

菜地土壤镉的表层淋洗-深层固化联合修复研究

杨子予, 杨志敏, 陈玉成, 陈庆华

引用本文:

杨子予, 杨志敏, 陈玉成, 等. 菜地土壤镉的表层淋洗-深层固化联合修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 275-281.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0869>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

模拟酸雨对羟基磷灰石稳定化土壤镉的分布、可浸出性及生物可给性的影响

崔红标, 马凯强, 范玉超, 苏彬彬, 胡友彪, 周静

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1286-1293 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.009>

柠檬酸强化低浓度EDTA对成都平原农田土壤铅和镉的淋洗效率

姚苹, 郭欣, 王亚婷, 钟钦梅, 张世熔, 何玉亭

农业环境科学学报. 2018, 37(3): 448-455 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1086>

鼠李糖脂淋洗修复重金属污染土壤的工艺条件优化研究

李尤, 廖晓勇, 阎秀兰, 龚雪刚

农业环境科学学报. 2015(7): 1287-1292 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.009>

螯合剂和鼠李糖脂联合淋洗污染土壤中Cd

陈冬月, 施秋伶, 张进忠, 刘江, 钱盛

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2334-2344 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0873>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨子予, 杨志敏, 陈玉成, 等. 菜地土壤镉的表层淋洗-深层固化联合修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 275–281.

YANG Zi-yu, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, et al. Remediation of cadmium contaminated vegetable field via surface leaching-deep solidification combined technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 275–281.

菜地土壤镉的表层淋洗-深层固化联合修复研究

杨子予^{1,2}, 杨志敏^{1,2*}, 陈玉成^{1,2}, 陈庆华^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 农村清洁工程重庆市工程研究中心, 重庆市生态环境农用地土壤污染风险管控重点实验室, 重庆 400716)

摘要:为探究表层淋洗-深层固化联合修复技术对重庆郊区菜地土壤及蔬菜镉(Cd)污染的修复效果, 采用大田试验, 研究了酒石酸表层淋洗-HAP深层固化和水表层淋洗-HAP深层固化处理对莴笋产量、品质及Cd的吸收和土壤全Cd及有效Cd含量的影响, 并与传统修复剂腐植酸和HAP进行比较。结果表明, 酒石酸淋洗-HAP固化使莴笋茎叶中的Cd含量显著降低22.89%、莴笋产量显著提高16.89%, 且对莴笋的品质有促进作用。同时, 酒石酸淋洗-HAP固化处理使0~20 cm表层土壤的全Cd含量降低30.71%, 40~60 cm深层土壤的全Cd含量增加51.57%, 在两种表层淋洗-深层固化处理下, 土壤中有有效Cd含量均在0~20 cm土层减少, 20~40 cm土层略微增加, 40~60 cm土层明显降低, 在60~80 cm土层与对照接近。莴笋茎叶和根部的Cd含量与土壤有效Cd呈显著正相关, 与土壤有机质呈显著负相关。表层淋洗-深层固化联合修复能够在进行土壤Cd污染修复的同时实现蔬菜的安全生产, 适宜向轻度污染的蔬菜基地推广使用。

关键词: Cd污染; 土壤; 淋洗-固化联合修复; 莴笋

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)02-0275-07 doi:10.11654/jaes.2019-0869

Remediation of cadmium contaminated vegetable field via surface leaching-deep solidification combined technology

YANG Zi-yu^{1,2}, YANG Zhi-min^{1,2*}, CHEN Yu-cheng^{1,2}, CHEN Qing-hua^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Engineering Research Center of Rural Cleaner Production / Key Laboratory of Agricultural Soil Pollution Risk Management and Control for Ecological Environment in Chongqing, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to study the effect of surface leaching-deep solidification combined technology on the remediation of cadmium-polluted soil and cadmium content in vegetables in Chongqing suburbs, field experiments were conducted to investigate the effects of tartaric acid surface leaching-hydroxyapatite (HAP) deep solidification and water surface leaching-HAP deep solidification treatments on lettuce yield, quality, cadmium uptake, soil total cadmium, and available cadmium content. The results were compared with those of treatment by traditional repair agents such as humic acid and HAP. The final results showed that tartaric acid leaching-HAP solidification could significantly reduce the cadmium content in lettuce stems and leaves by 22.89%; furthermore, the lettuce yield significantly increases by 16.89% accompanied with the quality promotion. Meanwhile, the total cadmium content of the surface soil of 0~20 cm was reduced by 30.71%, while the total cadmium content of the deep soil of 40~60 cm increased by 51.57%. Under these two kinds of surface leaching-deep solidification treatments, the available cadmium content in soil at depths of 0~20 cm decreased, then slightly increased at depths of 20~40 cm, followed by a significant decline in the 40~60 cm soil layer. When the soil depth reaches 60~80 cm, the available cadmium content was closer in value to the control group. The cadmium content in the stems, leaves, and roots of the lettuce showed a positive correlation with the soil available cadmium, while it was negatively correlated with the soil organic matter. Surface leaching-deep solidification combined remediation

收稿日期: 2019-08-06 录用日期: 2019-11-04

作者简介: 杨子予(1995—), 女, 四川邛崃人, 硕士研究生, 研究方向为土壤污染修复。E-mail: 769866640@qq.com

*通信作者: 杨志敏 E-mail: bear@swu.edu.cn

基金项目: 国家科技重大专项(2017YFD0801004)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017YFD0801004)

tion can, therefore, realize the safe production of vegetables while remediating cadmium polluted soil, which is suitable for production and remediation at lightly polluted vegetable bases.

Keywords: Cd pollution; soil; leaching-stabilization combined remediation; lettuce

菜地土壤重金属污染通常程度较轻,且因与食物链息息相关而较为敏感,因此宜选用对土壤扰动较小的原位淋洗、原位固化、植物提取等方式进行修复^[1-4]。但淋洗可能对地下水造成二次污染,原位固化后被固定在土壤表层的重金属可能因为环境的改变再度释放,超积累植物的适应性差也可能造成修复效果不理想^[5-8]。李燕燕^[9]发现酒石酸淋洗-硫化钠固化修复组合能有效降低表层土壤 Pb、Cd 含量,并将 Pb、Cd 固定在了深层土壤中;另外,卫泽斌等^[10]也发现用混合试剂对耕作层污染土壤进行淋洗,能够降低耕作层土壤重金属含量,且淋洗出的重金属可以被碱性 FeCl₃处理的深层土壤固定,固定的重金属很少被后期的降水等再淋洗出来,能够实现重金属污染土壤的修复和安全利用。本研究选用原位表层淋洗-深层固化联合修复技术,即将表层土壤重金属活化后淋洗至深层进行固化,降低农作物对重金属的吸收利用,以保证农产品质量安全,同时阻止重金属继续向下层土壤和地下水迁移,为农田土壤 Cd 污染修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

田间试验于 2018 年 3—7 月在重庆郊区菜地进行。试验区地处中亚热带湿润季风气候区,年均温 18.0 ℃;年均降雨量 1 164.7 mm;年均日照时数 1 051.0 h。土壤基本性质见表 1,呈现轻度 Cd 污染。

蔬菜作物为茎用莴笋(*Lactuca sativa* Linn.),由当地农技中心提供。

表层淋洗材料为酒石酸,购自成都市科龙化工试剂厂,深层固化材料为羟基磷灰石(Hydroxyapatite,

HAP),购自武汉远成共创科技有限公司;表层钝化材料为羟基磷灰石和腐植酸,腐植酸由碱提取制备,其成分为胡敏酸,有机质含量为 34.475 g·kg⁻¹,由重庆市万植巨丰生态肥业有限公司提供。

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理、1 个对照(表 2)。每个处理 3 个重复,重复间以 80 cm 宽、40 cm 深的主沟间隔,各处理间采用 50 cm 宽、40 cm 深的次沟间隔,周边保护行宽 100 cm。共设置试验小区 15 个,每个小区为 6.5 m×5 m=32.5 m²,统一编号并随机排列(图 1)。根据前人的研究^[9, 11-13]和之前试验的结果,钝化剂腐植酸和 HAP 的用量在 1~3 g·kg⁻¹ 范围内效果较好,于是按土壤密度 1.3 g·cm⁻³ 折算成小区单位面积表层 20 cm 土壤的用量(表 2)。

1.3 试验方法

处理 T3、T4 的小区中每隔 50 cm 挖宽度为 50 cm、深度为 60 cm 的沟,将羟基磷灰石施入沟底,随后用原土回填。T4 处理将淋洗剂溶于自来水中,T3 处理则用等量的自来水,3 d 后均匀喷淋在相应小区表层土壤,一季蔬菜喷淋一次。其余处理所使用的试剂均匀铺撒在小区表面后用旋耕机搅匀,使试剂与 0~20 cm 表层土壤充分混合。施入试剂 10 d 后,移栽等量的莴笋幼苗,种植量为 15 行×15 列,共 225 株,所选

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Properties of studied soils

指标 Indicators	pH pH value	全镉 Total Cd/ mg·kg ⁻¹	有效镉 Avaialbe Cd/ mg·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹
数值 Numerical value	7.15	0.538	0.245	34.157

表 2 试验设计

Table 2 Treatment methods and dosage of remediation materials

处理 Treatments	修复方式 Repair methods	表层 Surface(0~20 cm)		深层 Deep(50~60 cm)	
		施用试剂 Reagent	施用量 Dosage/t·hm ⁻²	施用试剂 Reagent	施用量 Dosage/t·hm ⁻²
CK	无	无	0	无	0
T1	腐植酸钝化	腐植酸	3.78	无	0
T2	HAP 钝化	HAP	5.63	无	0
T3	水淋洗-HAP 固化	水	1.26	HAP	5.08
T4	酒石酸淋洗-HAP 固化	酒石酸	1.26	HAP	5.08

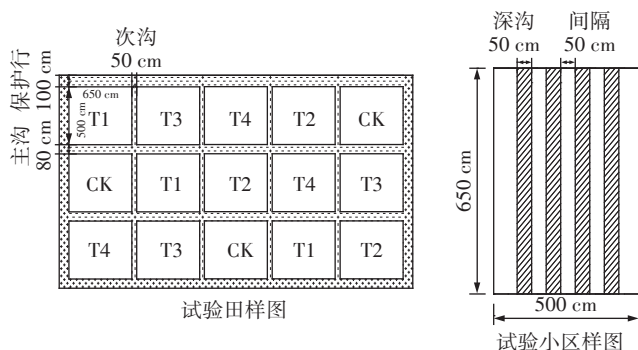


图1 田间试验设计图

Figure 1 Design of field experiment

植株为长势大致相同的莴笋幼苗。其他田间操作遵循当地农户习惯,3个月后收获莴笋,对每个小区进行测产,同时在各小区内以“五点采样法”采集表层土壤样品,并随机采集10株莴笋样品。

1.4 分析测试

土壤样:pH采用PB-10型pH测试仪检测,有机质含量采用重铬酸钾氧化容量法检测^[14];全Cd采用王水-HClO₄法消解^[14],AAS测定;有效Cd采用DTPA浸提^[15],AAS测定。

植物样:Cd采用HNO₃-HClO₄法消解^[14],AAS测定。维生素C采用2,6-二氯酚滴定法^[16];还原糖采用3,5-二硝基水杨酸显色-分光光度法^[16];游离氨基酸采用茚三酮显色-分光光度法^[16]。

分析过程以土壤成分分析标准物质GBW07428(GSS-14)、土壤有效态标准物质GBW07460(ASA-9)、植株标准物质(GBW 08513)和加标回收方式对试验进行质量控制。土壤样品Cd回收率为94.7%~103.8%、植株样品Cd回收率为96.7%~103.2%。

1.5 数据分析

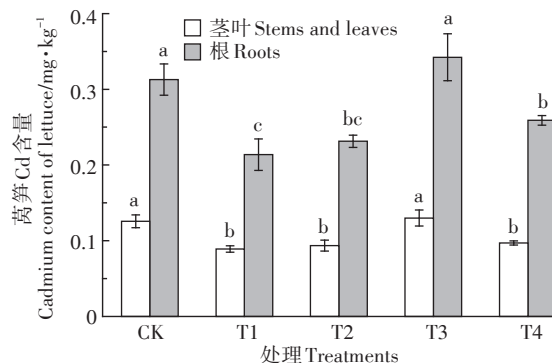
所有数据均采用Microsoft Excel 2010和SPSS 19.0进行图形统计分析,不同字母表示差异具有统计学意义($P < 0.05$),采用OriginPro 8.5作图。

2 结果与讨论

2.1 表层淋洗-深层固化对莴笋的影响

2.1.1 对莴笋降Cd的影响

除T3以外,T1、T2和T4均能不同程度地降低莴笋茎叶和根部的Cd含量(图2);其中茎叶部分的降幅为22.89%~28.98%、根部的降幅为17.21%~31.68%,与CK相比差异显著($P < 0.05$);CK处理下莴笋茎叶的Cd含量超过了《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中茎类蔬菜Cd的限量指标(0.1



小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P < 0.05$). The same below

图2 不同处理对莴笋Cd含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on Cd content of lettuce

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),而T1、T2和T4处理下莴笋茎叶的Cd含量均低于该标准,其原因可能是T4处理施用酒石酸淋洗降低了耕作层土壤的全Cd含量,淋洗效果优于T3处理的水淋洗;T1和T2的钝化处理影响了土壤基本理化性质,进而降低了莴笋茎叶的Cd含量。

2.1.2 对莴笋产量的影响

当Cd在植物体内积累到一定程度时,植物就会表现出生长迟缓、植株矮小等毒害症状,最终降低作物产量和品质^[17],向土壤中添加修复剂可降低Cd向植物的迁移及对植物的毒害,并且对一些营养元素有活化作用,从而促进植物的生长发育^[18-19]。除了T3以外,其余处理较CK均不同程度地提高了莴笋产量(鲜样)($P < 0.05$),升幅为12.47%~22.87%(图3),其中T2对莴笋产量的提高效果最佳,说明在Cd污染土壤中施加HAP可以有效促进植物生长,增加作物的产量,该结果与冯佳蓓^[20]和宋勇等^[21]的研究结果一致。

2.1.3 对莴笋品质的影响

T4能使莴笋维生素C的含量显著升高7.81%($P < 0.05$)(表3)。莴笋还原糖的含量在T4处理下的升幅

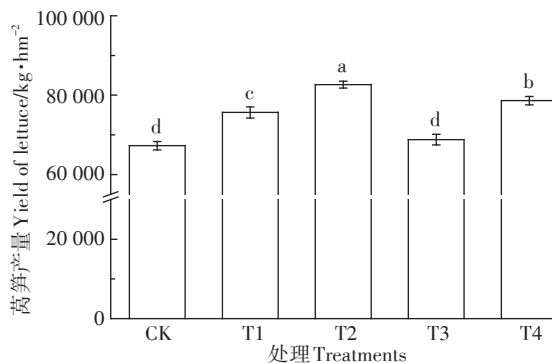


图3 不同处理对莴笋产量的影响

Figure 3 Effect of different treatments on yield of lettuce

表3 不同处理对莴笋品质的影响

Table 3 Effect of different treatments on quality of lettuce

处理 Treatments	维生素C Vitamin C/(mg·kg ⁻¹)	还原糖 Reducing sugar/%	氨基酸 Amino acid/(mg·kg ⁻¹)
CK	460.67±15.18b	0.80±0.06c	696.67±27.47b
T1	431.67±24.68c	0.91±0.01b	745.33±60.28ab
T2	425.33±6.51c	0.66±0.02d	746±27.51ab
T3	435±19.47bc	0.96±0.03b	616.67±49.50c
T4	496.67±2.52a	1.30±0.01a	805.33±43.01a

达到62.81% ($P<0.05$),但在T2处理下显著降低,降幅为17.09%,该结果与南丽君^[22]的研究结果有所差异,可能是因为磷酸盐能够吸附络合金属阳离子,对土壤中的钾、铁、锌、锰等营养元素也造成一定的吸附作用。而对于莴笋氨基酸的含量来说,除了T3以外,其余处理均使莴笋的氨基酸含量升高,其中T4的提升效果最好,升幅为15.60% ($P<0.05$)。有机酸对土壤中大量的难溶性养分具有一定的螯合增溶效果,可以提高难溶性磷酸盐及微量元素在土壤中的有效性^[23],有利于植物对这些营养物质的吸收和利用,增加叶绿素的含量,提高植物的光合速率,进而提高莴笋的品质。

2.2 表层淋洗-深层固化修复对土壤的影响

2.2.1 对Cd纵向迁移的影响

与CK相比(图4),T4使0~20 cm和20~40 cm土层的全Cd含量降低30.71%和21.29%,且与水淋洗相比,酒石酸淋洗使0~20 cm和20~40 cm土层的全Cd含量多降低28.60%和19.95%,说明酒石酸的淋洗可以使上层土壤中的Cd向下层土壤迁移,这主要是因为酒石酸所带的配位体羟基(-OH)和羧基(-COOH)易与土壤中Cd²⁺发生络合反应形成可溶性复合物^[24],提高了Cd在土壤剖面的流动性。而T3与CK相比,0~20 cm和20~40 cm土层的全Cd含量降低2.95%和1.76%,说明加大灌溉水量对Cd向下迁移有一定的促进作用。T3、T4均使40~60 cm土层全Cd含量增大,且60~80 cm土层与40~60 cm土层相比,土层全Cd含量分别降低23.31%和32.99%,表明HAP对土壤中向下迁移的Cd有固定效果。其中在T4处理下深层(40~60 cm)土壤全Cd含量的增加效果更突出,达到51.57%。随着土层深度增加,T3、T4使60~80 cm土层中全Cd含量与CK接近,说明淋洗处理可降低耕作层土壤全Cd含量,而60 cm处的HAP也对下渗的含Cd淋洗液有较好的拦截效果,防止其污染地下水。

T3、T4处理下,土壤中有效Cd含量随着土层深

度的增加呈现出在0~20 cm土层降低,20~40 cm土层略微增加,40~60 cm土层明显降低,最后在60~80 cm土层与CK接近的趋势。与CK相比,两种淋洗-深层固化处理使40~60 cm土层有效Cd含量降低了19.29%和22.83%,说明HAP对Cd在土壤中继续向下迁移有一定的阻碍作用,其原因是HAP可以在土壤溶液中水解释放PO₄³⁻,诱导土壤中的重金属形成稳定的磷酸盐沉淀^[25],或者Cd²⁺首先吸附在HAP的表面,然后通过离子交换作用,Cd²⁺取代HAP上面的Ca²⁺,与HAP共沉淀形成稳定的复合物^[26],因此能够有效控制上层淋洗液对深层土壤的扰动。用酒石酸对耕作层污染土壤进行淋洗,能够降低耕作层土壤Cd的含量,淋出的重金属可以被HAP固定在深层土壤中,且较难进一步向下迁移,从而能降低对地下水环境污染的风险。

2.2.2 对表层土壤Cd的影响

本试验所种植莴笋的耕作层基本在0~20 cm,因此重点分析了0~20 cm表层土壤的Cd含量变化。与CK相比(图5),除了T4使土壤耕作层(0~20 cm)全Cd含量显著降低28.33% ($P<0.05$)外,其余处理下土壤全Cd含量的差异均不显著($P>0.05$),这可能是因为腐植酸和HAP修复Cd的主要机理是通过络合作用和沉淀作用改变土壤中Cd的赋存形态,降低其迁移转化能力和生物有效性^[27-28],但对Cd的总量去除效果并不显著;水淋洗只能带走部分可交换态Cd,而酒石酸可使表层土壤中Cd溶解并迁移,且夏季降雨量较大,加快了Cd的迁移速率,从而降低了表层土壤Cd总量。

除T3以外,其余处理均能不同程度地降低土壤有效Cd含量,降幅为15.61%~28.24%,与CK相比差异显著($P<0.05$),其中T2和T1处理对有效Cd含量降低效果较好,该结果与王云丽^[29]和李仪等^[30]的研究结果一致。羟基磷灰石除了能够提高土壤pH值以外,还可以通过表面点位吸附和离子交换降低Cd的有效性^[31],使其生物可利用性下降。腐植酸富含羧基和酚羟基等活性官能团,很容易吸附在土壤胶体表面,使土壤颗粒物上增加新的吸附位点^[32],从而吸附可溶态的重金属生成难溶有机络合物,同时腐植酸对土壤有机质有较好的提升效果,而有机质能够改善土壤团粒结构,调节土壤pH值,促进土壤微生物活动并增加酶活性^[33],从而降低可溶态重金属含量,减少碳酸盐结合态、氧化物结合态重金属的含量,增加重金属的有机结合态和残渣态含量。

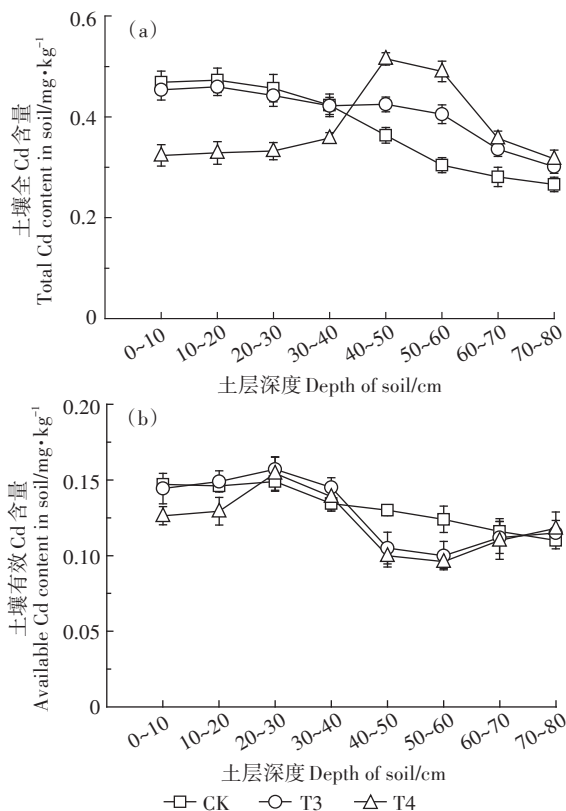


图4 不同处理对剖面土层中Cd含量的影响

Figure 4 Effect of different treatments on the content of Cd in profile soil layer

2.2.3 对土壤pH值与有机质的影响

图6表示不同处理下土壤pH值与有机质含量。图6a表明,与CK相比,T2显著提高了土壤pH值($P < 0.05$),提升量为1.35个pH单位,而两种表层淋洗-固化处理对土壤pH值没有显著影响。

图6b表明,与CK相比,除T3对土壤有机质的影响无显著差异以外($P > 0.05$),其余处理均使土壤有机质含量显著升高($P < 0.05$),其中T1对提升土壤有机质的效果最佳,升幅达到52.10%。其造成土壤有机质含量变化的原因可能有两点,一是所使用的腐植酸中有机质含量较高,二是腐植酸含有羧基、酚羟基、甲氧基、羰基等活性官能团^[34],故而施入土壤后可促进土壤微生物的活性,改善土壤的团粒结构和提高肥力。

2.3 Cd含量相关性分析

土壤有效Cd含量与莴笋Cd含量间的相关关系如表4所示。茎叶Cd、根Cd含量与土壤有效Cd含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与土壤有机质呈极显著负相关($P < 0.01$),而土壤全Cd含量与莴笋Cd含量并无显著的相关性,说明有效态Cd更容易被植物根系吸

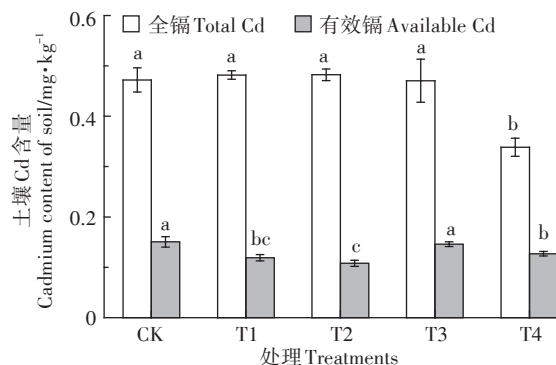


图5 不同处理对表层土壤全Cd及有效Cd含量的影响

Figure 5 Effects of different treatments on total Cd and available Cd content in surface soil

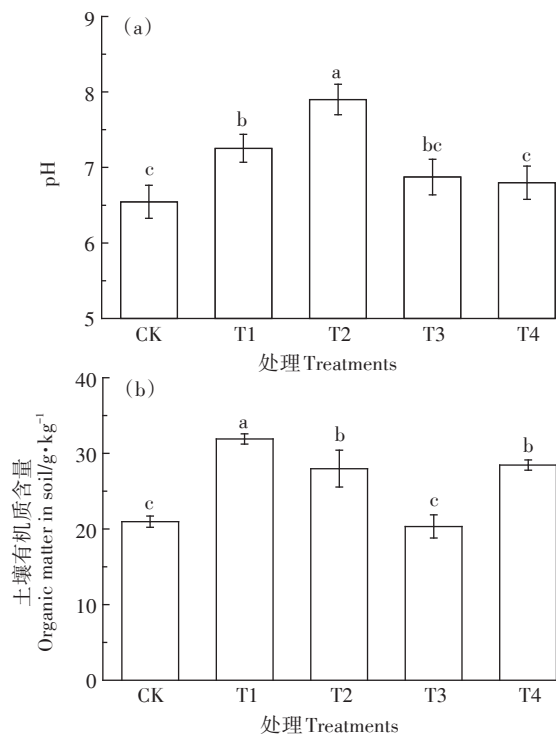


图6 不同处理土壤pH及土壤有机质含量的影响

Figure 6 Effects of different treatments on soil pH and soil organic matter content

收。而土壤有效Cd与土壤pH和有机质含量呈极显著负相关($P < 0.01$),说明施用修复剂可通过提高土壤pH值和有机质的含量降低土壤中有效Cd的含量,有效阻止了Cd向莴笋迁移,进而降低莴笋富集的Cd含量。因此,腐植酸可以通过提高土壤有机质含量,使其与土壤溶液中的Cd²⁺经有机络合反应减少莴笋对Cd的积累;而HAP显著提高了土壤pH,进而经化学沉淀反应降低土壤溶液中的Cd²⁺含量,同时施加HAP能够通过表面位点吸附和离子交换降低Cd的有效性,阻碍莴笋根系对Cd的吸收,最终减少莴笋中Cd的积累。

表4 土壤pH、有机质、Cd含量和莴笋Cd含量间的相关系数(r)
Table 4 Correlation coefficient(r) among the pH, organic matter, Cd contents in soil and Cd concentration in lettuce

指标 Indicator	pH	土壤有机质 Organic matter	土壤全Cd Total Cd	土壤有效Cd Available Cd	莴笋茎叶Cd Cd in stems and leaves	莴笋根Cd Cd in roots
pH	1					
土壤有机质 Organic matter	0.482	1				
土壤全Cd Total Cd	0.279	-0.182	1			
土壤有效Cd Available Cd	-0.814**	-0.781**	0.03	1		
莴笋茎叶Cd Cd in stems and leaves	-0.526*	-0.845**	0.135	0.786**	1	
莴笋根Cd Cd in roots	0.555*	-0.877**	-0.007	0.824**	0.907**	1

注: *在 0.05 水平(双侧)上显著相关, **在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结论

(1)酒石酸淋洗-HAP固化处理使莴笋茎叶的Cd含量显著降低22.89%,莴笋产量提升16.89%,且对提升莴笋品质的效果较好,而腐植酸和HAP处理使莴笋根部Cd的含量显著降低31.68%和26.01%。

(2)酒石酸淋洗-HAP固化处理使0~20 cm和20~40 cm土层的全Cd含量降低30.71%和21.29%,40~60 cm土层的全Cd含量增加51.57%,有效降低耕作层土壤全Cd的同时也对下渗的含Cd淋洗液有较好的拦截效果。

(3)HAP使土壤pH显著提升了1.35个pH单位,而两种表层淋洗-固化处理对土壤pH没有显著影响。除了水淋洗-固化处理对土壤有机质的影响无显著差异以外,其余处理均使土壤有机质含量显著升高,其中腐植酸对提升土壤有机质的效果最佳,升幅达到52.10%。

参考文献:

- [1] 胡红青, 黄益宗, 黄巧云, 等. 农田土壤重金属污染化学钝化修复研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1676-1685.
HU Hong-qing, HUANG Yi-zong, HUANG Qiao-yun, et al. Research progress of heavy metals chemical immobilization in farm land[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1676-1685.
- [2] 赵纪新, 尹鹏程, 岳 荣, 等. 我国农田土壤重金属污染现状·来源及修复技术研究综述[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(4): 19-21, 26.
ZHAO Ji-xin, YIN Peng-cheng, YUE Rong, et al. Research progress of status, source, restoration technique of heavy metals pollution in cropland of China[J]. *J Anhui Agric Sci*, 2018, 46(4): 19-21, 26.
- [3] 崔俊义, 马友华, 王陈丝丝, 等. 农田土壤镉污染原位钝化修复技术的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(30): 79-83.
CUI Jun-yi, MA You-hua, WANG Chen-sisi, et al. Farmland soil cadmium pollution of in situ passivation remediation technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(30): 79-83.
- [4] 陈亮妹, 马友华, 王陈丝丝, 等. 不同污染程度农田土壤重金属修复技术研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(32): 94-99.
CHEN Liang-mei, MA You-hua, WANG Chen-sisi, et al. Remediation technology against heavy metal pollution in farmland soil with dif-

- ferent pollution levels[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(32): 94-99.
- [5] 刘梦丽, 蒋 明, 李 博, 等. 农田土壤镉污染钝化修复研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(2): 350-359.
LIU Meng-li, JIANG Ming, LI Bo, et al. Research advances on the immobilization remediation of farmland soil cadmium pollution[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2018, 33(2): 350-359.
- [6] 李 婧, 周艳文, 陈 森, 等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(24): 104-107.
LI Jing, ZHOU Yan-wei, CHEN Sen, et al. Actualities, Damage and management of soil cadmium pollution in China[J]. *Anhui Agri Sci Bull*, 2015, 21(24): 104-107.
- [7] 刘亚培. Cd、Pb重度污染农田土壤化学淋洗及淋洗污水处理的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 6-9.
LIU Ya-pei. The study of chemical washing remediation of cadmium and lead contaminated farmland soils and the disposal of leaching wastewater[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015: 6-9.
- [8] 李 栋, 孙午阳, 谷庆宝, 等. 植物修复及重金属在植物体内形态分析综述[J]. 环境污染与防治, 2017(11): 95-102.
LI Dong, SUN Wu-yang, GU Qing-bao, et al. Review on the research progress in phytoremediation and speciation of heavy metals in plants[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017(11): 95-102.
- [9] 李燕燕. 菜地土壤铅镉污染的原位淋洗-固化修复研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015: 39-55.
LI Yan-yan. Research on in-situ remediation of Pb, Cd contaminated by leaching-immobilization in vegetable soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2015: 39-55.
- [10] 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂. 化学淋洗和深层土壤固定联合技术修复重金属污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 407-408.
WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, et al. Remediation of heavy metals contaminated soils by combined technology of chemical washing and fixation in deep soil layer[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2010, 29(2): 407-408.
- [11] 刘晓婷. 不同土壤改良剂对芹菜镉积累及生理特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011: 9-14.
LIU Xiao-ting. Effects of different soil modifiers on the cadmium accumulation and physiological features of celery[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011: 9-14.
- [12] 邓华健, 肖广全, 陈玉成, 等. 重庆市郊稻米Cd风险的原位钝化削减[J]. 环境工程学报, 2018, 12(12): 134-141.
DENG Hua-jian, XIAO Guang-quan, CHEN Yu-cheng, et al. In-si-

- tu passivation in Cd polluted paddy fields of Chongqing suburb for rice healthy control[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(12):134-141.
- [13] 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):1759-1761.
DING Yong-zhen, SONG Zheng-guo, TANG Shi-rong, et al. Effect and mechanism of different passivating agents on cadmium absorption in water spinach under field conditions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(11):1759-1761.
- [14] 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.
LU Ru-kun. Soil agrochemistry analysis protocols[M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 2000.
- [15] 孙鸣镝. AB-DTPA 浸提土壤多元素的适用性分析及其测定四种土壤污染元素环境质量标准初探[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
SUN Ming-di. AB-DTPA extraction of soil elements adaptability analysis and determination of four soil pollution elements environmental quality standards in preliminary exploration[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI He-sheng. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [17] Hasan S A, Fariduddin Q, Ali B, et al. Cadmium: Toxicity and tolerance in plants[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2013, 11(3):229-254.
- [18] Sun Y, Wu Q T, Lee C C C, et al. Cadmium sorption characteristics of soil amendments and its relationship with the cadmium uptake by hyperaccumulator and normal plants in amended soils[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2014, 16(5):496-508.
- [19] Cui L, Pan G, Li L, et al. Continuous immobilization of cadmium and lead in biochar amended contaminated paddy soil: A five-year field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 93:1-8.
- [20] 冯佳蓓. 纳米羟基磷灰石对重金属污染农用土壤的修复研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015:44-46.
FENG Jia-bei. Research on heavy metal polluted agricultural soil remediation by nano-hydroxyapatite[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015:44-46.
- [21] 宋勇, 何谈, 刘明月, 等. 羟基磷灰石对Cd污染土壤中马铃薯生长及品质的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(9):2241-2242.
SONG Yong, HE Tan, LIU Ming-yue, et al. Effects of hydroxyapatite on growth and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Cd polluted soil[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(9):2241-2242.
- [22] 南丽君. 不同改良剂对土壤中Cd生物有效性及微生物群落的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017:27-40.
NAN Li-jun. Effects of different amendments on cadmium bioavailability and microbial community in soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017:27-40.
- [23] 苏小娟. 有机酸和含磷物质对土壤铅的固定效果及其机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015:19-48.
SU Xiao-juan. Effect and mechanism of immobilization lead contaminated soil by phosphates with/without or acids[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015:19-48.
- [24] 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.
- [25] Cui H, Zhou J, Zhao Q, et al. Fractions of Cu, Cd, and enzyme activities in a contaminated soil as affected by applications of micro- and nanohydroxyapatite[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(4):742-752.
- [26] 邢金峰, 仓龙, 葛礼强, 等. 纳米羟基磷灰石钝化修复重金属污染土壤的稳定性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7):1271-1277.
XING Jin-feng, CANG Long, GE Li-qiang, et al. Long-term stability of immobilizing remediation of a heavy metal contaminated soil with nano-hydroxyapatite[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2016, 35(7):1271-1277.
- [27] 黄占斌, 李昉泽. 土壤重金属固化稳定化的环境材料研究进展[J]. *中国材料进展*, 2017(36):842-843.
HUANG Zhan-bin, LI Fang-ze. Research progress of environmental materials on solidification and stabilization of heavy metals in soil[J]. *Materials China*, 2017(36):842-843.
- [28] 何茂. 磷酸盐固定重金属污染土壤中Pb和Cd的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013:10-11, 18-19.
HE Mao. Phosphate fixed heavy metal contaminated soil Pb and Cd [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013:10-11, 18-19.
- [29] 王云丽. 钝化剂筛选及其对设施菜地镉污染土壤钝化效果研究[D]. 保定: 河北大学, 2018:17-27.
WANG Yun-li. Passivation agent screening and its effect on passivation of cadmium contaminated soil in vegetable fields[D]. Baoding: Hebei University, 2018:17-27.
- [30] 李仪, 罗绪强. 纳米羟基磷灰石对铅镉污染土壤重金属生物可给性的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(7):1257-1260.
LI Yi, LUO Xu-qiang. Effects of nano-hydroxyapatite on the bioaccessibility of heavy metals in soils polluted by Pb and Cd[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(7):1257-1260.
- [31] 陆中桂, 黄占斌, 李昂, 等. 腐植酸对重金属铅镉的吸附特征[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(9):3722-3728.
LU Zhong-gui, HUANG Zhan-bin, LI Ang, et al. The adsorption behavior of lead and cadmium by humic acid[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(9):3722-3728.
- [32] 单瑞娟, 黄占斌, 柯超, 等. 腐植酸对土壤重金属镉的淋溶效果及吸附解吸机制研究[J]. *腐植酸*, 2015(1):12-14.
SHAN Rui-juan, HUANG Zhan-bin, KE Chao, et al. Study on humic acid for leaching effect of cadmium in soil and its adsorption-desorption mechanism[J]. *Humic Acid*, 2015(1):12-14.
- [33] Alvarenga P, Goncalves A P, Fernandes R M, et al. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effects on soil chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(10):1301-1308.
- [34] Yeung A T, Gu Y Y. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 195:11-29.