

复合钝化剂对镉污染土壤三七生长及生理特性的影响

刘娟, 李佳佳, 张乃明, 冯光泉

引用本文:

刘娟, 李佳佳, 张乃明, 等. 复合钝化剂对镉污染土壤三七生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2190–2197.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0077>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, 李亮, 晏波, 雷畅, 陈涛, 肖贤明

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2007–2013 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0471>

设施菜地土壤镉钝化剂筛选及应用效果研究

王云丽, 石耀鹏, 赵文浩, 李令仪, 乔建晨, 王雨薇, 梁淑轩, 刘微

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1503–1510 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0303>

生物质炭、有机肥和钙镁磷肥对三七(Panax Notoginseng)Cd含量的影响

陈建清, 郭栋, 陈德, 李恋卿, 潘根兴

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1909–1916 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0353>

组配钝化剂对镉铅复合污染土壤修复效果研究

张迪, 丁爱芳

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2718–2726 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0881>

钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563–572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘娟, 李佳佳, 张乃明, 等. 复合钝化剂对镉污染土壤三七生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2190–2197.
LIU Juan, LI Jia-jia, ZHANG Nai-ming, et al. Effects of compound passivators on growth and physiological characteristics of *Panax notoginseng* in cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2190–2197.



开放科学 OSID

复合钝化剂对镉污染土壤三七生长及生理特性的影响

刘娟^{1,3}, 李佳佳⁴, 张乃明^{2,3*}, 冯光泉⁵

(1. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 3. 云南省土壤培肥与污染修复工程实验室, 昆明 650201; 4. 山西晋环科源环境资源科技有限公司, 山西 朔州 030024; 5. 文山学院文山三七研究院, 云南 文山 663000)

摘 要:三七是云南最重要的中药材,为探究复合钝化剂对镉污染土壤上三七生长及其镉吸收累积的影响,以一年生三七为供试材料,采用盆栽试验方法,研究了钝化剂不同添加量(0、0.50%、1.00%、1.50%)对三七生长、生理生化指标以及镉吸收累积的影响。结果表明:施用钝化剂能够有效促进三七的生长,增加三七株高、叶长、叶宽、茎粗以及叶绿素含量,同时显著提高三七地上和地下生物量;复合钝化剂能够降低三七主根和叶片中MDA含量,而CAT活性却随着钝化剂添加量的增加而上升,同时,三七主根和叶片中游离氨基酸含量及主根可溶性蛋白含量降低。复合钝化剂不仅可以降低土壤中有效态镉的含量,还对三七各部位吸收镉产生一定的影响,与对照相比,三七主根镉含量降低了21.4%~57.1%、剪口降低了58.9%~62.6%、茎部降低了47.4%~67.4%、叶降低了25.0%~53.1%。研究表明,在镉污染土壤中使用复合钝化剂既可以有效地促进三七的生长发育,又可以减少镉在三七各个器官中的累积,在本试验条件下设置的3种钝化剂添加量中,添加量为1.50%的处理效果较好。

关键词:钝化剂;三七;生理生化;镉污染

中图分类号:S567.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)10-2190-08 **doi:**10.11654/jaes.2020-0077

Effects of compound passivators on growth and physiological characteristics of *Panax notoginseng* in cadmium-contaminated soil

LIU Juan^{1,3}, LI Jia-jia⁴, ZHANG Nai-ming^{2,3*}, FENG Guang-quan⁵

(1. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Resource and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Yunnan Soil Fertility and Pollution Restoration Laboratory, Kunming 650201, China; 4. Shanxi Jinhuan Keyuan Environmental Resources Technology Co., Ltd, Shuozhou 030024, China; 5. Wenshan Sanqi Research Institute, Wenshan University, Wenshan 663000, China)

Abstract: *Panax notoginseng* is the most important Chinese herbal medicine in Yunnan Province. In order to explore the effects of compound passivators on plant growth and Cd absorption in Cd-contaminated soil cultivation, taking 1 year old *Panax notoginseng* as the experimental material and using a pot experiment, the effects of different dosages of passivators (0, 0.50%, 1.00%, and 1.50%) on the growth, physiological indexes, biochemical indexes, and Cd absorption and accumulation of *Panax notoginseng* were studied. The results showed that the growth of *Panax notoginseng* was promoted by using passivators; the plant height, leaf length, leaf width, stem diameter, and chlorophyll content increased; and the aboveground and underground biomass of *Panax notoginseng* increased significantly; the compound passivator could reduce the MDA content in the main root and leaves of *Panax notoginseng*, but the CAT content increased with

收稿日期:2020-01-17 录用日期:2020-04-23

作者简介:刘娟(1990—),女,四川资中人,博士研究生,主要从事农用化学物质与环境研究。E-mail:15587214232@163.com

*通信作者:张乃明 E-mail:zhangnaiming@sina.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800603)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFD0800603)

the increase in the passivator content. Simultaneously, the contents of free amino acids and soluble proteins in the main root and leaves of *Panax notoginseng* decreased; and the compound passivator not only reduced the content of available Cd in the soil, but also affected the absorption of Cd in different parts of *Panax notoginseng*. Compared with that of the control, the content of Cd in the main root of *Panax notoginseng* decreased by approximately 21.4%~57.1%, that in the cutting decreased by 58.9%~62.6%, that in the stems decreased by 47.4%~67.4%, and that in the leaves of *Panax notoginseng* decreased by 25.0%~53.1%. Thus, the application of compound passivators in Cd-contaminated soil can not only effectively promote the growth and development of *Panax notoginseng*, but also reduce the accumulation of Cd in various organs of *Panax notoginseng*. The recommended dosage among the three passivator additives is 1.50%.

Keywords: passivator; *Panax notoginseng*; physiology and biochemistry; cadmium pollution

三七(*Panax notoginseng*)为五加科人参属多年生草本植物^[1],因其富含人参皂苷 Rg₁、槲皮素、乙酸等12种单体皂苷、止血成分田七氨酸、挥发油及多种微量元素,对血液和造血系统、心血管系统、神经系统以及免疫系统等具有独特的药用、保健和应用价值^[2]。三七因其生长特性,仅种植于云南省文山州、红河州等少数低纬、中高海拔地区^[3],由于种植地土地面积的局限性以及三七种植过程中存在连作障碍,严重地影响了三七的产量。此外,由于种植地土壤背景值高、矿冶活动的盲目扩张以及部分含重金属农药的大量施用等原因,三七种植区土壤出现较为严重的重金属污染问题。已经有研究报道,三七根块中镉的超标率高达62.96%,三七中镉污染不仅会抑制植物生长并降低酶的活性,还可以通过食物链富集对人体造成危害。目前我国三七年均产量约9 000 t,占世界三七市场的90%以上,三七成为我国出口的大宗药材之一^[4-5],随着人们对于中药材重金属含量问题的愈加重视,三七重金属污染已经成为三七产业拓展国际市场的一大难题和障碍。

化学钝化是普遍采用的一种重金属污染土壤修复治理的方法^[6],即通过向土壤中添加有机钝化剂(生物炭、粪肥、秸秆等)、无机钝化剂(黏土矿物、磷酸盐类和金属氧化物等)和纳米材料(碳质纳米材料、改性纳米材料、纳米性矿物以及零价金属材料)等改良剂^[7-12],一方面改善土壤的理化性质、提高土壤养分状况^[13],另一方面改变重金属在土壤中存在的形态,降低其在环境中的迁移性和生物有效性,从而降低重金属对动植物的毒害^[7]。近年来钝化剂被广泛应用于农田污染土壤的修复,所用钝化剂以单一材料为主,而复合钝化剂应用于三七种植区镉污染土壤的修复研究还很少。因此开展复合钝化剂对镉污染土壤上三七生长及其镉吸收累积的影响研究,可以为三七的安全种植提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤样品采自云南省文山州文山市(23°34'54" N, 104°19'46" E),供试土壤为红壤,于2017年2月按照随机多点混合采样法采集0~20 cm耕层土壤,经过风干后过2 mm孔径筛,去除土样中的根茬、动物残体和石块等杂物。供试土壤的基本理化性质为:pH值6.0、有机质24.17 g·kg⁻¹、碱解氮20.42 mg·kg⁻¹、速效磷27.24 mg·kg⁻¹、速效钾54.10 mg·kg⁻¹,云南属于重金属元素背景值比较高的区域,镉的质量分数为0.94 mg·kg⁻¹。人工污染土壤通过向土壤中喷洒镉[Cd(NO₃)₂·4H₂O](分析纯)溶液,搅拌均匀后固定两周,使土壤中Cd的质量分数达到5 mg·kg⁻¹,制成镉污染土壤。

供试三七(*Panax notoginseng*)选用一年生种苗,由文山学院文山三七研究院提供。以固废资源再利用、经济廉价为原则,本研究采用的复合钝化剂材料由改性磷石膏、硅藻土、生物炭和石灰4种材料复配而成(表1),配施比例为改性磷石膏:硅藻土:生物炭:石灰为50:25:15:10(质量比)。其中,磷石膏为笔者所在实验室研制的加热改性磷石膏,加热温度为800 ℃,磷石膏呈弱酸性,改性后磷石膏本身有氟、砷

表1 供试钝化剂的理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of the test passivator

钝化剂 Passivators	pH	有机质 Organic matter/%	镉 Cd/(mg·kg ⁻¹)
改性磷石膏 Modified phosphogypsum	9.1	0	0.38
硅藻土 Diatomite	8.5	0	0.23
生物炭 Biochar	9.8	64.0	0.64
石灰 Lime	13.0	0	0.45

等有害物质挥发,钙活性提高,磷石膏热改性还可以提高磷石膏的pH。磷石膏主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。供试的硅藻土购自天津市科密欧化学试剂有限公司,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 。生物炭购自郑州牛特农业技术有限公司,主要成分为C。石灰购自昆明索希达科技有限公司,主要成分为CaO。所有钝化剂过200目筛,复合钝化剂通过搅拌机混合均匀,外观为灰色粉末,pH 9.4,Cd $0.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,CaO 29%, SiO_2 36%,C 7%。

1.2 试验设计

盆栽试验共设计4个处理,分别为0(CK,不添加复合钝化剂)、0.50%、1.00%、1.50%,每个处理设置3个重复。试验所用容器为上口外直径为26 cm,下口外直径21 cm,高21 cm的塑料盆,每盆装土6 kg。将复合钝化剂按比例加入土壤,与土壤充分混匀。于2017年2月9日移栽三七种苗,移栽前每盆施入底肥90 g,放置一周,筛选长势一致、无病虫害的三七,每盆移栽13株。为防止三七发生病虫害,在种植前使用杀毒矾、多抗霉素以1:1的比例进行蘸根。移栽结束后浇水至浇透且无多余水流出,整齐摆放于提前搭建好的遮阴网内,再用0.5~1.0 cm厚度的松针进行遮盖,处理后待出苗。

在三七生长期间,每隔5 d浇水一次(具体根据天气),每次浇水约700 mL。8月份,三七逐步结束营养生长期,进入生殖生长期,此时每盆随机采集4株三七进行指标测定。在2018年1月,将剩余的三七全部收获,用清水洗干净,再用去离子水洗3次后将三七植株在105℃下杀青30 min,在65℃下烘干至恒质量,分别测定三七主根、茎、叶、剪口部位中重金属镉含量,土样按照四分法取混合土样约500 g,风干后过筛,进行土壤有效态镉含量、pH以及有机质含量的测定。

1.3 测定项目及方法

土壤pH值采用玻璃电极法测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾-外加热法测定^[14];土壤中镉采用石墨炉原子吸收分光光度法(岛津AA6880)测定;土壤有效态镉含量用DTPA提取-原子吸收法(岛津AA6880)测定,加入标准物质GBW07405对整个分析测试过程进行质量控制;三七植株各部位镉含量采用石墨炉原子吸收法(岛津AA6880)测定,以国家标准物质(GBW07603 GSV-2)为内标控制样品分析质量。

用卷尺(精度为0.01 cm)测量株高(从茎基部到茎的最高端);用直尺(精度为0.01 cm)测定三七叶长、叶

宽(三七中叶);用游标卡尺(精度为0.02 mm)测定三七茎粗(剪口以上0~1 cm处);叶绿素用叶绿素仪(SPAD-502 Plus)测定;地上鲜质量、地下鲜质量、地上干质量、地下干质量用天平称量精确到0.01 g。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定;游离氨基酸含量采用茚三酮溶液显色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250染色法测定,上述指标参照李合生《植物生理生化实验原理和技术》。过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)用南京建成试剂盒测定。

1.4 数据处理

试验数据采用Excel 2007软件进行整理和作图,采用SPSS 18.0软件进行方差分析(ANOVA)和显著性检验,显著水平为0.05。三七中镉含量的评价标准采用《地理标志产品 文山三七》(GB/T 19086—2008),其标准临界值为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 复合钝化剂对三七生物学性状的影响

三七植株的生长状况可以直接反应钝化剂的钝化效果,复合钝化剂对三七生物学性状的影响如表2所示,与对照相比,不同钝化剂添加量对三七株高、叶长、叶宽、茎粗、叶绿素和生物量均有一定的影响,三七各生物学指标随着钝化剂添加量的增加而增加。当钝化剂添加量为0.50%和1.00%时,三七的株高、叶宽、地上鲜质量以及地下干质量显著高于对照,而其他指标差异不显著。当钝化剂添加量为1.50%时,三七株高、叶长、叶宽、茎粗及地上鲜/干质量、地下鲜/干质量增加最为明显,与对照相比,分别增加33.8%、29.4%、18.9%、25.0%、50.0%、38.5%、64.0%以及84.6%,均达到了显著性差异,综合各指标的分析结果可以得出在钝化剂添加量为1.50%时,三七的各项生长指标的整体表现最好。

2.2 复合钝化剂对三七抗氧化性的影响

植物的过氧化性和抗氧化性可以间接反映植物受镉的胁迫程度,由表3可见,不同钝化剂添加量三七主根MDA含量的范围为 $0.43 \sim 0.88 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,叶片MDA含量的范围为 $1.09 \sim 2.10 \text{ nmol} \cdot \text{L}^{-1}$,钝化剂添加量为0.50%、1.00%、1.50%时,三七主根中MDA含量与对照相比分别降低了17.0%、51.1%和11.4%,叶片MDA含量分别降低了11.0%、48.1%和18.6%,三七主根和叶片MDA含量随着钝化剂添加量的增大呈先下降后上升的趋势。

抗氧化系统由SOD、POD和CAT等抗氧化酶组成。不同钝化剂添加量三七主根SOD活性为10.83~17.32 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,叶片中SOD活性为20.43~33.43 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,三七主根和叶片中SOD活性随着钝化剂添加量的增加呈下降趋势,且各处理间均达到显著性差异。不同钝化剂添加量三七主根POD活性为122.51~156.83 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,叶片中POD活性为257.80~284.03 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,三七主根和叶片中POD活性随着钝化剂添加量的增加呈下降趋势,除0.50%钝化剂处理,其他2个处理与对照相比均达到显著性差异。不同钝化剂添加量三七主根CAT活性为0.35~4.46 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,叶片CAT活性为0.21~7.27 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,三七主根和叶片中CAT活性随着钝化剂添加量的增加呈上升趋势,且各处理间均达到了显著性差异。

2.3 复合钝化剂对三七渗透调节物质的影响

复合钝化剂对三七可溶性蛋白以及游离氨基酸的影响如表4所示,钝化剂添加量为0.50%、1.00%、1.50%时,三七主根中可溶性蛋白含量的范围为6.80~19.34 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与对照相比分别降低了33.1%、59.0%和64.8%,各处理间差异性显著,可溶性蛋白含量整体随着钝化剂添加量的升高呈下降趋势。叶片中可溶性蛋白含量的范围为8.59~17.96 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,叶片中可溶性蛋白含量呈上升趋势,与对照相比分别增加了92.3%、99.3%和109.1%。钝化剂添加量为0.50%、1.00%、1.50%时,三七主根中游离氨基酸含量的范围为471.28~1 556.72 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,与对照相比分别降低了41.3%、69.7%和59.6%,叶片中游离氨基酸含量的范围为1 478.67~1 725.02 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,与对照相比分别降低了14.3%、2.9%和2.4%,不同钝化剂添加量之间差异

表2 复合钝化剂对三七生物学性状的影响

Table 2 Effect of different passivator contents on biological characters of *Panax notoginseng*

钝化剂添加量 Passivator addition/%	株高 Plant height/ cm	叶长 Leaf length/ cm	叶宽 Leaf width/ cm	茎粗 Stem diameter/ mm	叶绿素 SPAD	地上鲜质量 Overground fresh weight	地上干质量 Overground dry weight	地下鲜质量 Underground fresh weight/g	地下干质量 Underground dry weight/g
0(CK)	7.87±0.55b	4.15±0.07b	2.06±0.17b	2.16±0.17b	39.20±3.33b	0.96±0.09c	0.13±0.01b	1.14±0.13b	0.13±0.03c
0.50	9.90±0.85a	4.57±0.32ab	2.38±0.22a	2.42±0.29ab	44.52±2.00a	1.20±0.09b	0.15±0.02b	1.33±0.06b	0.16±0.02b
1.00	9.40±1.02a	4.85±0.58ab	2.40±0.28a	2.50±0.17a	40.73±3.79ab	1.21±0.05b	0.14±0.01b	1.41±0.02b	0.18±0.03b
1.50	10.53±0.67a	5.37±0.78a	2.45±0.15a	2.70±0.26a	42.56±3.36ab	1.44±0.05a	0.18±0.02a	1.87±0.24a	0.24±0.03a

注:同一列中不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference in $P<0.05$ level among different treatments. The same below.

表3 不同钝化剂添加量对三七抗氧化性的影响

Table 3 Effect of different passivator contents on antioxidation of *Panax notoginseng*

钝化剂添加量 Passivator addition/%	MDA/($\text{nmol} \cdot \text{L}^{-1}$)		SOD/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)		CAT/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)		POD/($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	
	主根 Root	叶 Leaf	主根 Root	叶 Leaf	主根 Root	叶 Leaf	主根 Root	叶 Leaf
CK	0.88±0.01a	2.10±0.05a	17.32±0.11a	33.43±0.17a	0.35±0.04d	0.21±0.02d	156.83±2.03a	284.03±3.04a
0.50	0.73±0.06b	1.87±0.06b	16.72±0.31b	32.12±0.19b	1.19±0.08c	1.54±0.09c	137.02±0.31ab	271.83±2.41ab
1.00	0.43±0.02c	1.09±0.06d	15.54±0.21c	28.97±0.32c	2.65±0.11b	7.27±0.80a	132.81±4.06b	260.60±1.00b
1.50	0.78±0.09b	1.71±0.06c	10.83±0.17d	20.43±0.21d	4.46±0.30a	6.28±0.50b	122.51±1.00c	257.80±0.21c

表4 不同钝化剂添加量对三七渗透性的影响

Table 4 Effect of different passivator contents on the permeability of *Panax notoginseng*

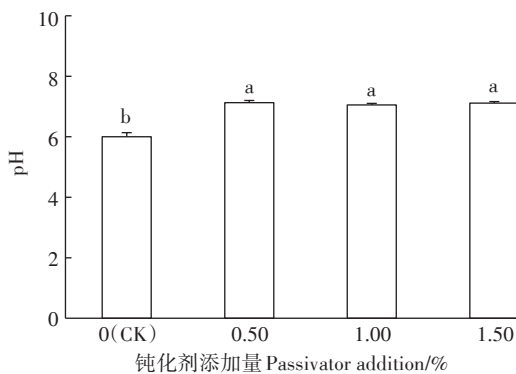
钝化剂添加量 Passivator addition/%	可溶性蛋白 Soluble proteins/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)		游离氨基酸 Free amino acids/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	
	主根 Root	叶 Leaf	主根 Root	叶 Leaf
0(CK)	19.34±0.22a	8.59±0.72c	1 556.72±0.58a	1 725.02±0.59a
0.50	12.93±0.21b	16.52±0.22b	913.12±0.60b	1 478.67±1.51d
1.00	7.92±0.12c	17.12±0.13b	471.28±0.57d	1 674.49±0.60c
1.50	6.80±0.18d	17.96±0.12a	629.56±1.16c	1 683.80±1.15b

性显著。主根和叶片中游离氨基酸含量随着钝化剂添加量的增加呈先下降后上升的趋势。

2.4 复合钝化剂对土壤 pH 值、有机质和有效态镉含量的影响

土壤 pH 值是影响土壤重金属有效态和植物吸收重金属的主要因素。施用钝化剂以后,土壤中 pH 含量有不同程度的增加,与对照相比,0.50%、1.00%和 1.50% 添加量处理 pH 含量分别增加了 18.8%、17.6%和 18.6%,差异达到了显著性水平,但不同钝化剂处理之间差异性不显著。土壤有机质不仅可以改良受污染土壤,而且还可以提高土地生产力。施用钝化剂以后,0.50%、1.00%、1.50% 钝化剂处理土壤有机质含量分别为 24.99、27.12 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 30.08 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与对照相比,分别提高了 3.4%、12.2% 和 24.5%,0.50% 钝化剂处理土壤中有机质含量与对照之间虽有增加,但差异不显著,1.00% 和 1.50% 钝化剂处理土壤与对照之间呈显著性差异(图 1)。

复合钝化剂对土壤有效态镉含量的影响如图 2



不同小写字母代表处理间差异显著。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments. The same below

图 1 不同钝化剂处理对土壤 pH 和有机质含量的影响

Figure 1 Effect of compound passivator on pH and organic matter content in soil

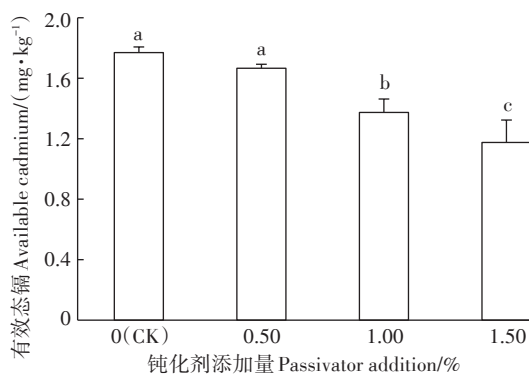


图 2 复合钝化剂对土壤有效态镉含量的影响

Figure 2 Effect of compound passivator on available Cd content in soil

所示,可以看出,钝化剂添加量为 0.50%、1.00%、1.50% 时土壤中有有效态镉含量分别为 1.77、1.67、1.37 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 1.18 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,施加钝化剂可以不同程度地降低土壤中有有效态镉的含量,与对照相比,钝化剂添加量为 0.5%、1.00%、1.50% 时土壤中有有效态镉含量分别降低 5.6%、22.6%、33.3%,其中,0.50% 钝化剂添加量与对照相比,差异不显著,而 1.00% 和 1.50% 钝化剂添加量较对照降低幅度大,呈显著性差异,不同钝化剂添加量的钝化效果为 1.50% > 1.00% > 0.50%。

2.5 复合钝化剂对三七各部位镉吸收的影响

复合钝化剂处理对三七各部位吸收镉的影响见图 3,不同钝化剂添加量三七各部位镉累积量在 0.30~1.07 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。与对照相比,添加钝化剂不同程度地降低了三七各部位重金属镉累积量。三七主根镉含量随着钝化剂添加量的增加而降低,添加 0.50%、1.00%、1.50% 的复合钝化剂使三七主根镉累积量分别降低了 21.4%、51.4% 和 57.1%,且不同钝化剂添加量之间差异性显著。三七剪口镉含量较对照分别降

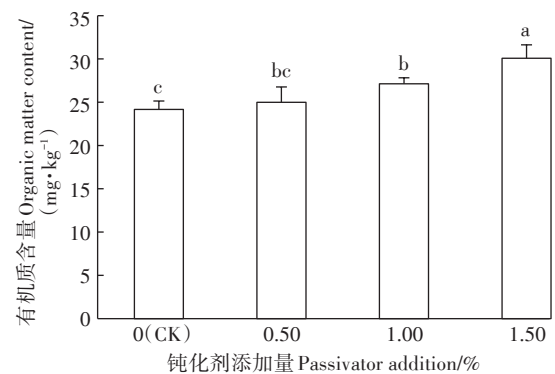


图 3 复合钝化剂对三七各部位重金属镉含量的影响

Figure 3 Effect of compound passivator on the content of heavy metal Cd in different parts of *Panax notoginseng*

低了62.6%、58.9%和58.9%,差异达到了显著性水平,但不同钝化剂添加量之间差异性不显著。三七茎部的镉累积量也是随着钝化剂添加量的增加而降低,钝化剂添加量为0.50%、1.00%、1.50%时使三七茎部镉累积量分别减少了47.4%、51.6%和67.4%,不同添加量之间镉含量差异性显著。0.50%、1.00%和1.50%钝化剂添加量三七叶镉累积量分别为0.48、0.47 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和0.30 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,与对照相比,分别降低了25.0%、26.6%和53.1%,差异达到了显著性水平。本试验中,添加钝化剂后三七剪口、茎和叶中镉含量均低于我国国家标准《地理标志产品 文山三七》(GB/T 19086—2008)中镉的限量(0.5 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$),而在三七主根中,添加量为1.00%和1.50%时,镉含量低于我国国家标准(GB/T 19086—2008)中镉的限量。

3 讨论

3.1 施用复合钝化剂与三七的生长发育

在本研究中,施用复合钝化剂对三七株高、叶长、叶宽、茎粗、叶绿素和生物量均有一定的影响,在钝化剂添加量为1.50%时,三七的各项生长指标的整体表现最好。主要是因为土壤施加钝化剂以后,一方面钝化剂降低了重金属对三七的毒害作用,另一方面又提高了作物对养分的吸收,促进了作物的生长,提高了作物的地上和地下生物量。有研究表明,施用硅藻土、生物炭、沸石粉能不同程度地促进玉米生长,增加玉米株高、叶面积、生物量和穗粒质量,显著提高玉米产量^[15]。刘阿梅等^[16]的研究发现,在基质中添加生物炭可以增加圆萝卜和小青菜株高和鲜质量,同时促进圆萝卜根部膨大。王甲辰等^[17]通过研究发现,向土壤中添加沸石粉可以增加玉米的生物量。本研究中,施用不同比例的复合钝化剂(改性磷石膏、硅藻土、生物炭、石灰)可以有效提高三七株高、叶长、叶宽、茎粗、叶绿素以及生物量,主要是因为改性磷石膏能够增加土壤有效态氮、磷、钾的含量,直接提供三七生长所需的氮、磷、钾等营养元素,促进三七生长,同时施用磷石膏还可提高土壤pH的含量,降低土壤中镉的毒害。硅藻土属于黏土矿物,比表面积大,其结构层带电荷^[18],可以通过吸附、配位反应以及共沉淀反应等作用,降低溶液中重金属离子的浓度和活性,从而降低对三七的毒害。生物炭是一种多孔碳质材料,具有丰富的孔隙和表面含氧官能团^[19-20],且有低堆积密度、高比表面积等特性,对土壤镉固定有很大的作用。同时,生物炭的添加不仅可以增强土壤中微生物的活

性,增强对污染物的降解能力,还可以提高土壤中多种养分及微量元素^[21],从而达到改善土壤质量以及促进三七生长的作用。石灰属于碱性材料,它可以改变土壤pH从而降低土壤有效态镉的含量^[22],但石灰的强碱性也可能对三七生长造成一定的危害,在本研究中,由于其添加量较少,造成的影响需作深入研究。

3.2 复合钝化剂对三七抗氧化系统和渗透性物质的影响

重金属污染导致植物体内产生大量的活性氧自由基,引起蛋白质和核酸等生物大分子变性、膜脂质过氧化,从而使植物受到伤害。而植物并非被动地遭受逆境所造成的氧化胁迫,在长期的进化过程中,植物形成了广泛分布的、多层次的活性氧清除系统。抗氧化酶系统是植物抵抗重金属胁迫的重要防御系统。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)是三七体内抗氧化酶系统中最重要3种酶类,SOD作为植物抗氧化酶系统的第一道防线,可以清除 O_2 自由基,减少膜质过氧化,保持细胞膜的稳定,CAT和POD可以清除 H_2O_2 ,这3种酶相互作用来防止活性氧(ROS)的积累。在本研究中,主根和叶片的SOD和POD活性均低于对照,且随着钝化剂添加量的增加呈下降趋势,可能是因为加入复合钝化剂缓解了三七所遭受的镉胁迫。

丙二醛(MDA)是细胞膜脂过氧化的产物之一,MDA含量的高低在一定程度上能反映脂膜过氧化作用水平和膜结构的受害程度^[23-24]。本研究发现,土壤中加入复合钝化剂以后,三七主根和叶片中的MDA含量均低于对照,MDA下降是自由基减少、对脂膜过氧化作用减弱的结果,自由基减少可能源于复合钝化剂的添加使得镉胁迫减弱或抗氧化酶活性提高、清除作用增强等。本研究还发现,虽然总体上MDA含量均低于对照,但随着钝化剂添加量的增大呈先下降后上升的趋势,在3种添加量范围内,MDA含量在添加量为1.50%时最高,可能是因为盆栽试验中添加了大量的复合钝化剂,过量的钝化剂会使镉胁迫下三七膜系统受损,同时,复合钝化剂中包含的各种材料也可能对植物脂膜造成不利影响,需要在以后的研究中进行更深入的探索。

3.3 施用复合钝化剂对三七各部位镉累积的影响

在本研究中,施用复合钝化剂对三七各部位吸收镉产生一定的影响,与对照相比,三七主根镉含量降低了21.4%~57.1%,剪口降低了58.9%~62.6%,茎部降低了47.4%~67.4%,三七叶降低了25.0%~53.1%。

三七对镉的吸收主要是取决于土壤中有效态镉的含量,而土壤中有效态镉除了受到土壤本身理化性质如pH、有机质含量和CEC等因素的影响,还受到钝化剂性质和结构的影响。向土壤中添加复合钝化剂可以改变土壤微环境,进而影响土壤中有效态镉的含量以及植物吸收。本试验中采用的钝化材料主要包括改性磷石膏、硅藻土、生物炭和石灰,改性磷石膏可以提高土壤中的pH和有机质含量,土壤pH增高能够诱导形成镉的铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态以及氢氧化物沉淀,降低镉在土壤中的有效性。而有机质对镉污染的净化主要是因为腐植酸可以螯合土壤中的镉,使土壤环境中镉稳定性发生变化,从而降低镉在土壤中的有效性^[25-26],进而降低植物对重金属的吸收累积。硅藻土具有一定的保水保肥性,其表面含有Si—OH基团,Si—OH基团游离出来的氢可使硅藻土表面在水中带有一定的负电荷,增强对正电荷重金属离子的吸附,同时,Si—OH基团还能使重金属离子在硅藻土表面发生络合^[23]。生物炭由于高孔隙率、低堆积密度、丰富的表面官能团以及高比表面积而对土壤镉固定有很大的作用^[27-28],将生物炭掺入土壤可以改变土壤物理、化学特性,并可以控制重要的土壤物理功能,例如空气和水的渗透性、胶体和养分的浸出,同时由于其低密度的特性,添加一定量的生物炭会降低整体土壤的堆积密度^[29]。而石灰中钙的离子半径与镉的离子半径相近,易产生同晶代替作用。

4 结论

(1)施加复合钝化剂能够促进三七生长,提高三七株高、叶长、叶宽、茎粗、叶绿素和地上、地下部分的生物量。

(2)三七主根和叶片中MDA含量随着钝化剂添加量的增大呈先下降后上升的趋势,同时,施用复合钝化剂增加了三七主根和叶片中CAT活性,而降低了游离氨基酸和可溶性蛋白含量(除叶片外)。

(3)施加复合钝化剂能够有效降低土壤中有效态镉的含量,而且土壤镉有效态降低幅度随钝化剂用量的增加而增大,钝化效率最高为33.6%。

(4)施用不同数量的复合钝化剂与对照相比都能降低三七各部位镉的累积量,三七主根、剪口、茎和叶中镉的累积量均呈降低趋势,其中三七剪口镉累积量降低幅度最大在58.9%~62.6%,添加钝化剂后三七主根(添加量为1.00%和1.50%时)、剪口、茎和叶中镉含量均低于我国国家标准《地理标志产品 文山三七》

(GB/T 19086—2008)中镉的限量值。

参考文献:

- [1] 夏鹏国,崔秀明,韦美隆,等.三七的生物学特性研究进展[J]. 中药材, 2012, 35(5):831-835.
XIA Peng-guo, CUI Xiu-ming, WEI Mei-tang, et al. Research progress on biological characteristics of *Panax notoginseng*[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2012, 35(5):831-835.
- [2] 黄积武,李剑军,杨敬芝,等.三七叶的化学成分及其抗氧化活性研究[J]. 中草药, 2017, 48(21):4381-4386.
HUANG Ji-wu, LI Chuang-jun, YANG Jing-zhi, et al. Chemical constituents from leaves of *Panax notoginseng* and anti-oxidant activity[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2017, 48(21):4381-4386.
- [3] 祖艳群,程诗丛,柯汉玲,等.文山三七(*Panax notoginseng*)种植区三七与土壤中Pb、Cd、Cu和Zn的分布特征及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(4):317-323.
ZU Yan-qun, CHENG Shi-cong, KE Han-ling, et al. Distribution of Pb, Cd, Cu and Zn in plant of *Panax notoginseng* and soil in Wenshan Prefecture, a *Panax notoginseng*-growing region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(4):317-323.
- [4] 冯光泉,张文斌,陈中坚,等.三七及其栽培土壤中几种重金属元素含量的测定[J]. 中草药, 2003, 34(11):1051-1054.
FENG Guang-quan, ZHANG Wen-bin, CHEN Zhong-jian, et al. Determination on residues of several heavy metal elements in *Panax notoginseng* and its cultivating soil[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2003, 34(11):1051-1054.
- [5] 林龙勇,阎秀兰,廖晓勇,等.三七对土壤中镉、铬、铜、铅的累积特征及健康风险评价[J]. 生态学报, 2014, 34(11):2868-2875.
LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, LIAP Xiao-yong, et al. Accumulation of soil Cd, Cr, Cu, Pb by *Panax notoginseng* and its associated health risk[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11):2868-2875.
- [6] 黎大荣,吴丽香,宁晓君,等.不同钝化剂对土壤有效态铅和镉含量的影响[J]. 环境保护科学, 2013, 39(3):50-53.
LI Da-rong, WU Li-xiang, NING Xiao-jun, et al. Effects of different passivating agents on contents of available lead and cadmium in soil[J]. *Environmental Protection Science*, 2013, 39(3):50-53.
- [7] 宋正国,唐世荣,丁永祯,等.田间条件下不同钝化材料对玉米吸收镉的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2152-2159.
SONG Zheng-guo, TANG Shi-rong, DING Yong-zhen, et al. Effects of different amendments on cadmium uptake by maize under field conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2152-2159.
- [8] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10):1727-1736.
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10):1727-1736.
- [9] 孙约兵,王永昕,李烨,等. Cd-Pb复合污染土壤钝化修复效率与生物标记物识别[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6):951-958.
SUN Yue-bing, WANG Yong-xin, LI Ye, et al. Effectiveness of immo-

- bilization remediation of Cd and Pb combined contaminated soil and biomarker identification[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(6):951-958.
- [10] 崔岩山, 王鹏飞, 琚宜文. 纳米材料在土壤重金属污染修复中的应用[J]. *地球科学*, 2018, 43(5):379-387.
- CUI Yan-shan, WANG Peng-fei, JU Yi-wen. Progress of applications of nanomaterials in soil heavy metal remediation[J]. *Earth Science*, 2018, 43(5):379-387.
- [11] 路轲, 宋正国. 喷施不同纳米材料对水稻幼苗磷含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(1):28-36.
- LU Ke, SONG Zheng-guo. Effects of different sprayed nanomaterials on the phosphorus content in rice seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1):28-36.
- [12] 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.
- [13] 周斌, 黄道友, 朱奇宏, 等. 施用钝化剂对镉污染稻田土壤微生物学特征的影响[J]. *农业现代化研究*, 2012, 33(2):234-238.
- ZHOU Bin, HUANG Dao-you, ZHU Qi-hong, et al. Effects of amendments on soil microbial properties in cadmium contaminated paddy soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(2):234-238.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:30-34.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:30-34.
- [15] 杜彩艳, 木霖, 王红华, 等. 不同钝化剂及其组合对玉米 (*Zea mays*) 生长和吸收 Pb Cd As Zn 影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(8):1515-1522.
- DU Cai-yan, MU Lin, WANG Hong-hua, et al. Effects of different amendments on growth and Pb, Cd, As, Zn uptake by *Zea mays*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1515-1522.
- [16] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5):193-204.
- LIU A-mei, XIANG Yan-ci, TIAN Dai-ke, et al. Effects of biochar on plant growth and uptake of heavy metal cadmium[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5):193-204.
- [17] 王甲辰, 左强, 邹国元, 等. 土壤添加不同颗粒组成沸石粉对玉米生长及养分吸收的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015, 18(6):108-114.
- WANG Jia-chen, ZUO Qiang, ZOU Guo-yuan, et al. Effect of adding different particle composition of zeolite to soil on the growth and nutrient uptake of corn[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2015, 18(6):108-114.
- [18] 刘洁, 赵东风. 硅藻土的研究现状及进展[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(5):104-106.
- LIU Jie, ZHAO Dong-feng. The present situation and development of diatomite[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(5):104-106.
- [19] Zhang K K, Sun P, Faye M C, et al. Characterization of biochar derived from rice husks and its potential in chlorobenzene degradation [J]. *Carbon*, 2018, 130:730-740.
- [20] 蒋雨田, 姜军, 徐仁扣, 等. 稻草生物质炭对3种可变电荷土壤吸附 Cd(II) 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(6):1111-1117.
- JIANG Yu-tian, JIANG Jun, XU Ren-kou, et al. Effect of biochar from rice straw on adsorption of Cd(II) by variable charge soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6):1111-1117.
- [21] 张迪, 丁爱芳. 组配钝化剂对镉铅复合污染土壤修复效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(12):2718-2726.
- ZHANG Di, DING Ai-fang. Effects of combined passivating agents on remediation of Cd and Pb compound-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12):2718-2726.
- [22] 丁永祯, 宋正国, 唐世荣, 等. 大田条件下不同钝化剂对空心菜吸收镉的影响及机理[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(11):1758-1763.
- DING Yong-zhen, SONG Zheng-guo, TANG Shi-rong, et al. Mechanism and effects of different amendments on cadmium uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) in field conditions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(11):1758-1763.
- [23] Yan X L, Lin L, Liao X Y, et al. Arsenic accumulation and resistance mechanism in *Panax notoginseng*: A traditional rare medicinal herb [J]. *Chemosphere*, 2012, 87(1):31-36.
- [24] 金睿, 刘可星, 艾绍英, 等. 生物炭复配调理剂对镉污染土壤性状和小白菜镉吸收及其生理特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(9):1480-1487.
- JIN Rui, LIU Ke-xing, AI Shao-ying, et al. Effects of biochar complex conditioner on properties of cadmium contaminated soil and cadmium absorption and physiological characteristics of *Brassica chinensis*[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(9):1480-1487.
- [25] 杜彩艳, 段宗颜, 曾民田, 等. 田间条件下不同组配钝化剂对玉米 (*Zea mays*) 吸收 Cd、As 和 Pb 影响研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(10):1731-1738.
- DU Cai-yan, DUAN Zong-yan, ZENG Min-tian, et al. Effects of different combined amendments on cadmium, arsenic and lead absorption of maize under field conditions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(10):1731-1738.
- [26] 周涵君, 马静, 韩秋静, 等. 施用生物炭对土壤 Cd 形态转化及烤烟吸收 Cd 的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(9):3730-3738.
- ZHOU Han-jun, MA Jing, HAN Qiu-jing, et al. Effects of biochar addition on the soil Cd fraction and the absorption of Cd by tobacco [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(9):3730-3738.
- [27] Tan Z X, Yuan S N, Hong M F, et al. Mechanism of negative surface charge formation on biochar and its effect on the fixation of soil Cd[J]. *Journal of Hazardous Material*, 2020, 384: 121370.
- [28] 卜晓莉, 薛建辉. 生物炭对土壤生境及植物生长影响的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(3):535-540.
- BU Xiao-li, XUE Jian-hui. Biochar effects on soil habitat and plant growth: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(3):535-540.
- [29] Kumari K G I D, Moldrup Per, Paradelo Marcos, et al. Effects of biochar on air and water permeability and colloid and phosphorus leaching in soils from a natural calcium carbonate gradient[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(2):647-657.