

武成辉, 李亮, 晏波, 等. 新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10):2007–2013.

WU Cheng-hui, LI Liang, YAN Bo, et al. Remediation effects of a new type of silicate passivator on cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2007–2013.

新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究

武成辉^{1,2}, 李亮^{1,2}, 晏波^{1*}, 雷畅¹, 陈涛¹, 肖贤明¹

(1.中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过活化蒙脱石中硅(Si)元素制备新型硅酸盐土壤重金属钝化剂,并在高效钝化重金属的同时为作物生长提供营养成分。采用盆栽试验研究了新型硅酸盐钝化剂对土壤pH和镉(Cd)形态分布的影响,同时考察了钝化剂对小白菜生物量、株高及Cd含量的影响,探讨了钝化剂对土壤镉污染可能的钝化机理及效果。结果表明,在Cd含量为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 污染土壤上施加新型硅酸盐钝化剂均可显著增加小白菜的生物量并降低其重金属含量,土壤Cd含量为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时施加5‰硅酸盐钝化剂可使小白菜生物量增加25%、Cd含量降低59.17%;添加5‰钝化剂可使土壤pH升高约1.4个单位,且土壤中弱酸溶解态镉含量分别降低19.8%和9.40%。由此可见,新型硅酸盐钝化剂可有效降低酸性镉污染土壤中可迁移态Cd含量并促进作物生长。

关键词:土壤;重金属;镉;硅酸盐钝化剂;蒙脱石

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)10-2007-07 doi:10.11654/jaes.2017-0471

Remediation effects of a new type of silicate passivator on cadmium-contaminated soil

WU Cheng-hui^{1,2}, LI Liang^{1,2}, YAN Bo^{1*}, LEI Chang¹, CHEN Tao¹, XIAO Xian-ming¹

(1.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China; 2.University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: A new type of heavy metal passivator was prepared by activating silicon (Si) in montmorillonite, which can passivate the heavy metals in soil and provide nutrients for the growth of crops. The effects of the silicate passivator on the pH of soil, the forms of cadmium (Cd) in soil, and the biomass, plant height, and heavy metal content of pakchoi were investigated in pot experiments. The possible immobilization mechanism of Cd was elucidated. The results showed that the biomass of pakchoi increased and the Cd content of pakchoi decreased obviously after addition of the silicate passivating agent. The biomass and Cd content of pakchoi were increased by 25% and decreased by 59.17%, respectively, after 5‰ passivator was added to a Cd content of $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the soil. The soil pH increased about 1.4 pH units, and the contents of weak acid-extracted Cd decreased by 19.8% and 9.40%, respectively, after 5‰ passivator was added to Cd contents of 3 and $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the soil. Thus, the silicate passivating agent could effectively reduce the content of migrating Cd in acidic Cd-contaminated soil and promote the growth of crops.

Keywords: soil; heavy metal; cadmium; silicate passivating agent; montmorillonite

镉(Cd)是国家重点监控与排放的五种土壤重金属污染物之一^[1],具有较强的生物毒性、不可逆和不能

被降解的特性^[2]。调查显示,我国受Cd污染土壤面积高达1000万 hm^2 ^[3-4],镉主要通过金属冶炼、污水灌溉

收稿日期:2017-03-30 录用日期:2017-06-21

作者简介:武成辉(1989—),男,河南洛阳人,硕士研究生,从事重金属污染土壤修复研究。E-mail:1216292229@qq.com

*通信作者:晏波 E-mail:yanbo2007@gig.ac.cn

基金项目:广东省省级科技计划项目(2014B090901040,2015B090922005)

Project supported: Guangdong Provincial Science and Technology Program(2014B090901040,2015B090922005)

以及化肥农药大量使用等途径进入土壤^[5-7],不仅导致农田土壤肥力下降和作物减产,还通过食物链途径富集在生物体内,对人类健康构成严重威胁。土壤镉污染的主要修复技术有异位修复和原位固定修复技术两类^[7]。异位修复主要通过物理或生物方法将重金属从土壤中去,使其在土壤中存留浓度接近或达到土壤背景值;原位固定修复技术主要通过向土壤添加合适钝化剂,降低与重金属离子之间发生吸附、沉淀、络合、离子交换等一系列反应,改变重金属在土壤中的赋存形态,降低重金属吸收和毒性效果,此方法与前者相比操作简单,成本低,适于大规模应用^[8-10]。

常用的钝化剂主要有磷酸盐^[11]、碳酸盐^[12]、硅酸盐等。硅酸盐钝化剂与前两者相比具有来源广泛、不破坏土壤结构、改良酸性土壤和不引入二次污染等优点^[13-14];同时,硅作为一种植物营养元素,植物吸收后除了能增加生物物质外还能促使植株分泌抗氧化酶来缓解重金属的毒害作用,对降低土壤重金属生物可利用性具有重要意义^[15-17]。此外,我国土壤普遍缺硅,而硅酸盐钝化剂具有补充硅源、促进作物增产的显著效果^[18]。硅肥和黏土矿物是常用的硅酸盐钝化剂^[19-20],硅肥如钢渣硅肥、炼铁炉渣硅肥等具有较高含量的有效硅,能促进作物生长,同时具有枸溶、缓释特点,但由于结构方面存在缺陷,吸附性能和离子交换能力受到影响,其在镉污染农田上的应用受到限制^[21-22]。黏土矿物较多应用于土壤重金属污染治理^[23-24],但含有的大量硅以稳定形态存在于矿物中难以被植物体吸收利用。因此,针对硅酸盐材料的特性和适用范围,根据我国农田土壤重金属污染与缺硅的现状,将土壤重金属污染修复与农作物增产相结合,开发对土壤重金属具备吸附、沉淀与生物抑制功能且有利于农作物生长的长效硅酸盐土壤重金属钝化剂具有重要意义。

本研究以高含硅黏土矿物-蒙脱石为原材料制备了高有效硅含量的新型硅酸盐钝化剂,以期高效修复镉污染农田土壤、降低 Cd 在作物可食用部分累积量并促进作物生长,为硅酸盐钝化剂的开发及镉污染农田土壤的修复治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蔬菜作物为小白菜,供试土壤取自于广东省广州市天河区岑村附近某菜地表层土壤(0~25 cm),自然风干,去除杂物,研磨后过 2 mm 筛网备用。土壤 pH 5.71(水:土=2.5:1),有机质含量 13.2 g·kg⁻¹,全氮

0.78 g·kg⁻¹,有效磷 39.0 mg·kg⁻¹,速效钾 127 mg·kg⁻¹,全镉含量为 0.25 mg·kg⁻¹。供试蒙脱石购自上海阿拉丁试剂公司,比表面积为 20~40 m²·g⁻¹。分别称取 2 kg 风干土壤样品于 190 mm×140 mm×170 mm 花盆中,通过添加 Cd(NO₃)₂·4H₂O 溶液使土壤镉浓度至(3±0.05)mg·kg⁻¹和(5±0.05)mg·kg⁻¹两个污染水平,搅拌均匀,自然条件下放置一个月备用。

供试新型硅酸盐钝化剂(MMT-SC)以蒙脱石为原材料,按照质量比添加 25%Na₂CO₃和 25%Ca(OH)₂,搅拌均匀,800 °C 煅烧 5 h,冷却后用 0.5 mol·L⁻¹稀盐酸进行处理,调节 pH 至 7 左右,去除多余的碱性物质后烘干研磨制成,保存待用。X 射线荧光光谱分析(XRF)结果表明,蒙脱石 SiO₂含量为 54%~57%,新型硅酸盐钝化剂中 SiO₂含量为 27%~29%。用 0.5 mol·L⁻¹稀盐酸提取钝化剂中有效硅,硅钼黄比色法检测蒙脱石的有效硅含量为 2%~5%,而新型钝化剂有效硅含量高达 17%~21%^[25-26];蒙脱石的 pH 为 6~7,新型硅酸盐钝化剂 pH 为 7~8。

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验设计与处理

盆栽设计:试验设置土壤镉污染浓度为(3±0.05)mg·kg⁻¹和(5±0.05)mg·kg⁻¹两个浓度梯度,钝化剂的添加量分别为污染土壤重量的 0.02‰、1‰、5‰ 3 个水平,在两个污染浓度下分别做对照处理,试验共设 8 个处理,每个处理重复 3 次,处理编号为: Cd₃、Cd₃+T_{0.02}、Cd₃+T₁、Cd₃+T₅、Cd₅、Cd₅+T_{0.02}、Cd₅+T₁、Cd₅+T₅。

试验处理:加入钝化剂两周后播种,每盆均匀撒入 30 颗小白菜籽,每日傍晚浇水,保持土壤含水量为田间最大持水量的 70%。小白菜幼苗长出 4 cm 后定株,每盆 3 株。出苗 10 d 后施加氮磷钾复合肥(安徽省合肥市花卉肥料厂,全镉含量<0.25 mg·kg⁻¹),一次 1.5 g·kg⁻¹,埋入距离根部稍远土壤中。培养 35 d 后收割。采集的植物样品用去离子水洗涤,擦拭干净,分别记录鲜重和地上部分重量,并记录植株高度。将干净的小白菜植株置于 105 °C 烘箱中杀青 60 min,保持 70 °C 烘至恒重,研磨,过 0.5 mm 筛网,保存于干燥密封袋,做好标记待测。小白菜收割后取一定量土壤样品自然风干,研磨,过 0.5 mm 筛网保存待测。

1.2.2 分析方法

植物中全 Cd 含量测定采用 HNO₃-HClO₄ 法。准确称取 1.000 0 g(小白菜)样品于 50 mL 带盖聚四氟乙烯消解杯中,加入 25 mL 浓硝酸,摇匀,静置一夜,将消解杯放置于 80 °C 电热板上恒温 30 min,加入 5

mL 分析纯高氯酸, 调整电热板温度至 200 ℃ 煮沸至液体为透明状, 冷却后定容于 25 mL 容量瓶待测。土壤中 Cd 全量分析采用 HF-王水(浓 HNO₃:浓 HCl)-HClO₄=2:4(1:3):1 消煮法^[27], 分级形态 Cd 的提取采用欧共体修正 BCR 顺序提取法^[28], 依次提取弱酸溶解态, 可还原态, 可氧化态和残渣态。

溶液中 Cd 含量测定使用原子吸收分光光度法测定(日立 ZA3000 系列)。

1.2.3 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2010 进行处理和作图, 采用 SPSS Statistics 17.0 Duncan 差异显著性分析和 Person 相关性进行分析讨论。

2 结果与讨论

2.1 钝化剂对小白菜生长的影响

表 1 显示土壤镉浓度为 3 mg·kg⁻¹ 和 5 mg·kg⁻¹ 时, 添加不同量 MMT-SC 型硅酸盐钝化剂对小白菜生长的影响。两种污染浓度下, 添加 1‰ 和 5‰ 硅酸盐钝化剂均可增加小白菜株高和鲜重, 镉浓度为 3 mg·kg⁻¹ 时硅酸盐钝化剂对小白菜的促进生长作用更明显。土壤镉含量为 3 mg·kg⁻¹, 添加钝化剂后小白菜鲜重与对照组相比明显增加, 添加量为 1‰ 和 5‰ 时分别比对照增加 14% 和 25%。这可能是由于硅酸盐钝化剂增加了土壤中有效硅的含量而促进小白菜生长^[29]。土壤 Cd 含量为 5 mg·kg⁻¹ 时, 施加 1‰ 和 5‰ 硅酸盐钝化剂后小白菜生物量仅比对照增加 1.23% 和 1.03%。Cd₃ 和 Cd₅ 对照组显示, 随土壤 Cd 浓度的增加, 小白菜生物量增加了 7.18%。这可能是因为大量外源离子交换态 Cd 的加入替换了土壤胶体上吸附的营养元素, 促使作物吸收土壤养分, 对小白菜生长具有一定促进作用^[3]。

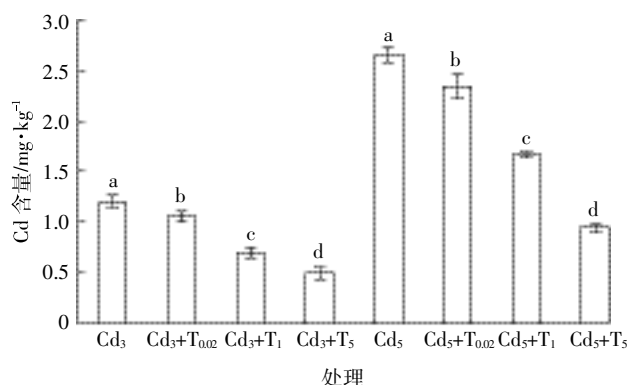
2.2 钝化剂对小白菜吸收积累 Cd 含量的影响

如图 1 所示, 相同培养条件下, 小白菜地上部 Cd 积累量与土壤中 Cd 含量正相关^[30-31], 土壤 Cd 含量由 3 mg·kg⁻¹ 增加至 5 mg·kg⁻¹, 对照组小白菜体内 Cd 含量由 1.20 mg·kg⁻¹ 增加至 2.65 mg·kg⁻¹。不同污染浓度

下, 施加钝化剂后植株 Cd 含量均比对照组有显著降低, 添加钝化剂量至 5‰ 时, 小白菜地上部 Cd 含量较对照组分别降低 59.17% 和 64.53%。这说明土壤 Cd 浓度越大, 新型钝化剂对 Cd 在小白菜地上部积累的抑制效应越明显, 与王世华等^[30]的研究结果一致。两种污染浓度下, 小白菜体内 Cd 含量均随钝化剂添加量增加呈现下降趋势, 可能与硅能缓解重金属对植物的毒害作用有关。研究表明, 硅作为一种植物营养元素, 植物吸收后除了能增加生物质外还能促使植株分泌抗氧化酶缓解重金属毒害作用, 对降低土壤重金属生物可利用性具有重要意义^[16-17]。

2.3 钝化剂对土壤 pH 影响

新型硅酸盐钝化剂对土壤 pH 影响如图 2 所示。土壤 pH 直接影响土壤中重金属的可迁移性, 随 pH 升高, 土壤负电荷量增加, H⁺ 与溶解态重金属离子在钝化剂和土壤胶体上竞争吸附作用减弱, 有利于重金属向氢氧化物沉淀和碳酸盐结合态沉淀转化, 促进重金属的钝化稳定化效果^[32-33]。从图 2 可知, 不同 Cd 污染浓度下, 土壤 pH 值均随钝化剂添加量的增加而增加, 当钝化剂添加量均为 5‰ 时土壤 pH 比对照升高



相同镉浓度下不同字母表示处理间差异性显著($P < 0.05$), 下同
Mean values followed by different letters in the same Cd concentration are significantly different ($P < 0.05$). The same below

图 1 MMT-SC 硅酸盐钝化剂对小白菜地上部 Cd 含量影响

Figure 1 Effects of MMT-SC silicate passivator on Cd concentration in pakchoi

表 1 钝化剂对小白菜生长的影响

Table 1 Effect of passivators on growth of pakchoi

处理编号	Cd ₃	Cd ₃ +T _{0.02}	Cd ₃ +T ₁	Cd ₃ +T ₅	Cd ₅	Cd ₅ +T _{0.02}	Cd ₅ +T ₁	Cd ₅ +T ₅
株高/cm	19.33c	18.67d	20.67b	23.33a	20.67c	19.33d	22.33b	23.30a
鲜重/g·pot ⁻¹	20.75ab	19.45b	23.66ab	25.96a	22.24a	20.95a	22.51a	22.47a

注: 数据为三个重复的平均值, 相同镉浓度下不同字母表示处理间存在显著性差异($P < 0.05$)。

Note: Data are means of three replicates. Mean values followed by different letters in the same Cd concentration are significantly different ($P < 0.05$).

约 1.4 个单位。李平等^[34]比较了石灰、钙镁磷肥和硅肥等改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化影响发现,添加 4‰ 硅肥可使土壤 pH 值提高 0.57~1.65 个单位。这说明硅酸盐钝化剂可改良酸性土壤,有利于土壤 Cd 的固定,同时也是施加钝化剂后植物对镉吸收量降低的重要原因。新型硅酸盐钝化剂中有效二氧化硅在土壤中发生水解作用产生羟基使土壤和植物根际 pH 值上升;此外,蒙脱石、氢氧化钠和氢氧化钙在高温下制备新型硅酸盐钝化剂的过程中生成枸溶性硅酸盐(钙、镁)与土壤中 Al^{3+} 反应生成稳定的非晶形羟基硅酸盐,也可能是土壤 pH 升高的重要原因^[35]。

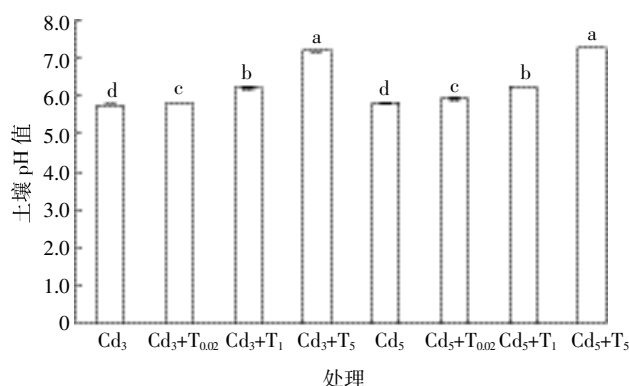


图2 MMT-SC 硅酸盐钝化剂对土壤 pH 的影响

Figure 2 Effects of MMT-SC silicate passivating agent on soil pH

2.4 钝化剂对土壤中 Cd 赋存形态的影响

不同镉浓度下向污染土壤添加新型硅酸盐钝化剂对土壤 Cd 各形态含量影响如图 3 所示。采用欧盟标准物质局提出的重金属形态连续提取法(BCR 法)^[28,36],依次提取出弱酸溶解态、可还原态、可氧化态和残渣态,其中弱酸溶解态重金属可迁移性和生物有效性最强,易被植物体吸收利用,是植物体内重金属的主要来源。模拟污染土壤镉浓度为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不添加钝化剂情况下,弱酸溶解态镉含量分别占总量的 46.13% 和 43.79%,说明人为添加至土壤中的镉主要以弱酸提取态形式存在于土壤中,土壤中植物可利用形态镉含量高,相对应的植物中镉含量也较高(图 1);添加钝化剂情况下,与对照组相比,土壤中弱酸溶解态 Cd 含量均随钝化剂添加量增加呈明显下降趋势,可还原态 Cd 含量均随钝化剂添加量增加呈明显上升趋势,相应地小白菜中 Cd 的累积量均随钝化剂添加量增加呈明显减少趋势(见图 1)。这表明,新型硅酸盐钝化剂促进了土壤重金属向稳定态转变和缓解重金属对作物毒害的目的,钝化修复的关

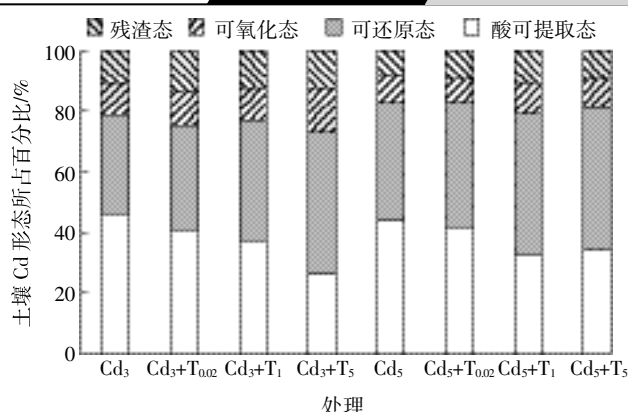


图3 MMT-SC 硅酸盐钝化剂对土壤 Cd 赋存形态的影响

Figure 3 Effects of MMT-SC silicate passivating agent on the forms of Cd in soil

键在于促使尽可能多的弱酸溶解态镉向其他稳定形态转化,与曾燕君等^[31]研究结果一致。在模拟 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 污染土壤添加钝化剂时,土壤中弱酸提取态 Cd 含量由对照组的 46.13% 最大降低至 26.33%,可还原态 Cd 含量由 32.51% 最高增加至 46.47%,可氧化态镉含量由 10.81% 最高增加至 14.63%;在 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 污染土壤添加钝化剂时弱酸提取态 Cd 含量由对照组的 43.79% 最大降低至 32.23%,同时可还原态镉含量由 39.07% 最高增加至 47.08%,而可氧化态和残渣态含量几乎无变化。这表明新型硅酸盐钝化剂主要促使镉由弱酸溶解态向可还原态和可氧化态转化,有效地降低 Cd 的可迁移性和生物有效性,实现了土壤 Cd 的固定。这可能主要是因为:一方面新型硅酸盐钝化剂中大量有效硅溶解后产生的硅酸根离子与弱酸溶解态 Cd 结合形成难溶性物质硅酸镉和偏硅酸镉;另一方面钝化剂提高了土壤 pH,增加了土壤胶体和矿物表面的负电荷量,促使重金属向氢氧化物沉淀和碳酸盐结合态沉淀转化。同时,由蒙脱石制备而成的硅酸盐钝化剂可能具有较大的比表面积和阳离子交换能力,可以通过吸附、沉淀等方式将重金属固定在钝化剂表面。

2.5 土壤 pH、小白菜体内 Cd 含量、土壤 Cd 各形态之间的 Pearson 相关性分析

将土壤 pH、小白菜吸收 Cd 含量以及土壤各形态 Cd 之间的相关性进行分析,结果如表 2 所示。弱酸溶解态 Cd 与土壤 pH 值显著负相关,相关系数为 -0.830 ($P<0.05$);可还原态 Cd 与土壤 pH 值显著正相关,相关系数为 0.794 ($P<0.05$)。结果表明,pH 升高能有效降低土壤中弱酸溶解态 Cd 含量并增加可还原态 Cd 含量。弱酸溶解态镉含量与可还原态镉含量极显著负

相关,相关系数为 $-0.839(P<0.01)$,说明新型硅酸盐钝化剂主要促使镉由弱酸溶解态向可还原形态转变。小白菜体内 Cd 积累量与可氧化态 Cd 和残渣态 Cd 分别呈显著负相关,相关系数分别为 -0.717 和 $-0.757(P<0.05)$,主要是因为可氧化态和残渣态 Cd 含量的增加导致土壤中植物可利用形态 Cd 含量的降低,进而抑制小白菜对重金属的吸收。

表 2 土壤 pH、小白菜体内 Cd 含量、土壤各形态 Cd 之间相关性
Table 2 Correlations between soil pH, pakchoi Cd concentrations, and soil Cd fractions

	pH	小白菜地上部 Cd 含量	弱酸溶 解态	可还 原态	可氧 化态	残渣态
pH	1					
小白菜地上 部 Cd 含量	-0.564	1				
弱酸溶解态	-0.830*	0.539	1			
可还原态	0.794*	-0.119	-0.839**	1		
可氧化态	0.423	-0.717*	-0.600	0.118	1	
残渣态	0.076	-0.757*	-0.342	-0.183	0.683	1

注: * 表示显著相关($P<0.05$); ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicate significant correlation($P<0.05$); ** indicate extremely significant correlation($P<0.01$)

3 结论

(1)两种浓度 Cd 污染土壤施用新型硅酸盐钝化剂均可一定程度增加小白菜生物量,且镉浓度为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时添加钝化剂对小白菜生长的促进作用更加明显。

(2)镉浓度为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下添加 5‰ 新型硅酸盐钝化剂可使小白菜体内 Cd 积累量由 $1.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,效果显著。

(3)在镉浓度为 $3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤上添加 5‰ 钝化剂可使土壤 pH 升高约 1.4 个单位,弱酸溶解态镉含量分别比对照降低 19.8% 和 9.40%。新型硅酸盐钝化剂主要适用于酸性镉污染土壤。

(4)土壤 pH、小白菜吸收 Cd 含量以及土壤 Cd 各形态分布之间具有显著相关性。新型硅酸盐钝化剂可缓解镉污染农田土壤重金属对作物的毒害作用,同时具有促进作物生物量增加的双重效果,故具有一定开发利用价值。

参考文献:

[1] 杨 蓉,李鸿博,周永莉,等. Fe^{3+} 负载凹凸棒土(Fe/ATP)结构表征及其稳定化修复镉(Cd)机制研究[J]. 环境科学, 2015, 36(8):3032-

3037.

YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, et al. Stabilization of cadmium contaminated soils by ferric ion modified attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and stabilization mechanism[J]. *Environment Science*, 2015, 36(8):3032-3237.

[2] 黄益宗,郝晓伟,雷 鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):409-417.

HUANG Yi-zong, HAO Xiao-wei, LEI Ming, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):409-417.

[3] 徐应明,李军幸,孙国红,等. 新型功能膜材料对污染土壤铅汞钝化作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 32(1):86-89.

XU Ying-ming, LI Jun-xing, SUN Guo-hong, et al. Inactivation of Pb, Hg and Cd in-Situ in contaminated soil by a functionalized monolayer material[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 32(1):86-89.

[4] 王 林,徐应明,孙国红,等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2):314-320.

WANG Lin, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2):314-320.

[5] 施亚星,吴绍华,周生路,等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. 环境科学, 2016, 37(10):3996-4003.

SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, et al. Simulation of the absorption migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(10):3996-4003.

[6] 李 铖,李芳柏,吴志峰,等. 景观格局对农业表层土壤重金属污染的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4):1137-1144.

LI Cheng, LI Fang-bai, WU Zhi-feng, Impacts of landscape patterns on heavy metal contamination of agricultural top soils in the Pearl River Delta, South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4):1137-1144.

[7] 曹心德,魏晓欣,代革联,等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7):1441-1453.

CAO Xin-de, WEI Xiao-xin, DAI Ge-lian, et al. Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: A review[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(7):1441-1453.

[8] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1):186-194.

ZENG Xi-bai, XU Jian-ming, HUANG Qiao-yun, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1):186-194.

[9] 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.

[10] 孙约兵,王朋超,徐应明,等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, 35(12):4720-4726.

- SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, et al. Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: Remediation potential and soil environmental quality[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(12):4720-4726.
- [11] 梁媛, 王晓春, 曹心德. 基于磷酸盐、碳酸盐和硅酸盐材料化学钝化修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *环境化学*, 2012, 31(1):16-25.
- LIANG Yuan, WANG Xiao-chun, CAO Xin-de, Immobilization of heavy metals in contaminated soils with phosphate-, carbonate-, and silicate-based amendments: A review[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(1):16-25.
- [12] 钟倩云, 曾敏, 廖柏寒, 等. 碳酸钙对水稻吸收重金属(Pb、Cd、Zn)和As的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(4):1242-1248.
- ZHONG Qian-yun, ZENG Min, LIAO Bo-han, et al. Effect of two immobilization materials on stabilization treatment for heavy metal and arsenic compound polluted sediment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4):1242-1248.
- [13] Bhattacharyya K G, Gupta S S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2008, 140(2):114-131.
- [14] Gu H H, Li F P, Guan X, et al. Remediation of steel slag on acidic soil-contaminated by heavy metal[J]. *Asian Agricultural Research*, 2013, 5(5):100-104.
- [15] 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.
- [16] Shi G, Cai Q, Liu C, et al. Silicon alleviates cadmium toxicity in peanut plants in relation to cadmium distribution and stimulation of antioxidative enzymes[J]. *Plant Growth Regulation*, 2010, 61(1):45-52.
- [17] 许建光, 李淑仪, 王荣萍. 硅肥抑制作物吸收重金属的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(7):495-499.
- XU Jian-guang, LI Shu-yi, WANG Rong-ping. The Research progresses on silicon fertilizer controlling the absorption of heavy metal in plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(7):495-499.
- [18] Zhang C C, Wang L J, Nie Q, et al. Long-term effects of exogenous silicon on cadmium translocation and toxicity in rice(*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62(3):300-307.
- [19] Ning D F, Liang Y C, Song A, et al. In situ stabilization of heavy metals in multiple-metal contaminated paddy soil using different steel slag-based silicon fertilizer[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(23):23638-23647.
- [20] Wang H Y, Wen S L, Chen P, et al. Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(4):3781-3788.
- [21] Bian R, Li L, Bao D, et al. Cd immobilization in a contaminated rice paddy by inorganic stabilizers of calcium hydroxide and silicon slag and by organic stabilizer of biochar[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(10):10028-10036.
- [22] 任玉森, 刘骆峰, 张宏伟. 钢渣制取硅钾肥的缓释性分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(2):74-80.
- REN Yu-sen, LIU Luo-feng, ZHANG Hong-wei. Slow-releasing property analysis of modified silicon-potash produced from desilicized slags from liquid Iron[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(2):74-80.
- [23] 赵秋香, 黄晓纯, 李媛媛, 等. 蒙脱石-OR-SH 复合体修复剂对重金属污染土壤中Cd的钝化效果[J]. *环境化学*, 2014, 33(11):1871-1877.
- ZHAO Qiu-xiang, HUANG Xiao-chun, LI Yuan-yuan, et al. A smectite-OR-SH compound for reducing cadmium uptake by pakchoi in contaminated soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(11):1871-1877.
- [24] Uddin M K. A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals, with special focus on the past decade[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308:438-462.
- [25] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 三版. 北京: 中国环境科学出版社, 1997:341-342.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 3th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1997:341-342.
- [26] 中华人民共和国农业部. NY/T 797—2004 中华人民共和国农业行业标准: 硅肥[S]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- Ministry of Agriculture of PRC. NY/T 797—2004 Agricultural Standard of PRC: Silicate fertilizer[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2004.
- [27] 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, 2000:477-479.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000:477-479.
- [28] Pueyo M, Mateu J, Rigol A, et al. Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2):330-341.
- [29] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(1):116-121.
- YANG Chao-guang, DOU Hu, LIANG Yong-chao, et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(1):116-121.
- [30] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J]. *生态环境学报*, 2007, 16(3):875-878.
- WANG Shi-hua, LUO Qun-sheng, LIU Chuan-ping, et al. Effects of leaf application of nanometer silicon to the accumulation of heavy metals in rice grains[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):875-878.
- [31] 曾燕君, 周志军, 赵秋香. 蒙脱石-OR-SH 复合体修复剂对重金属污染土壤中Cd的钝化效果[J]. *环境科学*, 2015, 36(6):2314-2319.
- ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang. Mechanism study of the smectite-OR-SH compound for reducing cadmium uptake by plants in contaminated soils[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6):2314-2319.
- [32] 陈杰, 宋靖珂, 张晶, 等. 不同钝化剂对铜污染土壤原位钝化修

- 复[J]. 土壤, 2016, 48(4):742-747.
- CHEN Jie, SONG Jing-ke, ZHANG Jing, et al. In-situ-immobilization by different passivators in copper contaminated soils[J]. *Soils*, 2016, 48(4):742-747.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 杨丹, 刘鸣达, 姜峰, 等. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究 I. 对土壤 pH、Eh 及硅动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4):757-763.
- YANG Dan, LIU Ming-da, JIANG Feng, et al. Effect of silicon fertilizer in acid and neutral paddy field soils; I. Effect on dynamic changes of pH, Eh and Si in soil solution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):757-763.
- [36] 罗远恒, 顾雪元, 吴永贵, 等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):890-897.
- LUO Yuan-heng, GU Xue-yuan, WU Yong-gui, et al. In-situ remediation of cadmium-polluted agriculture land using stabilizing amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):890-897.



环境生物资源与应用

付保荣、马溪平、张润洁 等编著

本书从环境监测、环境净化、生态恢复、现代生物技术等几个方面出发,利用国内外研究实例,提出一个环境生物资源学科领域的理论框架,包括环境生物资源的概念、属性、分类、功能,生物多样性保护、环境生物资源开发利用原则等,有助于今后更好地利用生物资源解决环境问题。

※书号:9787122272454

※定价:78.0 元

※开本:16

※出版日期:2017 年 2 月



环境污染与植物修复

李雪梅 主编 韩阳、邵双 副主编

本书系统介绍了环境污染与植物的相互作用,着重阐述了植物对污染环境的修复功能。本书共分 6 章,分别阐述了环境污染物的种类、性质、来源及其迁移转化规律;典型污染物质对植物形态、生理代谢的影响和危害以及植物对环境污染的响应;植物对污染环境的净化功能;植物对污染环境的修复潜力及植物修复技术的应用实例;植物对环境污染的监测等内容。

※书号:9787122265258

※定价:85.0 元

※开本:16

※出版日期:2017 年 1 月

如需更多图书信息,请登录 www.cip.com.cn

服务电话:010-64518888,64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店:<http://hxgycbs.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系,联系电话:010-64519525。