

蔡如梦, 石 林. 矿物-有机质复合调理剂对 Pb 污染土壤的改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2438-2444.

CAI Ru-meng, SHI Lin. Amelioration effects of mineral-organic compound conditioner on Pb-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2438-2444.

# 矿物-有机质复合调理剂对 Pb 污染土壤的改良效果

蔡如梦<sup>1,2</sup>, 石 林<sup>1,2\*</sup>

(1.华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2.工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

**摘 要:**为了探究矿物-有机质复合调理剂对 Pb 污染土壤的改良效果,通过小白菜盆栽试验研究了矿物-有机质复合调理剂(钾钙硅肥+褐煤腐植酸)对土壤理化性质、土壤有效态 Pb 含量、小白菜生长情况及小白菜吸收 Pb 的影响。试验结果表明:施加复合调理剂能显著降低土壤有效态 Pb 含量(施加量达到  $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,比对照降低 67.47%),提高土壤 pH 值(从 5.34 到 6.25)和土壤有机质含量(10.98%~13.41%);施加复合调理剂后,土壤中矿物质元素(K、Ca、Mg、Si)有效态含量均有不同程度的提高,其中施加量与土壤中有效 Ca 和 Si 元素含量具有显著相关性。另外,施加复合调理剂能有效降低小白菜中 Pb 含量以及促进小白菜的生长。与对照相比,小白菜生物量和株高分别提高 22.79%~49.90%和 2.91%~7.15%,且均与复合调理剂施加量呈显著正相关。矿物-有机质复合调理剂不仅能改善土壤理化性质,降低土壤有效态 Pb 含量,减少 Pb 在小白菜根部和地上部分的累积,而且能提升土壤养分供应能力,可在实际中有效践行。

**关键词:**钾钙硅肥;褐煤腐植酸;土壤改良;重金属 Pb;小白菜

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)12-2438-07 doi:10.11654/jaes.2017-0887

## Amelioration effects of mineral-organic compound conditioner on Pb-contaminated soil

CAI Ru-meng<sup>1,2</sup>, SHI Lin<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2.The Key Lab of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Cluster, Ministry of Education, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In this study, a pot experiment was conducted to investigate the effects of a mineral-organic compound conditioner (potassium calcium silicon fertilizer + brown coal huminite) on soil pH, organic matter content, available Pb concentration, growth of pakchoi, and Pb uptake by pakchoi. Compared to the control, application of the compound conditioner decreased the concentrations of available Pb in soil (by 67.47% at  $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  of compound conditioner) and elevated the soil pH (from 5.34 to 6.25) and soil organic matter content (by 10.98%~13.41%). The concentrations of mineral nutrients (K, Ca, Mg, Si) in the soil increased to various degrees, and the application rates of the compound conditioner had significant positive correlation with soil available Ca and Mg. Applying the compound conditioner could effectively reduce Pb concentrations in the shoot and root of pakchoi. The biomass and stem length of pakchoi increased by 22.79%~49.90% and 2.91%~7.15%, respectively, and both had significant positive correlations with application rates of the compound conditioner. In conclusion, the compound conditioner could effectively ameliorate soil physicochemical properties, decrease bioavailability of Pb in soil, suppress the harmful effects of Pb on crop growth, and enhance soil nutrient supply capacity. The compound conditioner can be used for in situ remediation of heavy-metal-contaminated soil.

**Keywords:** potassium calcium silicon fertilizer; brown coal huminite; soil amelioration; Pb; pakchoi

收稿日期:2017-06-21 录用日期:2017-09-06

作者简介:蔡如梦(1994—),女,河南信阳人,硕士研究生,主要从事土壤修复研究。E-mail:CRM0223@163.com

\*通信作者:石 林 E-mail:celshi@126.com

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD05B05+2);广州市 2016 年污染防治新技术新工艺示范和应用项目

**Project supported:** The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAD05B05+2); The Demonstration and Application Project of New Technology of Pollution Prevention and Control in Guangzhou (2016)

随着我国工业化、城市化的高速发展,工矿企业产生的“三废”的大量排放、含污废水灌溉以及含重金属农药和化肥的大量使用等,我国农田土壤重金属污染日益加剧<sup>[1-2]</sup>。土壤重金属污染不仅引起作物产量和品质的下降,还能通过食物链危害人体健康<sup>[3]</sup>。近年来,酸沉降的增加以及铵态氮肥的大量使用加剧了土壤酸化速度,导致土壤中的 K、Ca、Mg 和 Si 等矿物质营养元素大量流失,土壤中的固相铝大量溶出,同时引起土壤中有毒重金属的活化<sup>[4-5]</sup>。如何治理酸性土壤的重金属污染已成为当务之急。

目前,在酸性重金属污染土壤改良治理技术方面,开展了大量的研究工作<sup>[6-8]</sup>。其中,固化稳定化技术是国内外普遍使用的土壤重金属污染治理方法之一。该方法基于向污染土壤中添加无机或有机改良剂,通过与重金属发生吸附、沉淀、络合、氧化还原和离子交换等物理化学作用,改变土壤中重金属的存在形态和降低其生物有效性,从而达到治理重金属污染土壤的目的<sup>[9-10]</sup>。该技术具有操作简单、高效快速、成本低等优点,适用于大面积重金属污染农田土壤的修复。常用的改良剂主要有石灰性物质、含磷材料和有机质等<sup>[8,11]</sup>。施用石灰可以提高土壤 pH 值,增加土壤表面负电荷,从而增强土壤颗粒对金属阳离子的吸附能力<sup>[12]</sup>,但长期使用会导致土壤板结,易引起土壤营养元素平衡失调<sup>[13]</sup>。含磷材料通过吸附或者共沉淀,降低土壤中重金属的生物有效性<sup>[14]</sup>。但过量施加含磷材料会导致作物缺锌,影响作物的产量<sup>[15]</sup>,并且可能会引起水体富营养化<sup>[16]</sup>。有机物料可与重金属形成难溶的金属-有机复合物,该种复合物更容易被土壤颗粒吸附,降低土壤中重金属的有效性,但对于营养流失严重的土壤,单施有机质并不能补充土壤中所缺乏的植物生长必需的营养元素。

南方酸化土壤的脱硅富铝化作用强烈,土壤中 K、Ca、Mg 等盐基离子和有效 Si 大量流失<sup>[17]</sup>,土壤中有效矿物质元素含量降低,土壤肥力严重退化,作物出现不同程度的亏缺现象<sup>[18]</sup>。因此,开发一种可以改善酸性土壤理化性质,降低土壤中重金属活性的土壤调理剂具有重要的现实意义。钾钙硅肥是利用钾长石、白云石、石灰石和石膏等合理配伍后经高温焙烧制得的一种含有多种营养元素(K、Ca、Mg 和 Si 等)的弱碱性矿物质肥,在改善酸性土壤理化性质和提高作物产量方面已有一定的研究基础<sup>[19-21]</sup>。但关于将钾钙硅肥和褐煤腐植酸复合改良酸性重金属污染土壤的相关研究鲜见报道。本文通过将钾钙硅肥与褐煤腐植

酸复合成一种新的矿物-有机质复合调理剂,并利用该复合调理剂对 Pb 污染土壤进行改良,结合盆栽实验分析其对土壤理化性质、土壤中重金属 Pb 的活性,小白菜吸收重金属 Pb 以及小白菜生长状况的影响,为该复合调理剂在重金属污染农田改良应用提供理论指导和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤采自广东省增城市星威农场附近的水稻土,取 0~20 cm 的耕作层土壤,以备试验分析和作物栽培试验应用。土壤理化性质如下:pH 5.34,有机质 38.81 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 2.15 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 1.03 g·kg<sup>-1</sup>,速效钾 136.95 mg·kg<sup>-1</sup>,交换性钙 1 889.95 mg·kg<sup>-1</sup>,交换性镁 202.50 mg·kg<sup>-1</sup>,有效硅 140.48 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤 Pb 含量 549.83 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤有效态 Pb 含量 19.89 mg·kg<sup>-1</sup>。

供试调理剂由钾钙硅肥和褐煤腐植酸复合而成。褐煤腐植酸购于威海七木生物科技有限公司。钾钙硅肥和褐煤腐植酸研磨过筛,按质量比 1:1 混合,加入去离子水(固液比 1:1)混合均匀,振荡 24 h,烘干,冷却至室温,研磨过 200 目筛备用。调理剂基本性质见表 1。

表 1 供试调理剂的理化性质

Table 1 The physico-chemical properties of compound conditioner

| pH    | 有机质/<br>% | 矿物元素有效态/%        |       |      |                  | Pb/<br>mg·kg <sup>-1</sup> |
|-------|-----------|------------------|-------|------|------------------|----------------------------|
|       |           | K <sub>2</sub> O | CaO   | MgO  | SiO <sub>2</sub> |                            |
| 10.50 | 65        | 2.12             | 33.59 | 5.34 | 13.98            | 未检测出                       |

供试蔬菜:试验所选用的是对重金属污染比较敏感的叶菜类植物——小白菜 (*Brassica Chinensis* L.),种子购于广州长合种子有限公司。

### 1.2 实验方法

盆栽试验共设置 4 个处理,每个处理添加的矿物-有机质复合调理剂分别为 0、0.67、1.33 g·kg<sup>-1</sup> 和 2 g·kg<sup>-1</sup>(即 CK、T1、T2 和 T3),每处理均设置 4 次重复。将采集的土样自然风干、研磨,过 10 目筛,装入塑料盆(直径 17 cm、高 30 cm)中,每盆装土 3 kg,施入基肥(尿素 0.42 g+磷酸二氢钠 1.2 g+氯化钾 2.1 g)与调理剂混合均匀,加水平衡两周。每盆播种 20 颗小白菜种子,间苗后每盆保留 5 株。试验期间,土壤湿度控制在田间持水量的 70%,并保持正常的阳光照射。种植 5 周收获,采集各盆中土壤样品,风干,磨细,过 100

目筛;小白菜冲洗晾干后,分为地上部和根部,在 70℃ 烘干 48 h 至恒重,取出磨碎后过 60 目筛备用。

### 1.3 分析方法

土壤 pH 值采用电位法(土液比为 1:2.5)测定;有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法测定;全磷采用  $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$  法测定;速效钾、交换性钙和交换性镁用乙酸铵提取,原子吸收分光光度计(岛津 AA-6300C)测定;有效硅用硅钼蓝比色法测定;土壤有效态 Pb 用  $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$  浸提<sup>[2]</sup>,原子吸收分光光度计(岛津 AA-6300C)测定。小白菜样品经  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4(4:1)$  消解后,采用原子吸收分光光度计(岛津 AA-6300C)测定重金属含量。

### 1.4 数据处理

实验数据经过统计学检验和方差分析。样品由邓肯多变量区域新检验法(Duncan's new multiple range test)比较各重复之间的差异显著性。所有数据分析由 Microsoft Excel 2010 以及 SPSS 19.0 完成。实验作图采用 Origin 8.0 软件。

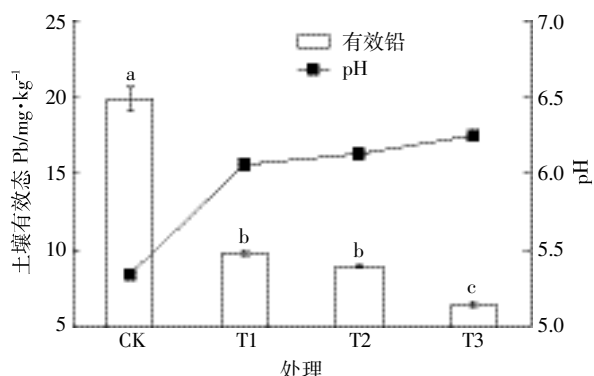
## 2 结果与分析

### 2.1 复合调理剂对土壤 pH 值和有效态 Pb 含量的影响

复合调理剂对土壤 pH 值和土壤有效态 Pb 含量的影响情况见图 1。由图 1 可以看出,施加复合调理剂能提高土壤 pH 值,并降低土壤中有效态 Pb 含量。且 pH 值的升高幅度随着施加量的增大而增大。复合调理剂施用量从 0(CK)增加到  $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,土壤 pH 值从 5.34 升高至 6.25。而随着施加量的增大,土壤中有有效态 Pb 含量则显著降低( $P<0.05$ ),与土壤 pH 值的变化趋势基本相反。与 CK 相比,当复合调理剂施加量为  $0.67$ 、 $1.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,有效态 Pb 含量分别降低了 50.60%、54.98%和 67.47%。对土壤有效态 Pb 含量和土壤 pH 进行线性回归分析(图 2),其结果表明,土壤有效态 Pb 和土壤 pH 呈极显著负相关: $y=98.60-14.68\text{ pH}(r=-0.989, P<0.01)$ ,这与 He 等<sup>[21]</sup>、李忠义等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。表明土壤 pH 是影响土壤有效态 Pb 含量的重要因素之一,提高土壤 pH 可以降低土壤重金属 Pb 的活性。

### 2.2 复合调理剂对土壤矿物质元素和有机质含量的影响

矿物质元素是存在于土壤中的植物生长所必需的营养元素,包括氮、磷、钾、钠、钙、镁、硅、硫、铁、锰、镍等,其中,钾、钙、镁属于大量元素,对植物生长起到



柱上不同小写字母表示各处理间差异达到 5% 显著水平。下同  
Different letters indicate significant difference at 5% level. The same below

图 1 复合调理剂施加对土壤有效态 Pb 含量和 pH 值的影响  
Figure 1 Effects of compound conditioner application on soil available Pb concentrations and soil pH values

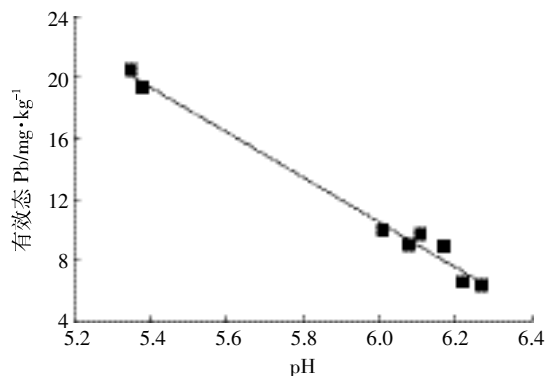


图 2 土壤 pH 值和土壤有效态 Pb 含量之间的线性关系  
Figure 2 Correlations between the concentrations of available Pb in soil and the soil pH values

至关重要的作用。而硅也被认为是植物不可缺少的营养元素<sup>[9]</sup>。从图 3 可以看出,施加复合调理剂能提高土壤矿物质元素的含量,速效 K、交换性 Ca、Mg 和有效 Si 的含量分别增加 1.59%~11.76%、6.88%~21.73%、28.00%~31.47%和 21.32%~51.82%。线性分析表明:复合调理剂施加量与土壤中交换性 Ca 和有效 Si 含量呈显著正相关( $r_{\text{Ca}}=0.998^{**}$ ;  $r_{\text{Si}}=0.989^{*}$ )。施加复合调理剂后,土壤中矿物质元素含量的增加可能是由于调理剂含有  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  和  $\text{CaMgSiO}_4$  等物质,可以在土壤溶液的作用下,释放或转化成有效的矿物质元素。

土壤有机质是土壤肥力的重要指标之一,也是植物生长所需营养主要来源之一。图 4 为调理剂对盆栽土壤有机质含量的影响。与 CK 相比,复合调理剂施加量为  $0.67\sim 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,土壤有机质含量增加 10.98%~13.41%。线性分析结果表明,复合调理剂施

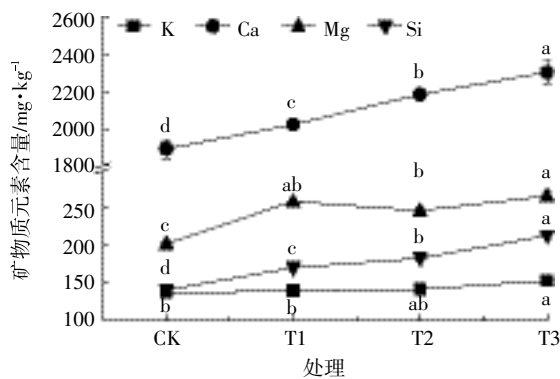


图 3 复合调理剂对土壤矿物质元素含量的影响

Figure 3 Effects of compound conditioner on mineral nutrients contents in soil

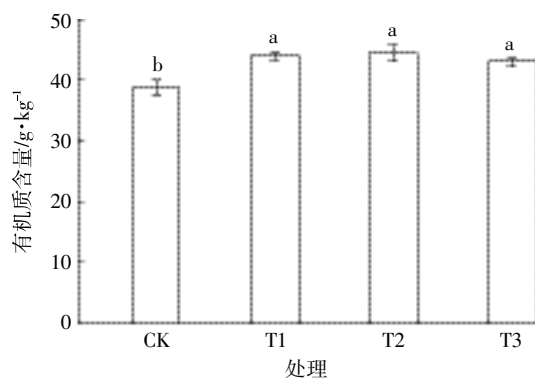


图 4 复合调理剂对土壤有机质含量的影响

Figure 4 Effects of compound conditioner on organic matter contents in soil

加量与有机质含量并无显著相关性。与 CK 相比,复合调理剂各施加水平下存在显著差异( $P<0.05$ )。褐煤腐植酸是一种有机物质,这可能是施用复合调理剂后土壤有机质含量增加的原因。

### 2.3 复合调理剂对小白菜中重金属含量的影响

由图 5 可以看出,在复合调理剂不同施加量水平下,小白菜根部和地上部 Pb 含量与 CK 相比均有不同程度的降低。线性相关分析表明,复合调理剂的施加量与小白菜地上部 Pb 含量呈显著负相关( $r_{\text{地上}} = -0.987^*$ ),同时多重比较显示,复合调理剂各施加浓度下存在显著的差异性( $P<0.05$ )。而复合调理剂施加量与小白菜根部 Pb 含量相关关系不显著( $P>0.05$ ),与 CK 相比,复合调理剂各施加浓度下存在显著差异( $P<0.05$ )。当复合调理剂施加量为  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,小白菜根部和地上部 Pb 含量降低效果最好,分别降低了 19.16% 和 10.94%。

表 2 列出了小白菜根部和地上部 Pb 含量与各项土壤指标之间的相关关系。由表 2 可知,土壤 pH 值

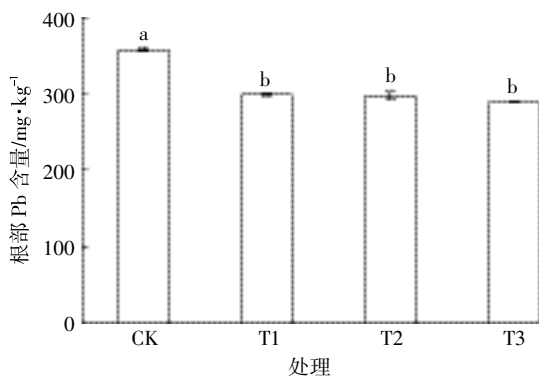
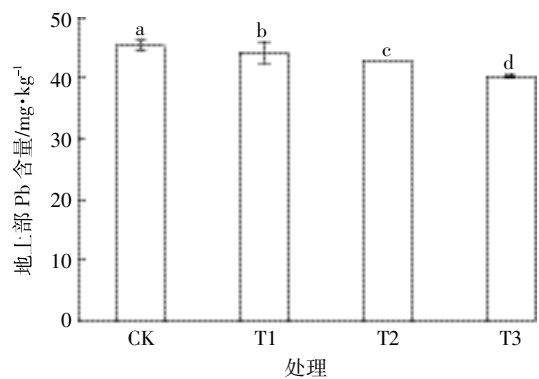


图 5 复合调理剂对小白菜中 Pb 含量的影响

Figure 5 Effects of compound conditioner on the concentrations of Pb in pakchoi

表 2 土壤各项参数与小白菜中 Pb 含量之间的相关关系

Table 2 Correlations coefficients between soil properties and the concentrations of Pb in pakchoi

|        | pH       | 有机质      | 有效态 Pb  | 地上部 Pb | 根部 Pb |
|--------|----------|----------|---------|--------|-------|
| pH     | 1        |          |         |        |       |
| 有机质    | 0.423    | 1        |         |        |       |
| 有效态 Pb | -0.989** | -0.867** | 1       |        |       |
| 地上部 Pb | -0.820*  | -0.555   | 0.857*  | 1      |       |
| 根部 Pb  | -0.994** | -0.913** | 0.989** | 0.790* | 1     |

注: \* $P<0.05$ , \*\* $P<0.01$ 。

Note: \* and \*\* indicate correlations coefficients at 5% and 1% level, respectively.

与小白菜根部( $P<0.01$ )、地上部( $P<0.05$ )Pb 含量均呈显著负相关,土壤有效态 Pb 含量与小白菜根部( $P<0.01$ )、地上部( $P<0.05$ )Pb 含量均呈显著正相关,且土壤 pH 值与有效态 Pb 含量呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ), 这表明施加复合调理剂能提高土壤 pH 值,降低土壤有效态 Pb 含量,减少 Pb 在小白菜根部和地上部的积累。有机质含量与土壤有效态 Pb 含量、小白菜根部 Pb 含量均呈极显著负相关( $P<0.01$ )。这表明,土壤有机质含量的升高能降低有效态 Pb 含量以及减少重金属 Pb 在小白菜根部的积累。

此外,复合调理剂的添加除了能够降低土壤 Pb 生物有效性,也显著地提升了土壤中交换性 Ca 和有效 Si 的含量(图 3),且土壤中交换性 Ca、有效 Si 含量与小白菜根部 Pb 含量均呈显著负相关( $r_{Ca}=-0.827^*$ ;  $r_{Si}=-0.865^{**}$ )。

## 2.4 复合调理剂对小白菜生长的影响

通过盆栽试验考察了复合调理剂对小白菜生物量和株高的影响(图 6)。由图 6 可以看出,施加复合调理剂能促进小白菜的生长。与 CK 相比,当复合调理剂施加量为  $0.67\sim 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,小白菜的生物量增加了  $22.79\%\sim 49.90\%$ ,株高提高了  $2.91\%\sim 7.15\%$ 。在施加量为  $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时,小白菜生物量及株高增加最多,分别增加了 1.5 倍和 1.07 倍。线性相关分析表明,复合调理剂的施加量和土壤生长指标呈显著正相关( $r_{\text{生物量}}=0.950^*$ ;  $r_{\text{株高}}=0.969^*$ )。多重比较显示,小白菜生物量在复合调理剂各施加浓度下存在显著的差异性( $P<0.05$ )。

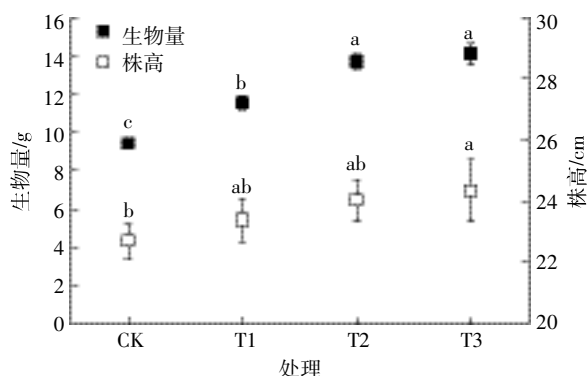


图 6 复合调理剂对小白菜生物量和株高的影响

Figure 6 Effects of compound conditioner on biomass and stem length of pakchoi

## 3 讨论

复合调理剂的施加可以有效提高土壤 pH 值,这主要是因为调理剂本身呈弱碱性( $\text{pH}=10.50$ ),其所含的未反应完全的氧化钙、氧化镁等碱性物质会中和土壤中的活性  $\text{H}^+$ ,直接提高土壤的 pH。其次与调理剂所含的盐基离子有关,调理剂中的  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等盐基离子进入土壤溶液中,增加土壤中交换性阳离子含量,提高土壤盐基饱和度,从而提高土壤 pH 值<sup>[24]</sup>。本研究发现土壤 pH 与小白菜生长指标之间呈显著正相关( $r_{\text{生物量}}=0.930^{**}$ ;  $r_{\text{株高}}=0.843^{**}$ ),说明土壤 pH 的提升有利于小白菜的生长。Zhou 等<sup>[25]</sup>和 He 等<sup>[26]</sup>的研

究也发现土壤 pH 适当提升有利于小白菜生物量的累积。此外,土壤 pH 的升高也是土壤有效态 Pb 含量降低的一个重要原因。有研究表明,土壤 pH 的升高使土壤颗粒表面净负电荷增加,从而增加对  $\text{Pb}^{2+}$  的电性吸附,同时导致二价重金属离子水解程度增大,生成羟基态金属阳离子,此形态的金属离子与土壤吸附点位的亲和力要比自由态金属离子强,更易被土壤颗粒表面所吸附<sup>[11,27]</sup>。本研究中土壤有效态 Pb 含量随着 pH 的增加而下降的趋势与以往的研究结果相一致<sup>[21,28]</sup>。除了土壤 pH,土壤有机质含量也是影响土壤重金属生物有效性的一个重要因素。通过线性回归分析发现,土壤有效态 Pb 含量与土壤有机质含量呈极显著负相关( $P<0.01$ )。土壤有机质通过络合作用与  $\text{Pb}^{2+}$  结合,形成稳定的  $\text{Pb}^{2+}$ -有机配体,这种重金属离子-有机配体更容易吸附在土壤颗粒表面,降低土壤中 Pb 的有效性<sup>[29-30]</sup>。

与 CK 相比,3 个处理小白菜中的重金属浓度均出现了显著下降(图 5),这不仅与调理剂施加后土壤有效态 Pb 含量的减少有关,可能还跟小白菜生物量增加所产生的稀释作用有关。无论是对小白菜产生的生长促进作用,还是对小白菜吸收 Pb 的抑制作用,都与土壤环境的改善有关。有研究表明, $\text{K}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$  和  $\text{Si}$  等矿物质元素作为小白菜生长必需的营养元素,不仅对小白菜生长和发育起重要作用,矿物质元素还可以抑制植物对 Pb 的吸收和有效缓解  $\text{Pb}^{2+}$  对植物体产生的毒害作用。王芳等<sup>[31]</sup>研究发现添加外源 Ca 可以增加玉米幼苗中叶绿素含量,延缓叶绿素降解,减轻  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫对光合机构造成的伤害。陈晓婷等<sup>[32]</sup>认为  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  与  $\text{Pb}^{2+}$  之间存在着某种程度上的拮抗作用,参与竞争作物根系上的吸附位点,降低了根细胞对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸收,减少了 Pb 在作物中的积累。硅元素能提高叶绿素含量,减轻重金属对作物光合作用的抑制作用,激发抗氧化酶的活性,提高作物对土壤中重金属的抗性<sup>[33-34]</sup>。另外,硅与重金属在作物根部形成沉积物,增强作物根部对 Pb 的截留,阻碍了重金属经根部运输至作物体内<sup>[35]</sup>。邓腾灏博等<sup>[36]</sup>通过大田实验发现,施加钢渣增加了土壤中有效硅的含量,增强了水稻根部对重金属的截留吸附作用,大幅减少了根部重金属向地上部的转运。在本试验中,土壤中施加复合调理剂后,土壤 pH 值升高,土壤有效态 Pb 含量降低,土壤有机质和矿物质元素( $\text{K}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Si}$ )有效态含量得到提升,这些使小白菜生长的土壤环境得到了显著改善,抑制了小白菜对重金属 Pb 的吸收,最终促进小

白菜生长和生物量的累积。

## 4 结论

(1)施加复合调理剂能有效改善土壤质量,且施加量( $0\sim 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )越大,改善效果越明显。复合调理剂施加量为 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤pH提升0.91个单位,土壤中有有效态Pb含量降至最低,与CK相比,下降67.47%。土壤中有有机质和矿物质元素(K、Ca、Mg和Si)含量也随着施加量增大而增加,在 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 施加水平下,与CK相比,有机质增加13.41%,有效态Ca和Si含量分别增加21.73%和51.82%。

(2)复合调理剂的施加促进了小白菜的生长。线性相关分析表明,复合调理剂施加量与小白菜生长指标之间呈显著正相关( $P<0.05$ )。与CK相比,施加 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 调理剂后,小白菜生物量和株高分别增加49.90%和7.15%。

(3)土壤pH值、有机质含量均与土壤有效态Pb含量、小白菜中Pb含量呈显著负相关( $P<0.05$ ),土壤有效矿物质元素含量(Ca、Si)与小白菜根部Pb含量之间负相关性也达到显著水平( $P<0.05$ )。说明通过复合矿物质材料和有机材料,可以降低土壤重金属的生物有效性,减少重金属Pb在小白菜中的累积。

## 参考文献:

- [1] 徐峰,黄益宗,蔡立群,等.不同改良剂处理对玉米生长和重金属累积的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(3):463-470.  
XU Feng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, et al. Effects of different amendments on corn growth and accumulation of heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):463-470.
- [2] 贾倩,胡敏,张洋洋,等.钾硅肥施用对水稻吸收铅、镉的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(12):2245-2251.  
JIA Qian, HU Min, ZHANG Yang-yang, et al. Effects of potassium-silicon fertilizer application on lead and cadmium uptake by rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2245-2251.
- [3] 黎大荣,杨惟薇,黎秋君,等.蚕沙和赤泥用于铅镉污染土壤改良的研究[J].土壤通报,2015,46(4):977-984.  
LI Da-rong, YANG Wei-wei, LI Qiu-jun, et al. Application of silkworm excrement and red mud for soil remediation contaminated by lead and cadmium[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4):977-984.
- [4] 易杰祥,吕亮雪,刘国道.土壤酸化和酸性土壤改良研究[J].华南热带农业大学学报,2006,12(1):23-28.  
YI Jie-xiang, LÜ Liang-xue, LIU Guo-dao. Soil acidification and acid soil amelioration[J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2006, 12(1):23-28.
- [5] 蒙园园,石林.矿物质调理剂中铝的稳定性及其对酸性土壤的改良作用[J].土壤,2017,49(2):345-349.  
MENG Yuan-yuan, SHI Lin. Stability of aluminium in mineral conditions and amelioration on acid soil[J]. *Soils*, 2017, 49(2):345-349.
- [6] 王宇霞,郝秀珍,苏玉红,等.不同钝化剂对Cu、Cr和Ni复合污染土壤的修复研究[J].土壤,2016,48(1):123-130.  
WANG Yu-xia, HAO Xiu-zhen, SU Yu-hong, et al. Remediation of heavy metal contaminated soil with different amendments[J]. *Soils*, 2016, 48(1):123-130.
- [7] 张乐,徐平平,李素艳,等.有机-无机复合改良剂对滨海盐碱地的改良效应研究[J].中国水土保持科学,2017,15(2):92-99.  
ZHANG Le, XU Ping-ping, LI Su-yan, et al. Amelioration effects of organic-inorganic compound amendment on coastal saline-alkali soil[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(2):92-99.
- [8] 蔡轩,龙新宪,种云霄,等.无机-有机混合改良剂对酸性重金属复合污染土壤的修复效应[J].环境科学学报,2015,35(12):3991-4002.  
CAI Xuan, LONG Xin-xian, CHONG Yun-xiao, et al. Inorganic-organic amendments for immobilization of metal contaminants in an acidic soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(12):3991-4002.
- [9] Porter S K, Scheckel K G, Impellitteri C A, et al. Toxic metals in the environment: Thermodynamic considerations for possible immobilization strategies for Pb, Cd, As, and Hg[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2004, 34(6):495-604.
- [10] 邱琼瑶,周航,曾卉,等.组配改良剂对重金属污染土壤理化性质及有效养分的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(5):907-912.  
QIU Qiong-yao, ZHOU Hang, ZENG Hui, et al. Effects of combined amendments on physicochemical properties and available nutrients of soil contaminated with heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):907-912.
- [11] 殷飞,王海娟,李燕燕,等.不同钝化剂对重金属复合污染土壤的修复效应研究[J].农业环境科学学报,2015,34(3):438-448.  
YIN Fei, WANG Hai-juan, LI Yan-yan, et al. Remediation of multiple heavy metal polluted soil using different immobilizing agents[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):438-448.
- [12] Hong C O, Lee D K, Chung D Y, et al. Liming effects on cadmium stabilization in upland soil affected by gold mining activity[J]. *Archives Environment Contamination Toxicology*, 2007, 52(4):496-502.
- [13] 邵乐,郭晓方,史学峰,等.石灰及其后效对玉米吸收重金属影响的田间实例研究[J].农业环境科学学报,2010,29(10):1986-1991.  
SHAO Le, GUO Xiao-fang, SHI Xue-feng, et al. Effect of lime on heavy metals uptake by *Zea mays* and the persistence of the liming effect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1986-1991.
- [14] Yin P, Shi L. Remediation of Cd, Pb, and Cu-contaminated agricultural soil using three modified industrial by-products[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(11):1-14.
- [15] 赵荣芳,邹春琴,张福锁.长期施用磷肥对冬小麦根际磷、锌有效性及其作物磷锌营养的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(3):368-372.  
ZHAO Rong-fang, ZOU Chun-qin, ZHANG Fu-suo. Effects of long term P fertilization on P and Zn availability in winter wheat rhizosphere and their nutrition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13

- (3):368-372.
- [16] Chrysochoou M, Dermatas D, Grubb D G. Phosphate application to firing range soils for Pb immobilization: The unclear role of phosphate[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144(182):1-14.
- [17] 孙水娟, 文倩, 谢平. 酸雨对土壤质量影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5):2774-2777.  
SUN Shui-juan, WEN Qian, XIE Ping. Research advance on effects of acid rain on soil quality[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2012, 40(5):2774-2777.
- [18] 魏朝富, 谢德体, 郭碧花, 等. 酸性水稻土上水稻对硅、钾、钙、镁的吸收及其动力学研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4):452-457.  
WEI Chao-fu, XIE De-ti, GUO Bi-hua, et al. Study on uptake of Si, K, Ca, Mg by rice and its dynamics in acid paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4):452-457.
- [19] Shi L, Xu P Z, Xie K Z, et al. Preparation of a modified flue gas desulfurization residue and its effect on pot sorghum growth and acidic soil amelioration[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(3):978-985.
- [20] Wang Y, Shi L. The effects of modified flue gas desulfurization residue on growth of sweet potato and soil amelioration[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226(8):1-13.
- [21] He J Y, Shi L. Modified flue gas desulfurization residue (MFGDR): A new type of acidic soil ameliorant and its effect on rice planting[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 24(3):159-167.
- [22] Madejón E, de Mora A P, Felipe E, et al. Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation[J]. *Environment Pollution*, 2006, 139(1):40-52.
- [23] 李忠义, 张超兰, 邓超冰, 等. 铅锌矿区农田土壤重金属有效态空间分布及其影响因子分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1772-1776.  
LI Zhong-yi, ZHANG Chao-lan, DENG Chao-bing, et al. Analysis on spatial distribution of soil available heavy metals and its influential factors in a lead-zinc mining area of Guangxi, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1772-1776.
- [24] 李平, 王兴祥, 郎漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7):1241-1249.  
LI Ping, WANG Xing-xiang, LANG Man, et al. Effects of amendments on the fraction transform of heavy metals in soil contaminated by copper and cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7):1241-1249.
- [25] Zhou D M, Hao X Z, Wang Y J, 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.
- [26] He M M, Li W H, Liao X Q, et al. Effect of composting process on phytotoxicity and speciation of copper, zinc and lead in sewage sludge and swine manure[J]. *Waste Management*, 2009, 29(2):590-597.
- [27] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH、有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):510-515.  
LIN Da-song, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effect of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> by soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):510-515.
- [28] Ping L I, Wang X, Zhang T, 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(4):449-455.
- [29] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments: A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1):215-225.
- [30] Chen Y. Chapter 13—organic matter reactions involving micronutrients in soils and their effect on plants[M]. *Humic Substances in Terrestrial Ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 1996:507-529.
- [31] 王芳, 李永生, 王汉宁, 等. 钙对铅胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3):202-207.  
WANG Fang, LI Yong-sheng, WANG Han-ning, et al. Effect of calcium on growth and physiological characteristics of maize seedling under lead stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3):202-207.
- [32] 陈晓婷, 王果, 梁志超, 等. 钙镁磷肥和硅肥对 Cd、Pb、Zn 污染土壤上小白菜生长和元素吸收的影响[J]. 福建农林大学学报(自然版), 2002, 31(1):109-112.  
CHEN Xiao-ting, WANG Guo, LIANG Zhi-chao, et al. Effects of calcium magnesium phosphate and silicon fertilizer on the growth and element uptake of pakchoi in cadmium, lead and zinc contaminated soil[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2002, 31(1):109-112.
- [33] Gu H H, Qiu H, Tian T, et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil[J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9):1234-1240.
- [34] 罗小玲, 李淑仪, 蓝佩玲, 等. 硅酸盐及腐植酸对 Cr-Pb 污染土壤中小白菜的生长和生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2338-2344.  
LUO Xiao-ling, LI Shu-yi, LAN Pei-ling, et al. Effect of silicates and humic acid on growth and physiology of *Brassica Chinensis* under the stress of Cr-Pb[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2338-2344.
- [35] Shi X H, Zhang C C, Wang H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1):53-60.
- [36] 邓腾源博, 谷海红, 仇荣亮. 钢渣施用对多金属复合污染土壤的改良效果及水稻吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):455-460.  
DENG Teng-hao-bo, GU Hai-hong, QIU Rong-liang. Ameliorative effects of steel slag application on multi-metal contaminated soil and heavy metal uptake of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3):455-460.