Zn 污染土壤上,进行石灰和猪粪配施,对 Cd、Pb 和 Zn 在土壤中的存在形态及在蔬菜中累积的影响,旨在为云南重金属污染的酸性土壤的持续利用提供理论依据。本研究采用化学方法修复重金属污染土壤,具有一定的局限性。但是,化学修复更适用于中国人口多,可耕地少的国情;运用化学修复方法,既可有效地治理重金属污染土壤,又可持续用于农业生产。显然,化学修复技术将继续成为今后重金属污染土壤修复技术的研究方向之一。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自云南省会泽县者海铅锌矿厂下风向 50 m 范围内,所用土壤为旱地红壤,其基本理化性状为: pH 5.6, 有机质 5.19%, CEC (以 C 计) 6.68 mol·kg⁻¹, 全氮 0.51 g·kg⁻¹, 全钾 0.861 g·kg⁻¹, 全磷 0.0631 g·kg⁻¹, Cd 37.37 mg·kg⁻¹, Pb 1330 mg·kg⁻¹, Zn 2992.94 mg·kg⁻¹, 供试石灰中 Cd 130.40 mg·kg⁻¹, Pb 13.65 mg·kg⁻¹, Zn 34.99 mg·kg⁻¹, 猪粪中 Cd 0.139 mg·kg⁻¹, Pb 16.55 mg·kg⁻¹, Zn 34.9 mg·kg⁻¹。由以上可知,供试土壤 Cd、Pb、Zn 严重超出我国土壤环境质量二级标准(GB15168-1995)限值(全 cd 为 0.3 mg·kg⁻¹, 全 Pb 为 250 mg·kg⁻¹, 全 Zn 为 200 mg·kg⁻¹)。该土壤为镉、铅、锌复合污染土壤。

供试作物大白菜 (*Brassica pekinensis*) 为春喜牌‘青岛 83-1’, 生育期为 90 d。以盆栽试验方式在云南农业大学植物营养系温室内进行。

本试验采用 2 因素 4 水平, 13 个处理, 3 次重复, 随机区组排列, 共 39 盆。具体试验设计方案见表 1。

采用 15 cm × 30 cm 塑料盆, 每盆装土 5 kg; 猪粪风干, 磨细, 过 2 mm 筛, 供试改良材料为熟石灰, 购自当地(烧制的), 过 2 mm 筛; 底肥使用尿素 3 g, 普钙 2 g, 硫酸钾 1.5 g; 将土壤及改良材料、底肥称好, 混合均匀, 装入塑料盆中, 加水至田间持水量不变, 培养 1 周后于 2004 年 11 月 16 日移植 20 d 苗龄的大白菜。每盆移栽 4~5 株, 1 个月后间苗, 每盆留 3 株, 常规管理。3 个月后(2 月 16 日)收获大白菜地上食用部分, 取样、洗净、烘至恒重后磨碎, 备用。

表 1 盆栽试验设计方案及代码
Table 1 Designing plan and codes of pot experiments

| 处 理 Treatments | | 石灰用量 (g·kg ⁻¹ 土) Lime | 猪粪用量 (g·kg ⁻¹ 土) Pig manure | 加入石灰后 土壤 pH Soil pH |
|--|-------------------------------|--|--|---------------------------|
| 对照 CK | (CK) | 0 | 0 | 5.6 |
| 石灰处理 Lime | L ₁ | 1.0 | 0 | 6.1 |
| | L ₂ | 3.0 | 0 | 6.6 |
| | L ₃ | 4.0 | 0 | 7.0 |
| | L ₄ | 5.0 | 0 | 7.6 |
| 石灰 + 低量猪粪 Lime + lower pig manure | L ₁ P ₁ | 1.0 | 7.5 | 6.1 |
| | L ₂ P ₁ | 3.0 | 7.5 | 6.6 |
| | L ₃ P ₁ | 4.0 | 7.5 | 7.0 |
| | L ₄ P ₁ | 5.0 | 7.5 | 7.6 |
| 石灰 + 高量猪粪 Lime + higher pig manure | L ₁ P ₂ | 1.0 | 15 | 6.1 |
| | L ₂ P ₂ | 3.0 | 15 | 6.6 |
| | L ₃ P ₂ | 4.0 | 15 | 7.0 |
| | L ₄ P ₂ | 5.0 | 15 | 7.6 |

注: 石灰施用量根据: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = [1/2 (\text{交换性酸} \times 0.074 \times \text{土质量}) / 667 \text{ m}^2] / 50$, 其中: 0.074 为 $\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 本供试土壤交换性酸为 69.35 g。

Notes: The amount of lime employs according to the follow formulas: $\text{Ca}(\text{OH})_2 = [1/2 (\text{exchanged acid} \times 0.074 \times \text{soil quality}) / 667 \text{ m}^2] / 50$, meanwhile, 0.074 is $\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, the exchanged acid of the tested soil is 69.35 g.

1.2 测定方法

(1) 土壤 pH 值、土壤有机质含量及土样氮、磷、钾含量的测定均按土壤农化常规分析方法^[13]。

(2) 土壤中重金属全量分析采用浓硝酸-高氯酸消解, 原子吸收分光光度计测定。

(3) 植株样品(地上食用部分)中重金属含量测定用干灰化-碘化钾萃取, 原子吸收分光光度计测定。

(4) 土壤中 Cd、Pb、Zn 的形态分级采用 Tessier^[14]连续提取法, 本试验测定土壤重金属碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态。

1.3 数据处理

数据处理采用 DPS 软件, 多重差异显著性分析采用新复极差法(Duncan 法)多重比较检验差异显著性($n=3$, $p<0.05$ 或 $p<0.01$)。

2 结果

2.1 石灰配施猪粪对土壤中碳酸盐结合态 Pb、Cd 和 Zn 含量的影响

添加石灰提高了土壤的 pH 值, 降低了土壤碳酸盐结合态 Pb、Cd 和 Zn 的含量, 各处理与对照相比, 差异均达到显著水平, 其中, 石灰用量 5 g·kg⁻¹ 土时, 降低效果最为显著(表 2)。

各水平的石灰配施猪粪 7.5 g·kg⁻¹ 土处理都显著降低了土壤中碳酸盐结合态 Pb、Cd 和 Zn 含

量,并且均随着石灰用量的增加而逐渐降低,其中降低效果最大的处理为石灰 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土配施猪粪 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土,使土壤中 Pb 降幅达 38.27%,Cd 降幅达 24.34%,Zn 降幅达 29.06% (表2)。

石灰不同用量配施猪粪 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土处理也显著降低了土壤中碳酸盐结合态 Pb、Cd 和 Zn 含量,其中尤其以石灰 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土配施猪粪 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土 (pH 7.6) 的降低效果最突出 (表2)。

2.2 石灰配施猪粪对土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Pb、Cd 和 Zn 含量的影响

从表3可看出,不同石灰施用量都显著增加了

土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Pb、Cd 和 Zn 的含量。当石灰 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土处理 (pH 7.6) 时,增加效果最为显著,土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Pb、Cd 和 Zn 含量分别比对照增加了 26.5%、102.31% 和 11.42%。

各水平的石灰加猪粪 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土处理,土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Pb、Cd 含量除个别 (L_1P_1) 比对照有所降低外,其余处理都显著增加了土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Pb、Cd 含量,Pb 的增幅达 9.95% ~ 13.97%,Cd 的增幅达 10.25% ~ 56.64%。相反,土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Zn 含量却显著降低 (表3)。

表2 石灰和猪粪对土壤碳酸盐结合态 Pb、Cd 和 Zn 含量的影响

Table 2 Effect of lime and pig manure on contents of exchangeable bound to carbonate Pb, Cd and Zn in soil ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

| Pb | | | Cd | | | Zn | | |
|------------------|----------------|-----------|------------------|----------------|-----------|------------------|----------------|-----------|
| 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % | 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % | 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % |
| CK | 181.41aA | — | CK | 11.30aA | — | CK | 1250.03aA | — |
| L_1 | 169.34bB | -6.65 | L_1 | 10.68abA | -5.49 | L_1 | 1133.36bB | -9.33 |
| L_2 | 146.77cC | -19.09 | L_2 | 9.83bAB | -13.01 | L_2 | 1057.52cBC | -15.40 |
| L_3 | 119.01dD | -34.40 | L_3 | 8.71cBC | -22.92 | L_3 | 988.91dCD | -20.89 |
| L_4 | 104.16eE | -42.58 | L_4 | 7.94cC | -29.73 | L_4 | 945.54dD | -24.36 |
| CK | 181.41aA | — | CK | 11.30aA | — | CK | 1250.03aA | — |
| L_1P_1 | 138.98bB | -23.39 | L_2P_1 | 8.95bB | -20.80 | L_1P_1 | 978.22bB | -21.74 |
| L_2P_1 | 135.68cB | -25.21 | L_1P_1 | 8.80bB | -22.12 | L_2P_1 | 965.83bB | -22.74 |
| L_3P_1 | 118.00dC | -34.95 | L_3P_1 | 8.59bB | -23.98 | L_3P_1 | 955.67bB | -23.55 |
| L_4P_1 | 111.99eD | -38.27 | L_4P_1 | 8.55bB | -24.34 | L_4P_1 | 886.80cC | -29.06 |
| CK | 181.41aA | — | CK | 11.30aA | — | CK | 1250.03aA | — |
| L_2P_2 | 149.67bB | -17.50 | L_1P_2 | 9.98bAB | -11.68 | L_1P_2 | 1019.04bB | -18.48 |
| L_1P_2 | 147.43bB | -18.73 | L_3P_2 | 9.75bcB | -13.72 | L_2P_2 | 974.05cBC | -22.08 |
| L_3P_2 | 131.12cC | -27.72 | L_2P_2 | 8.82cdB | -21.95 | L_3P_2 | 964.30cBC | -22.86 |
| L_4P_2 | 129.31cC | -28.72 | L_4P_2 | 8.71dB | -22.92 | L_4P_2 | 945.69cC | -24.35 |

注:同列中不同大小写字母分别表示差异达5%和1%显著水平,下同。

Notes: Different capital and small letters in each column mean significant at 5% and 1% level, respectively, and the same symbol is used for other tables.

表3 石灰和猪粪对土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Pb、Cd 和 Zn 含量的影响

Table 3 Effects of lime and pig manure on contents of Fe, Mn oxide combined- Pb, Cd and Zn in soil ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

| Pb | | | Cd | | | Zn | | |
|------------------|----------------|-----------|------------------|----------------|-----------|------------------|----------------|-----------|
| 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % | 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % | 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % |
| L_4 | 980.50aA | 26.50 | L_4 | 7.88aA | 102.31 | L_4 | 1759.80aA | 11.42 |
| L_3 | 951.39bA | 22.74 | L_3 | 7.32bB | 88.04 | L_3 | 1623.80bB | 2.81 |
| L_2 | 845.14cB | 9.04 | L_2 | 5.35cC | 37.33 | L_2 | 1606.95bcBC | 1.74 |
| L_1 | 844.01cB | 8.89 | L_1 | 4.87dC | 25.04 | L_1 | 1600.01cBC | 1.30 |
| CK | 775.10dC | — | CK | 3.89eD | — | CK | 1579.47dC | — |
| L_1P_1 | 883.39aA | 13.97 | L_1P_1 | 6.10aA | 56.64 | CK | 1579.47aA | 0.00 |
| L_2P_1 | 854.15bB | 10.20 | L_3P_1 | 5.02bB | 28.95 | L_2P_1 | 1542.32bB | -2.35 |
| L_3P_1 | 852.22bB | 9.95 | L_2P_1 | 4.67cBC | 19.87 | L_4P_1 | 1493.26cC | -5.46 |
| CK | 775.10cC | — | L_1P_1 | 4.29dCD | 10.25 | L_1P_1 | 1486.89cdCD | -5.86 |
| L_1P_1 | 739.85dD | -4.55 | CK | 3.89eD | — | L_3P_1 | 1480.15dD | -6.29 |
| L_4P_2 | 857.33aA | 10.61 | L_4P_2 | 4.72aA | 21.09 | CK | 1579.47aA | — |
| L_1P_2 | 825.65bAB | 6.52 | L_3P_2 | 4.31bB | 10.61 | L_4P_2 | 1557.09bB | -1.42 |
| L_2P_2 | 814.97bB | 5.14 | L_2P_2 | 4.18cB | 7.26 | L_3P_2 | 1522.82cC | -3.59 |
| CK | 775.10cC | — | L_1P_2 | 3.97dC | 1.89 | L_1P_2 | 1418.54dD | -10.19 |
| L_3P_2 | 758.08cC | -2.20 | CK | 3.89dC | — | L_2P_2 | 1406.18eD | -10.97 |

* 所需注释同表2。

* What need notes refer to Table 2.

在不同梯度石灰配施猪粪 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土处理下, 土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Pb、Cd 含量随土壤 pH 的升高而升高。然而, 土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态 Zn 含量却没有增加, 反而呈现下降趋势(表 3)。

2.3 石灰配施猪粪对土壤中有有机物结合态 Pb 和 Zn 含量的影响

不同水平石灰用量均能显著增加土壤中有有机物结合态 Pb 和 Zn 的含量(表 4)。随着石灰用量增加, pH 升高, 土壤中有有机物结合态 Pb 和 Zn 的含量也随之增加, 且呈明显的上升趋势, 高量石灰($5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土)时尤为明显, 比对照分别增加了 22.46%、21.56%(表 4)。

石灰不同用量配施猪粪 $7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土, 以及不同石灰用量配施猪粪 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土 2 种处理, 都显著提高了土壤中有有机物结合态 Pb 和 Zn 含量, 且都明显高于对照。另外, 石灰加低量猪粪($7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土)的效果强于石灰配施高量猪粪($15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土)的效果。

2.4 石灰和猪粪对大白菜吸收 Pb、Cd 和 Zn 能力的影响

施用石灰对抑制土壤重金属向大白菜地上部迁移具有明显的效果, 随石灰用量的增加, pH 升高, 大白菜地上部 Pb、Cd 和 Zn 含量持续降低, 降低幅度依各处理而有所不同(表 5)。

石灰配施低量($7.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土)猪粪和高量猪粪($15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土)处理, 也显著降低了大白菜地上部 Pb、Cd 和 Zn 含量, 降低幅度依各处理不同而异, 而且高量猪粪的效果不比低量猪粪强(表 5)。

表 4 石灰和猪粪对土壤中有有机物结合态 Pb 和 Zn 含量的影响

Table 4 Effects of lime and pig manure on contents of organic matter combined Pb and Zn in soil ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

| Pb | | | Cd | | |
|-------------------------------|----------------|-----------|-------------------------------|----------------|-----------|
| 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % | 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % |
| L ₄ | 120.70aA | 22.46 | L ₄ | 836.77aA | 21.56 |
| L ₃ | 114.26bAB | 15.93 | L ₃ | 806.29bA | 17.14 |
| L ₂ | 110.00bcB | 11.61 | L ₂ | 769.78cB | 11.83 |
| L ₁ | 106.08cBC | 7.63 | L ₁ | 745.57dB | 8.31 |
| CK | 98.56dC | — | CK | 688.34cC | — |
| L ₄ P ₁ | 120.69aa | 22.45 | L ₄ P ₁ | 855.35aA | 24.26 |
| L ₃ P ₁ | 118.49aA | 20.22 | L ₃ P ₁ | 817.52bB | 18.77 |
| L ₂ P ₁ | 111.21bB | 12.83 | L ₂ P ₁ | 797.08cC | 15.80 |
| L ₁ P ₁ | 107.94bB | 9.52 | L ₁ P ₁ | 759.26dD | 10.30 |
| CK | 98.56cC | — | CK | 688.341eE | — |
| L ₄ P ₂ | 117.189aA | 18.90 | L ₄ P ₂ | 776.44aA | 12.80 |
| L ₃ P ₂ | 112.62bB | 14.27 | L ₃ P ₂ | 752.17abA | 9.27 |
| L ₂ P ₂ | 109.97bcB | 11.58 | L ₂ P ₂ | 744.51bA | 8.16 |
| L ₁ P ₂ | 109.47cB | 11.07 | L ₁ P ₂ | 738.56bA | 7.30 |
| CK | 98.56dC | — | CK | 688.34cB | — |

* 所需注释同表 2。

* What need notes refer to Table 2.

3 讨论

3.1 施用石灰对土壤中不同形态 Cd、Pb 和 Zn 含量及植物有效性的影响

施加石灰被认为是抑制重金属污染土壤植株吸收重金属的有效措施。在土壤中施入石灰能提高土壤的 pH, 促进重金属生成碳酸盐、氢氧化物沉淀, 降低土壤中 Cd、Zn 等重金属的有效性, 从而抑制作物对它们的吸收。

表 5 石灰和猪粪对大白菜地上部 Pb、Cd 和 Zn 含量的影响

Table 5 Effects of lime and pig manure on contents of the Pb, Cd and Zn in Chinese cabbages ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

| Pb | | | Cd | | | Zn | | |
|-------------------------------|----------------|-----------|-------------------------------|----------------|-----------|-------------------------------|----------------|-----------|
| 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % | 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % | 处理 Treatments | 平均值 Average | 比 CK % |
| CK | 12.93aA | — | CK | 2.38aA | — | CK | 186.54aA | — |
| L ₁ | 11.63bAB | -10.05 | L ₁ | 2.17bB | -8.82 | L ₁ | 168.87bB | -9.47 |
| L ₂ | 10.33cBC | -20.11 | L ₂ | 1.91cC | -19.75 | L ₂ | 134.77cC | -27.75 |
| L ₃ | 9.02dC | -30.24 | L ₃ | 1.82dD | -23.53 | L ₃ | 119.55dD | -35.91 |
| L ₄ | 7.61eD | -41.14 | L ₄ | 1.71eE | -28.15 | L ₄ | 114.90dD | -38.40 |
| CK | 12.93aA | — | CK | 2.38aA | — | CK | 186.54aA | — |
| L ₁ P ₁ | 9.76bB | -24.52 | L ₃ P ₁ | 1.98bB | -16.81 | L ₁ P ₁ | 112.45bB | -39.72 |
| L ₂ P ₁ | 9.43bB | -27.07 | L ₄ P ₁ | 1.95bB | -18.07 | L ₂ P ₁ | 108.66cBC | -41.75 |
| L ₃ P ₁ | 7.82cC | -39.52 | L ₁ P ₁ | 1.85cC | -22.27 | L ₃ P ₁ | 104.98dCD | -43.72 |
| L ₄ P ₁ | 7.03dD | -45.63 | L ₂ P ₁ | 1.76dD | -26.05 | L ₄ P ₁ | 101.51dD | -45.58 |
| CK | 12.92aA | — | CK | 2.38aA | — | CK | 186.54aA | — |
| L ₁ P ₂ | 9.79bB | -24.24 | L ₄ P ₂ | 2.16bB | -9.24 | L ₄ P ₂ | 115.05bB | -38.32 |
| L ₂ P ₂ | 9.64bB | -25.40 | L ₃ P ₂ | 2.06bcB | -13.45 | L ₂ P ₂ | 112.42bcBC | -39.73 |
| L ₃ P ₂ | 8.82cC | -31.75 | L ₁ P ₂ | 1.96cdBC | -17.65 | L ₁ P ₂ | 110.99cC | -40.50 |
| L ₄ P ₂ | 7.52dD | -41.81 | L ₂ P ₂ | 1.82dC | -23.53 | L ₃ P ₂ | 105.88dD | -43.24 |

* 所需注释同表 2。

* What need notes refer to Table 2.

高彬等^[15]研究表明,莴苣、芹菜各部位 Cd、Zn 的含量基本遵循随土壤 pH 升高而呈下降趋势的规律。随着石灰用量的增加,明显地抑制 Hg、Cd、Pb 向植物体内迁移,石灰用量越大,莴笋中 Hg、Cd、Pb 的含量越少^[16]。石灰用量越大,大白菜中 Cd、Pb、Zn 含量越少^[17]。

本研究结果与以上结果类似:施加石灰显著降低了土壤中碳酸盐结合态 Cd、Pb 和 Zn 含量,明显增加了土壤中 Fe、Mn 氧化物结合态和有机物结合态 Cd、Pb 和 Zn 含量;大白菜地上部 Cd、Pb 和 Zn 含量均随着石灰用量的增加而逐渐降低,因而能有效降低植物对镉、铅、锌的富集。

3.2 石灰配施猪粪对土壤中不同形态 Pb、Cd 和 Zn 含量及植物有效性的影响

尽管施用石灰能降低土壤中有效态 Cd、Pb 和 Zn 含量,有效抑制植物体内 Cd、Pb 和 Zn 含量,但大量施用石灰,会对土壤的物理性质产生一定的影响,整体肥力水平也会下降;而有机物料在改善土壤理化性状、特别是物理性状方面,有着特殊的作用。因此在使用石灰的基础上配施猪粪,有可能达到既抑制重金属的活性,促进作物的生长,又维持甚至提高土壤肥力的效果,有利于被治理后的重金属污染土壤的持续利用。

在镉、锌污染土壤上施入有机肥可使土壤中有效态的镉、锌含量明显降低,各组成形态中,水溶态及交换态的含量明显减少,而有机络合态的含量明显增加;且随着有机肥施用量的增加,镉、锌有机络合(螯合)态的含量也逐渐增加^[6]。本试验结果与此一致,这是因为施入石灰+猪粪后:①有机质-金属络合物的稳定性随 pH 的升高而增大,使溶液中 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 浓度降低。② Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 在氧化物表面的专性吸附随 pH 的升高而增强,pH 上升大部分被动吸附重金属转变为专性吸附。从而相应地抑制了 Cd、Pb 和 Zn 向植物迁移的数量。

本试验条件下,未测出有机态 Cd 的含量,原因可能是该试验所用土壤采自一块多年废弃地的缘故。另外,石灰加低量猪粪的效果明显强于石灰加高量猪粪,该结果与陈晓婷等的研究结果类似^[5]。说明猪粪对重金属 Pb、Cd 和 Zn 的改良效应,存在一个最适用量的问题,并不是越多越好。

本试验中,即使在土壤 pH 7.6 处理时,大白菜地上部 Pb、Cd、Zn 的含量也超过国家蔬菜食品卫生标准,由于所用土壤 Cd、Pb、Zn 背景值高,污染严重,仍不适合种植蔬菜。可通过种植对 Cd、Pb、Zn 超累积植物以带走土壤中 Cd、Pb、Zn^[18,19],降低土

壤中 Cd、Pb、Zn 的含量,达到治理土壤 Cd、Pb、Zn 污染,再用于农业生产。而通过施用石灰及猪粪控制蔬菜中重金属含量的方法,可适用于中度、轻度污染的农田土壤。

参考文献:

- [1] Albasel N, Cottenie A. Heavy metals uptake from contaminated soils as affected by peat, lime, and chelates[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1985, 49: 386–390.
- [2] Eriksson J E. The influence of pH, soil type and time on adsorption and by plants of Cd added to the soil[J]. *Water, Air and Pollut*, 1989, 48: 317–335.
- [3] Andersson A, Siman G. Levels of Cd and some other trace elements in soils and crops as influenced by lime and fertilizer levels[J]. *Acta Agric Scand*, 1991, 41: 3–11.
- [4] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、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.
- [5] 陈晓婷, 王果, 张亭旗, 黄汉水, 方玲. 石灰与泥炭配施对重金属污染土壤上小白菜生长和营养元素吸收的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5): 453–455.
- [6] 华路, 陈世宝, 白玲玉, 韦东普. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. *农业环境保护*, 1998, 17(2): 55–59, 62.
- [7] 张亚丽, 沈其荣, 谢学俭, 孙兆海. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 1997–2000.
- [8] 陈世宝, 华路, 白玲玉. 小麦籽粒中镉对锌的拮抗作用与有机肥的调控[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 15–18.
- [9] 徐应明, 林大松, 吕建波. 化学调控作用对 Cd、Pb、Cu 复合污染菜地土壤中重金属形态和植物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2): 326–330.
- [10] Dong M Z, Xiu Z H, Yu J W, et al. Copper and Zn uptake by radish and pakchoi as affected by application of livestock and poultry manures[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(2): 167–175.
- [11] 黄国锋, 张振铎, 钟流举, 等. 重金属在猪粪堆肥过程中的化学变化. *中国环境科学*, 2004, 24(1): 94–99.
- [12] 陈志良, 仇荣亮. 重金属污染土壤的修复技术[J]. *环境保护*, 2002, 29(6): 21–23.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[J]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 12.
- [14] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844–851.
- [15] 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.
- [16] 陈宏, 陈玉成, 杨学春. 石灰对土壤中 Hg、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.
- [17] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. 施用石灰对大白菜中 Cd、Pb、Zn 含量的影响[J]. *云南农业大学学报*, 2005, 20(6): 810–812, 818.
- [18] 祖艳群, 李元. 土壤重金属污染的植物修复技术[J]. *云南环境科学*, 2002, 22(增刊): 58–61.
- [19] 方其仙, 李元, 祖艳群. 重金属超累积植物及其在植物修复中的应用[J]. *中国农学通报*, 2004(增刊): 174–178.