



**生物炭-硅酸钙联合修复铅镉污染土壤的持续性效应**

苏梦贤, 张磊, 周小平, 寇萌, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰

引用本文:

苏梦贤,张磊,周小平,寇萌,熊娟,汪明霞,谭文峰. 生物炭-硅酸钙联合修复铅镉污染土壤的持续性效应[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 473-481.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0123>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

**钝化剂种类和粒径对复合污染土壤镉铅有效态的影响**

袁启慧, 包立, 张乃明

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 192-197 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0121>

**河北省蔬菜大棚土壤及蔬菜中重金属累积分析**

孙硕, 李菊梅, 马义兵, 赵会薇

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 236-244 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0163>

**红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤Cd的能力**

涂鹏飞, 谭可夫, 陈磷涵, 杨洋, 袁婧, 陈奕暄, 杨耀东, 曾清如

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 609-614 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0065>

**小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响**

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119-126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>

**长期施用污泥对土壤-萝卜系统重金属积累及土壤养分含量的影响**

董文, 张青, 王煌平, 罗涛

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 647-654 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0449>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

苏梦贤, 张磊, 周小平, 等. 生物炭-硅酸钙联合修复铅镉污染土壤的持续性效应[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 473-481.  
SU M X, ZHANG L, ZHOU X P, et al. Remediation of lead-cadmium contaminated soil via continuous effect of combined biochar and calcium silicate[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(2): 473-481.



开放科学 OSID

# 生物炭-硅酸钙联合修复铅镉污染土壤的持续性效应

苏梦贤, 张磊, 周小平, 寇萌, 熊娟, 汪明霞\*, 谭文峰

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

**摘要:**为探究棕榈生物炭与硅酸钙联合施用对 Pb-Cd 复合重金属污染土壤的钝化效果及其稳定性,本研究采用蔬菜种植盆栽实验,测定土壤溶液 pH 和 Pb、Cd 浓度以及蔬菜可食部分 Pb、Cd 含量。结果表明:与不添加钝化剂的对照组相比,添加钝化剂能够有效提高土壤溶液 pH,使土壤溶液中 Pb、Cd 浓度显著降低,种植小白菜可食部分 Pb 含量下降 62.20%~96.77%、Cd 含量下降 92.76% 以上,多数处理符合国家食品安全标准。土壤种植适宜性研究结果表明,五种供试蔬菜可食部分重金属含量与富集系数规律一致,小白菜对 Pb 的富集能力最强,苋菜对 Cd 的富集能力最强。当土壤 Pb<500 mg·kg<sup>-1</sup> 时,韭菜、苋菜、甘蓝和大白菜四种蔬菜均可种植;当土壤 Cd>0.6 mg·kg<sup>-1</sup>、Pb>500 mg·kg<sup>-1</sup> 时,不适宜种植上述五种蔬菜。本研究探明了钝化剂的持续修复效果,研究结果可为土壤修复提及中低污染风险地区的适宜蔬菜种植提供技术和数据支撑。

**关键词:**土壤复合污染;铅;镉;棕榈生物炭;硅酸钙

中图分类号:TQ421;X53 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2024)02-0473-09 doi: 10.13254/j.jare.2023.0123

## Remediation of lead-cadmium contaminated soil via continuous effect of combined biochar and calcium silicate

SU Mengxian, ZHANG Lei, ZHOU Xiaoping, KOU Meng, XIONG Juan, WANG Mingxia\*, TAN Wenfeng

(College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** This study evaluated the remediation effect and stability of palm biochar combined with calcium silicate on lead-cadmium (Pb-Cd) co-contaminated soil, by determining the pH, Pb content, and Cd content in soil solution and edible parts of vegetables in pot experiments. The results demonstrated that compared with the control, addition of a passivation agent could effectively increase the pH value, and substantially reduced the Pb and Cd content in soil solution, and in the edible part of Chinese cabbage by 62.20%–96.77% and 92.76%, respectively. Most of the Pb and Cd contents in the edible part met the National Food Safety Standards (GB 2762—2022) after soil remediation. The results of planting suitability analysis revealed that there were consistent trends of heavy metal concentration in the edible parts and enrichment coefficients of the five tested vegetables. Chinese cabbage and amaranth had the strongest accumulation ability for Pb and Cd, respectively. Soil with Pb<500 mg·kg<sup>-1</sup>, was more suitable for planting Chinese chives, amaranth, cabbage, and Chinese cabbage; whereas soil with Cd>0.6 mg·kg<sup>-1</sup> and/or Pb>500 mg·kg<sup>-1</sup>, was not suitable for planting any of the five vegetables. This study proves that the continuous remediation effect of the passivator provides technical reference for soil remediation, as well as suggestions for suitable vegetable planting in low-medium pollution risk areas.

**Keywords:** multi-metal contaminated soil; lead; cadmium; palm biochar; calcium silicate

土壤是人类赖以生存的自然基础,随着经济的快速发展,我国土壤重金属环境污染问题日益加剧,据

《全国土壤污染状况调查公报》显示,截至2014年,我国土壤总超标率达到了16.1%,耕地土壤点位超标率

收稿日期:2023-03-02 录用日期:2023-05-30

作者简介:苏梦贤(1999—),女,湖北荆门人,硕士研究生,从事土壤重金属污染及其修复研究。E-mail:sumengxian0108@163.com

\*通信作者:汪明霞 E-mail:wangmx@mail.hzau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(42277299,41877030);湖北省自然科学基金项目(2020CFA013)

**Project supported:** The National Natural Science Foundation of China (42277299, 41877030); Natural Science Foundation of Hubei Province (2020CFA013)

达到19.4%。采矿、冶炼、污水灌溉等人为活动,以及地质高背景值等自然过程常常使土壤同时暴露于多种重金属污染中,导致土壤重金属复合污染<sup>[1]</sup>。土壤重金属污染具有隐蔽性、累积性、滞后性和不可逆性,重金属浓度过高不仅会影响作物生长,还会通过食物链富集最终危害人体健康<sup>[2-3]</sup>。

常见土壤重金属污染修复方法有物理修复、化学修复、生物修复以及联合修复等,其中物理修复工程措施成本较高,植物修复周期过长,微生物修复技术尚不成熟,目前实际应用最多的方法是化学钝化修复技术<sup>[4]</sup>。化学钝化修复技术是向土壤中施加钝化剂,通过吸附、沉淀、络合、离子交换和氧化还原等过程来降低土壤中重金属的生物有效性和迁移性<sup>[5]</sup>。生物炭作为成本低廉、环境友好、稳定性强且修复效果较好的常用钝化材料,目前已被广泛应用于土壤修复中<sup>[6]</sup>。袁兴超等<sup>[7]</sup>的盆栽试验表明施用生物炭、石灰对土壤镉(Cd)、铅(Pb)钝化率可达45.3%和60.6%,可使玉米籽粒中Cd、Pb含量降低85%、59.6%。沈章军等<sup>[8]</sup>大田试验表明六种不同钝化材料均能显著降低矿区复合重金属污染土壤中Pb、Cd有效态含量,并抑制油菜对重金属的吸收。此外,添加纳米羟基磷灰石:疏基化膨润土:生物炭(1:2:2)组配钝化剂可降低小白菜对Pb、Cd的富集转运<sup>[9]</sup>。生物炭与海泡石、腐植酸复配施用能够提高土壤有机质含量,增加菠菜生物量,降低其可食部分Cd含量<sup>[10]</sup>。研究表明,高碱性生物炭与具有增强石灰效应的材料联合施用可提高钝化剂同步修复多种重金属污染土壤的能力<sup>[11]</sup>。研究表明,叶菜类蔬菜对重金属的富集能力更强,因此可通过种植叶菜类蔬菜来验证钝化剂修复效果,并且针对不同污染程度的土壤,种植不同富集系数的蔬菜<sup>[12-14]</sup>。在菌渣生物炭修复Cd污染土壤研究中,修复后小白菜可食部分Cd含量显著降低57.5%<sup>[15]</sup>。施用5~50 g·kg<sup>-1</sup>木炭能够改良土壤并抑制小白菜对Cd的吸收,使小白菜地上部分Cd含量降低5.05%~20.57%<sup>[16]</sup>。周小平<sup>[17]</sup>以棕榈生物炭(B)、硅酸钙(CS)、磷酸二氢钾(PPM)三种钝化剂为探究对象,设置四种不同钝化剂复配方式,以0.4%与2%两种添加量进行盆栽验证,结果表明B+CS对污染土壤的钝化效果最

好;0.4% B+CS使土壤溶液pH提升0.51个单位,土壤溶液Pb、Cd浓度分别降低了71.83%、52.02%;2% B+CS能够使土壤溶液pH提升3.28个单位,土壤溶液Pb、Cd浓度分别降低了98.67%、95.21%,且种植的小白菜可食部分Pb、Cd含量最低。由此可见,不同类型钝化剂对土壤重金属的修复效果不同,且同种重金属对于不同作物的生物有效性也存在差异。吴迪等<sup>[18]</sup>进一步对钝化剂的施用量进行了探究,结果表明1%磷酸二氢钾、钙镁磷肥等均能较好地修复Cd污染土壤,但其并未考虑修复效果的持续性。

本研究选用农田土壤金属筛选值作为试验设计参考浓度,设置了较大范围的Pb、Cd含量以确保研究结果在实际环境中的可行性。因此本研究选用2%的棕榈生物炭与硅酸钙复配钝化剂,通过种植多茬小白菜探究复配钝化剂对Pb、Cd复合污染土壤的修复效果及其稳定性。此外,在小白菜盆栽种植试验中发现,尽管钝化剂的修复效果较好,但中度污染的土壤中仍无法安全种植小白菜,因此对其进行适宜蔬菜的筛选,为中、低重金属复合污染风险地区的适宜性蔬菜种植提供技术支持与数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试土壤为棕红壤,采自湖北省咸宁市(29.93°N, 114.41°E),采集耕层0~20 cm土壤,自然风干后过2 mm筛储存备用,供试土壤理化性质如表1所示。试验所用棕榈生物炭购自北京北方永邦科技股份有限公司,热解温度为400~500 °C, pH值为9.74, C含量为61.12%,比表面积为20~80 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, Pb含量低于30 mg·kg<sup>-1</sup>, Cd含量低于2 mg·kg<sup>-1</sup>。

试验试剂有硅酸钙、磷酸铅、硝酸镉、硝酸、盐酸、氢氟酸、氯化钾、磷酸二氢钙和尿素,均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。试验用水为超纯水,电导率小于2.0 μS·cm<sup>-1</sup>,由超纯水仪(ATY-1001-U, 艾科浦)制备。供试小白菜品种为美宝快菜,品种属性为结球白菜,购自广州市伟兴农业科技有限公司;韭菜品种为香韭菜,苋菜品种为全红苋菜,购自南京金盛达种子有限公司;甘蓝品种为京丰一号,购自邢

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the test soil

pH	有机质 OM/(g·kg <sup>-1</sup> )	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P/(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K/(g·kg <sup>-1</sup> )	全镉 Total Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全铅 Total Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )
5.37	29.84	9.81	1.81	0.39	9.58	0.14	25.54

台双环种业公司;大白菜品种为早熟5号,购自温州神鹿种业公司。

## 1.2 试验设计

试验设置 0.3、0.6、3  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  三个 Cd 浓度,设置 125、250、500  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  三个 Pb 浓度,共设置(0,0)、(0,125)、(0.3,0)、(0.3,125)、(0.3,250)、(0.6,125)、(0.6,250)、(3,500)八组复合处理,其土壤实测 Cd、Pb 总量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )分别为(0.15,23.70)、(0.14,143.61)、(0.50,22.68)、(0.52,144.06)、(0.51,277.66)、(0.72,156.28)、(0.71,284.84)、(3.73,558.61);设置(0,0)、(0.3,0)、(0.3,125)、(0.3,250)四组未加钝化剂的空白对照。使用分析纯  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  和  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  作为外源添加 Cd、Pb 原材料,以溶液的形式均匀加入供试土壤中,保持土壤含水率为田间持水量的 80%,老化 3 个月。将老化后土壤分别装入规格为 20  $\text{cm}\times 14\text{ cm}$  (直径 $\times$ 高)的塑料盆中,每盆 1.5  $\text{kg}$ ,加入 2% 的棕榈生物炭和硅酸钙(质量比 1:1)作为钝化剂与土壤混合均匀,每组三个重复。种植小白菜前两周以尿素、过磷酸钙、氯化钾为肥料向土壤中施入 N、P、K 肥,折合元素施肥量  $\omega(\text{N})$  为 0.15  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\omega(\text{P}_2\text{O}_5)$  为 0.05  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\omega(\text{K}_2\text{O})$  为 0.10  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

分别于 2020 年 10 月、2021 年 3 月种植两茬小白菜,实验地点为华中农业大学资源与环境学院校内试

验基地温室。室内温度控制在 15~25  $^{\circ}\text{C}$ 。将小白菜种子用 30~40  $^{\circ}\text{C}$  温水清洗 3 遍后置于湿润的纱布上,定时补充水分,于 25  $^{\circ}\text{C}$  下避光催芽 48 h,待种子露白后进行播种,每盆播种 15 颗。种子发芽后使用紫外补光灯每日光照 12 h,待小白菜长出 4 片完整叶片后进行间苗,连根拔起长势较差或不完整的小白菜幼苗,最终每盆保留 4 株幼苗。试验过程中采用质量法保持土壤含水率为田间持水量的 80%,使用土壤溶液采样器(RHIZON MOM, 10  $\text{cm}$ , 荷兰)每周取一次土壤溶液,待测,30 d 后收获成熟的小白菜,测定其生物量(图 1),随后经洗净、烘干、消解等处理后测定小白菜地上部分 Pb、Cd 含量并计算富集系数。

在土壤蔬菜种植适宜性筛选试验中,选择苋菜、韭菜、甘蓝、大白菜四种常见蔬菜进行种植,其中韭菜种植三茬,每 20 d 收获一次地上部分,大白菜种植 60 d 后收获,甘蓝种植 90 d。具体种植过程同小白菜。

## 1.3 样品测定

土壤溶液 pH 值与重金属含量:土壤溶液 pH 值采用 pH 计(PB-10, 德国)测定,将土壤溶液采样器采集的溶液过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜后用石墨炉原子分光光度计(Agilent AA 240Z, 美国)测定土壤溶液 Pb、Cd 浓度(GB/T 17141—1997)。

作物 Pb、Cd 含量:蔬菜样品用超纯水洗净后置于



图1 小白菜生长状况图

Figure 1 Growth chart of Chinese cabbage

烘箱中 105 °C 杀青 30 min, 60 °C 烘箱烘干一周至恒质量, 称量干质量。粉碎后称取 0.200 g 样品, 用 10 mL 硝酸-过氧化氢(4:1, V/V) 进行微波消解后测量溶液 Pb、Cd 浓度, 测定方法同土壤溶液中重金属测定。

### 1.4 数据处理

本研究通过计算富集系数(Bioconcentration Factors, BCF)来衡量作物对重金属吸收能力的差异。

富集系数=地上部重金属浓度(mg·kg<sup>-1</sup>)/土壤重金属浓度(mg·kg<sup>-1</sup>)

原始数据用 Excel 进行初步分析, 采用 Origin 2018 进行数据统计和制图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 小白菜生物量

未添加钝化剂的处理中, 小白菜生长状况较差, 生长缓慢、叶片枯黄甚至死亡(图 1)。四组空白对照(CK)中小白菜地上部鲜质量分别为(4.021±0.703)、(3.901±0.730)、(5.009±1.310)、(2.337±0.138) g·盆<sup>-1</sup>, 小白菜鲜质量随 Pb 浓度增加呈降低趋势, 主要原因是外源污染物的加入使土壤 pH 降低, 重金属 Pb 对作物产生毒性影响。添加钝化剂后小白菜整体生长状况良好, (0, 0)、(0.3, 0)、(0.3, 125)、(0.3, 250) 四组 B+CS 处理中小白菜地上部鲜质量分别为(21.981±3.408)、(24.500±1.511)、(24.514±1.783)、(18.414±1.507) g·盆<sup>-1</sup>, 约为对照组的 4.8~7.8 倍。其他棕榈生物炭和硅酸钙(B+CS)处理中小白菜鲜质量随重金属增加而降低, (0, 125)、(0.6, 125)、(0.6, 250)、(3, 500) 四组处理小白菜鲜质量分别为(28.133±1.478)、(16.350±3.392)、(10.803±1.766)、(8.620±1.336) g·盆<sup>-1</sup>。

### 2.2 土壤溶液 pH 变化

土壤 pH 值是评价钝化剂修复效果的重要指标, 图 2 为两次种植小白菜期间土壤溶液 pH 值的变化。由图 2A 可知, 对照组 pH 为 3.60~4.02, 添加钝化剂的处理组 pH 为 6.75~7.00, 较对照组提升了约 2.98~3.33 个单位, 其他 B+CS 处理土壤溶液 pH 均在 6.82 以上。第一次种植期间土壤溶液 pH 多呈现先上升后下降的变化趋势, 原因是施肥后尿素在土壤微生物的作用下发生水解反应产生 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 使 pH 小幅上升, 后又经硝化反应释放质子导致 pH 下降<sup>[19]</sup>。各处理土壤在第一次种植前后土壤溶液 pH 变化较小, 变幅均在 0.03~0.36 个单位范围内。由图 2B 可知, 第二次种植后, 对照组土壤溶液 pH 较第一次种植后上升 0.42~0.76 个单位, 添加钝化剂的八个处理种植前后 pH 差异在 0.01~0.19 个单位范围内波动, 但与对照组相比仍高出 2.1~3.5 个单位。以上研究结果表明棕榈生物炭和硅酸钙复合钝化剂能够有效、稳定地提升土壤 pH, 对土壤溶液 pH 具有一定的缓冲作用。这是由于棕榈生物炭本身 pH 值较高, 且硅酸钙进入土壤后会水解生成 OH<sup>-</sup>, 提高土壤 pH 值。此外, 硅酸钙能够与土壤中的 Al<sup>3+</sup> 反应生成稳定的羟基硅酸盐, 缓解 Al<sup>3+</sup> 水解作用, 从而间接提高土壤 pH<sup>[20]</sup>。

### 2.3 土壤溶液 Pb、Cd 浓度变化

图 3 为两次种植期间土壤溶液 Pb、Cd 浓度变化。第一次种植期间, 对照组四个处理土壤溶液中 Pb 浓度分别为 17.70~22.96、26.53~107.51、171.34~465.67、2 485.67~4 081.00 μg·L<sup>-1</sup>, 而添加钝化剂后 Pb 浓度仅为 3.84~8.02 μg·L<sup>-1</sup>, 与对照组相比下降了 80.37%~99.83%。其他 B+CS 处理经修复后除(3, 500) 处理中

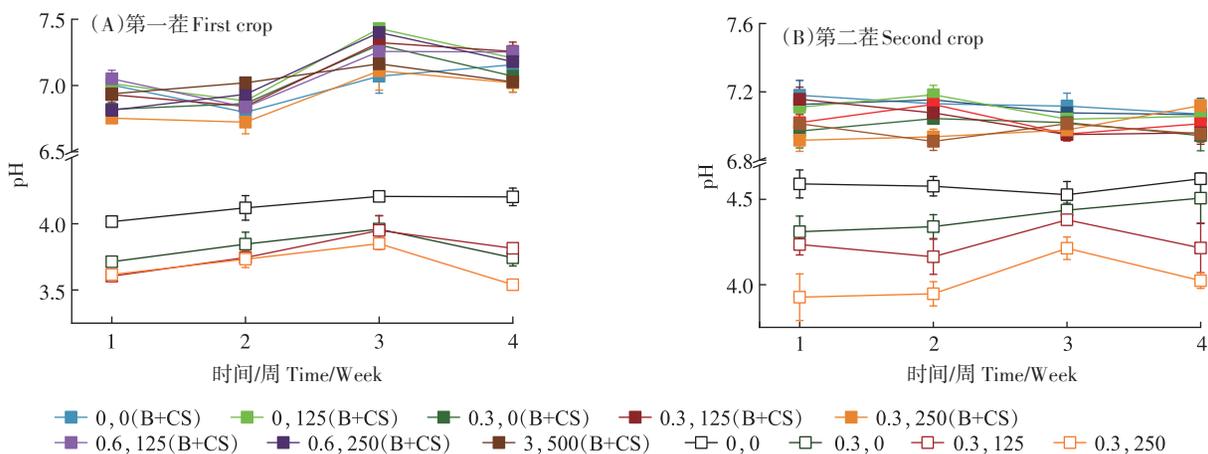


图 2 两次种植土壤溶液 pH 值变化

Figure 2 Change in pH of soil solution during the crop growth

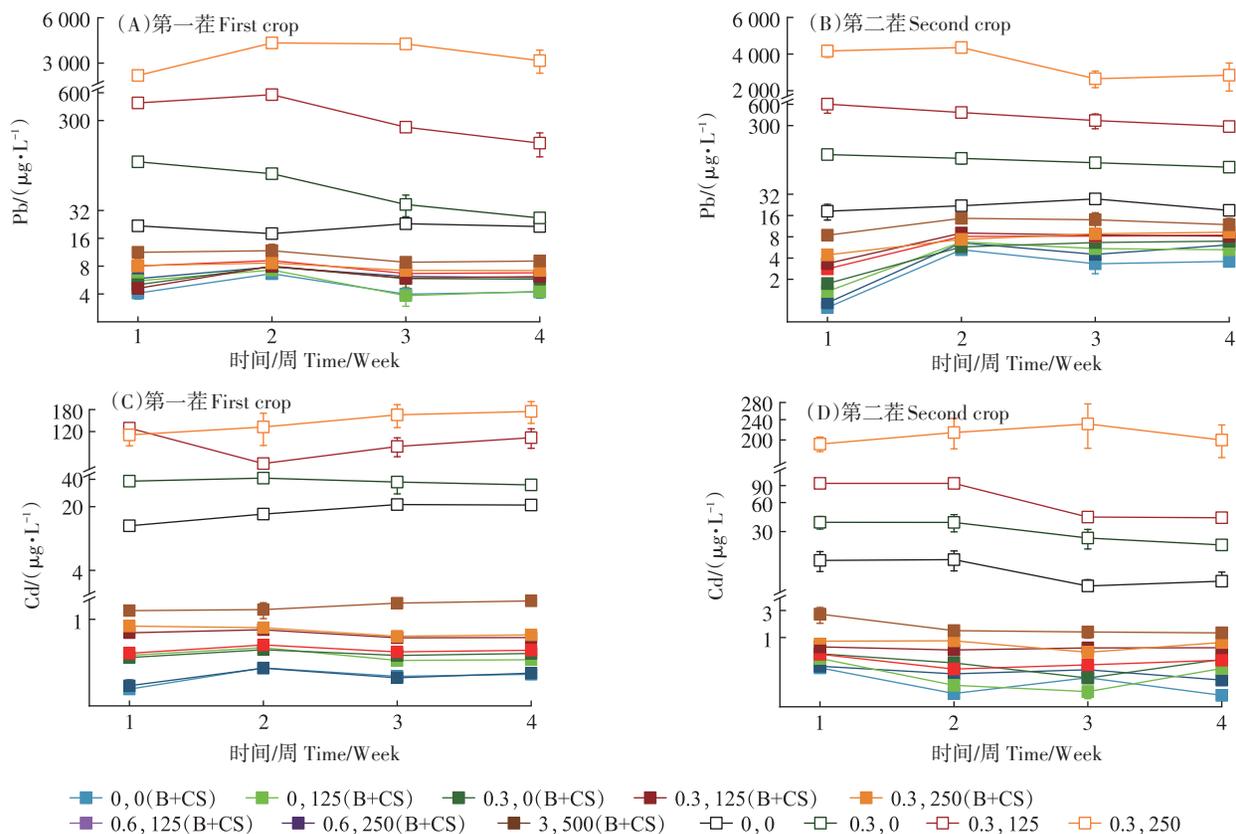


图3 两次种植土壤溶液Pb、Cd浓度变化

Figure 3 Lead/cadmium(Pb/Cd) concentration change in soil solution during the crop growth

土壤溶液Pb浓度达到 $11.76 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 外,均降低至 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。其原因可能是在pH较低时,土壤中大量的 $\text{H}^+$ 易与重金属离子竞争生物炭和土壤活性吸附位点,经钝化剂修复后土壤溶液pH增加, $\text{H}^+$ 浓度降低,竞争作用减弱,更多重金属离子会被生物炭和土壤所吸附<sup>[21]</sup>;在高pH时土壤活性颗粒表面吸附位点与重金属阳离子亲和力更强<sup>[22]</sup>,且土壤中 $\text{OH}^-$ 增加更易与重金属结合生成难溶性沉淀从而被固定<sup>[23]</sup>。添加钝化剂处理经两次种植后,土壤溶液Pb浓度为 $3.58\sim 11.87 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,较对照组减少了81.04%~99.93%。这表明棕榈生物炭和硅酸钙复合钝化剂能够稳定、持续降低Pb的有效性。

图3C和图3D描述了两次种植期间土壤溶液Cd浓度。(0.3,0)、(0.3,125)、(0.3,250)三个对照处理中,第一次种植土壤溶液中Cd随着外源添加Pb浓度的增加由 $37.52 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $155.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,这可能与土壤中Pb、Cd发生的竞争吸附作用相关。土壤中Pb浓度的增加减弱了其对Cd的吸附,从而提高了Cd的生物有效性<sup>[24]</sup>。经钝化剂修复后,除(3,500)处理中土壤溶液Cd浓度为 $1.2\sim 4.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 外,其他处理均降

至 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,(0,0)、(0.3,0)、(0.3,125)、(0.3,250)处理较对照降低98.06%以上。第二次种植时,对照组土壤溶液pH较第一次种植结束时升高0.57~0.61个pH单位,因此(0,0)、(0.3,0)、(0.3,125)对照组土壤溶液Cd浓度较第一次种植均有所降低,分别为 $8.14\sim 15.04$ 、 $15.68\sim 37.39$ 、 $41.78\sim 94.92 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。经修复的土壤在第二次种植期间土壤溶液Cd浓度变化范围仅为 $0.02\sim 0.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,除(3,500)处理土壤溶液Cd浓度为 $1.21\sim 2.58 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 外,其他处理仍低于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,钝化剂的持续修复效果在98.06%以上。

袁启慧等<sup>[25]</sup>通过探究不同种类的钝化剂对重金属复合污染土壤中有效态Pb、Cd的钝化效果,发现硅藻土对有效态Cd的降低效率为22.35%,磷矿粉对有效态Pb的降低效率为22.19%。而本研究中钝化剂能够使土壤有效态Pb含量降低81.04%以上,对土壤有效态Cd含量钝化效果高达98.06%,表明棕榈生物炭和硅酸钙联用对Pb、Cd复合污染土壤的修复效果更为显著。

#### 2.4 小白菜可食部分Pb、Cd含量

表2为两次种植收获的小白菜可食用部分Pb、

表2 不同浓度Pb-Cd复合污染土壤两茬小白菜地上部Pb、Cd含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Pb/Cd content in Chinese cabbage shoot under different concentrations of lead-cadmium (Pb-Cd) contaminated soil(mg·kg<sup>-1</sup>)

重金属 Heavy metal	处理 Treatment	CK地上部浓度 CK Aboveground concentration		B+CS地上部浓度 B+CS Aboveground concentration	
		第一茬 First crop	第二茬 Second crop	第一茬 First crop	第二茬 Second crop
Pb	(0,0)	0.290±0.024c	0.220±0.183c	0.065±0.015b	0.035±0.011b
	(0,125)	—	—	0.091±0.012b	0.069±0.021b
	(0.3,0)	0.325±0.053c	0.428±0.036c	0.123±0.012b	0.137±0.015b
	(0.3,125)	4.153±0.370b	4.949±0.369b	0.198±0.042b	0.228±0.014b
	(0.3,250)	11.292±4.840a	7.570±0.481a	0.365±0.064b	0.392±0.022b
	(0.6,125)	—	—	0.286±0.037b	0.262±0.053b
	(0.6,250)	—	—	0.635±0.073b	0.520±0.011b
	(3,500)	—	—	1.714±0.261a	0.846±0.079a
	Cd	(0,0)	0.388±0.051c	0.205±0.028c	0.021±0.001b
(0,125)		—	—	0.026±0.002b	0.035±0.004b
(0.3,0)		1.634±0.309b	1.205±0.098b	0.077±0.016b	0.104±0.013b
(0.3,125)		1.464±0.283b	1.000±0.003b	0.106±0.012b	0.087±0.014b
(0.3,250)		2.407±0.242a	2.174±0.195a	0.106±0.012b	0.110±0.015b
(0.6,125)		—	—	0.149±0.021b	0.109±0.002b
(0.6,250)		—	—	0.170±0.014b	0.163±0.017b
(3,500)		—	—	0.542±0.009a	0.812±0.035a

注：“—”表示未设置该浓度处理,无测量数据。同列不同小写字母表示在P<0.05水平下显著差异。下同。

Note: “—” indicates no measurement data is available; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at the P<0.05 level. The same below.

Cd含量。四个对照处理中第一茬小白菜可食部分Pb含量分别为(0.290±0.024)、(0.325±0.053)、(4.153±0.370)、(11.292±4.840) mg·kg<sup>-1</sup>,除(0,0)处理外均超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)限值0.3 mg·kg<sup>-1</sup>。经修复后四组处理小白菜可食部分Pb含量分别为(0.065±0.015)、(0.123±0.012)、(0.198±0.042)、(0.365±0.064) mg·kg<sup>-1</sup>,较对照组下降了62.20%~96.77%,且(0,0)、(0.3,0)、(0.3,125)三组处理可食部分均降至0.3 mg·kg<sup>-1</sup>以下。此外,Pb浓度为125 mg·kg<sup>-1</sup>时,小白菜可食部分Pb含量随Cd浓度的增加由(0.091±0.012) mg·kg<sup>-1</sup>增加至(0.286±0.037) mg·kg<sup>-1</sup>。第二次种植结果与第一次相似,修复后除(0.3,250)、(0.6,250)、(3,500)三个处理小白菜可食部分Pb含量仍超标外,其他处理均符合国家食品安全标准。

小白菜可食部分Cd含量与Pb含量变化相似,未添加钝化剂的四个对照处理中,第一茬小白菜可食部分Cd含量分别为(0.388±0.051)、(1.634±0.309)、(1.464±0.283)、(2.407±0.242) mg·kg<sup>-1</sup>,均超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)限值0.2 mg·kg<sup>-1</sup>,第二茬小白菜可食部分Cd含量略低于第一茬,但仍超标。经修复后四组处理中小白菜

可食部分Cd含量分别为(0.021±0.001)、(0.077±0.016)、(0.106±0.012)、(0.106±0.012) mg·kg<sup>-1</sup>,较对照下降92.76%以上,均符合食品安全国家标准要求。除(3,500)处理土壤中两次种植小白菜可食部分Cd含量分别为(0.542±0.009)、(0.812±0.035) mg·kg<sup>-1</sup>外,添加钝化剂的其他处理小白菜Cd含量均降至0.2 mg·kg<sup>-1</sup>以下。以上结果表明钝化剂能够显著降低小白菜可食部分Pb、Cd含量,经修复后的土壤大多能够安全种植小白菜。

本研究选用的棕榈生物炭和硅酸钙的修复性能较好,两次种植对小白菜可食部分的Pb降低效率达到62.20%~96.77%,Cd降低效率在92.76%以上,远高于海泡石与骨炭粉联用对上海青可食部分Cd含量降低效率(53.19%)<sup>[26]</sup>和0.2%质量分数下生物炭、海泡石、腐植酸复配钝化剂对小白菜可食部分Cd的降低效率(8.97%)<sup>[10]</sup>。杜彩艳等<sup>[27]</sup>以硅藻土、沸石粉等钝化剂修复土壤重金属,结果表明经修复后种植的玉米籽粒中Cd含量降低了82.63%~89.17%,Pb含量降低了9.64%~46.86%,其对Pb、Cd的降低效率均接近但略低于本研究中钝化剂的修复效果。棕榈生物炭和硅酸钙复配的钝化剂对土壤Pb、Cd的修复效果略好于部分其他复配的钝化剂,在前期钝化剂筛选试验

中,经修复的小白菜地上部Pb、Cd含量分别为0.027~1.256、0.029~1.605 mg·kg<sup>-1</sup>,除(0.6, 250)、(3, 500)处理外其他处理小白菜可食部分Pb、Cd含量均达标<sup>[7]</sup>,与本研究的结果相似。这表明棕桐生物炭和硅酸钙的联用对重金属污染土壤修复至少能够在两次种植期间保持稳定,保证蔬菜的生产安全。

### 2.5 蔬菜种植适宜性

钝化剂能够降低小白菜可食部分对Pb、Cd的吸收,但植物对重金属吸收累积能力不同,因此本研究探究了中、低浓度复合污染土壤种植蔬菜的适宜性。图4为(0.3, 250)、(0.6, 250)、(3, 500)三个处理土壤种植四种蔬菜的可食部分Pb和Cd含量。由图4A可知,四种蔬菜的可食部分Pb含量均未超标。韭菜可食部分重金属含量随着收获次数的增加而提高,但三茬韭菜Pb浓度均符合食品安全国家标准。四种蔬菜对Pb吸收存在差异,当土壤Pb浓度由250 mg·kg<sup>-1</sup>增至500 mg·kg<sup>-1</sup>时,三茬韭菜可食部分Pb含量分别由0.016、0.034、0.045 mg·kg<sup>-1</sup>增至0.047、0.095、0.230 mg·kg<sup>-1</sup>;大白菜可食部分Pb含量也由0.056 mg·kg<sup>-1</sup>增至0.165 mg·kg<sup>-1</sup>,均提高了两倍以上;而苋菜和甘蓝Pb含量变化并不显著,在土壤Pb浓度倍增时,苋菜和甘蓝可食部分Pb含量仅提高了0.02 mg·kg<sup>-1</sup>,增幅约10%~20%。

图4B为四种蔬菜可食部分Cd含量,土壤Cd为0.3、0.6、3 mg·kg<sup>-1</sup>时,四种蔬菜分别有不同程度的超标,当土壤Cd为0.3 mg·kg<sup>-1</sup>时,苋菜可食部分Cd含

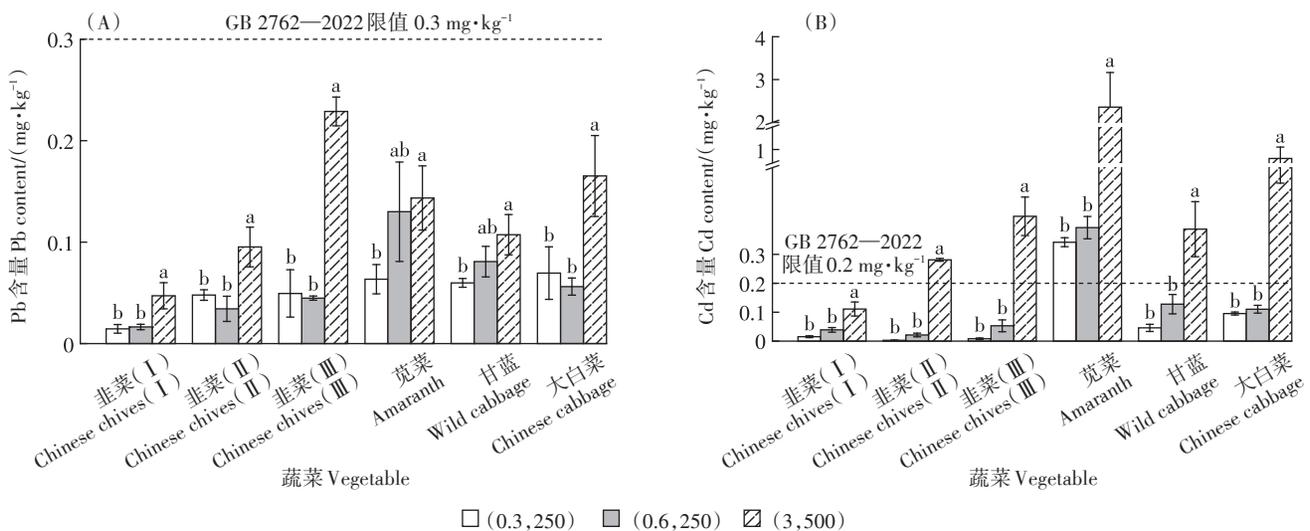
量已达到0.34 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤中Cd为3 mg·kg<sup>-1</sup>时,除第一茬韭菜可食部分Cd含量低于0.2 mg·kg<sup>-1</sup>外,其他处理可食部分Cd含量均超标。苋菜对Cd的吸收能力最强,Cd为3 mg·kg<sup>-1</sup>时,苋菜可食部分Cd含量高达2.35 mg·kg<sup>-1</sup>。由上述结果可知,土壤中Pb<500 mg·kg<sup>-1</sup>时,可以种植韭菜、苋菜、甘蓝、大白菜;而土壤Cd>0.6 mg·kg<sup>-1</sup>时,不适宜种植上述四种叶菜类蔬菜。

表3为五种蔬菜对Pb、Cd的富集系数。与以往研究相似,五种蔬菜对Pb的富集系数均远小于

表3 五种蔬菜Pb、Cd富集系数

Table 3 The BCF of lead/cadmium (Pb/Cd) in different vegetables

重金属 Heavy metal	蔬菜 Vegetable	处理 Treatment (0.3, 250)	处理 Treatment (0.6, 250)	处理 Treatment (3, 500)
Pb (×10 <sup>-3</sup> )	小白菜	1.00±0.20a	2.00±0.03a	3.00±0.50a
	第一茬韭菜	0.05±0.02a	0.17±0.02b	0.09±0.05b
	第二茬韭菜	0.06±0.01a	0.12±0.04b	0.08±0.04b
	第三茬韭菜	0.17±0.05a	0.33±0.07ab	0.41±0.03b
	苋菜	0.23±0.04a	0.46±0.14ab	0.26±0.05b
	甘蓝	0.22±0.01a	0.28±0.05b	0.19±0.03b
Cd	小白菜	0.241±0.019a	0.220±0.019a	0.173±0.013a
	第一茬韭菜	0.003±0.007a	0.055±0.014a	0.030±0.012a
	第二茬韭菜	0.006±0.002a	0.030±0.015a	0.075±0.004a
	第三茬韭菜	0.016±0.006a	0.075±0.033a	0.116±0.018a
	苋菜	0.671±0.003a	0.553±0.044a	0.632±0.177a
	甘蓝	0.090±0.020a	0.180±0.038a	0.104±0.021a
大白菜	0.187±0.008a	0.155±0.015a	0.215±0.056a	



(I)、(II)、(III)分别表示韭菜第一茬、第二茬、第三茬。不同小写字母表示在P<0.05水平下显著差异。  
(I),(II), and (III) respectively represent the first, second and third crop of Chinese chives. Different lowercase letters indicate significant differences at the P<0.05 level.

图4 中低浓度污染土壤种植四种蔬菜可食部分Pb、Cd含量

Figure 4 Content of lead(Pb) and cadmium(Cd) in edible parts of four vegetables planted in medium and low polluted soil

Cd<sup>[28-29]</sup>。五种蔬菜的富集规律与其可食部分含量规律基本一致,小白菜对Pb的富集系数最高,并随着Pb浓度的增加从0.001增至0.003。韭菜对Pb的富集系数随着污染浓度升高以及收割次数的增加而增加。由表3可知,在Pb浓度相同时(250 mg·kg<sup>-1</sup>),蔬菜对Pb的富集系数大多随着Cd浓度增加而提高,其中小白菜、苋菜的增幅最大。对Pb的富集系数由高到低为小白菜>大白菜>苋菜>甘蓝>韭菜。苋菜对Cd的富集系数最高,达到0.671;韭菜对Cd的富集系数最低,为0.003。与Pb的富集规律相似,蔬菜对Cd的富集系数随着Cd浓度的增加而增加,此外,韭菜对Cd的富集系数也随着种植次数的增加而增加。五种蔬菜Cd的富集系数由高到低依次为苋菜>小白菜>大白菜>甘蓝>韭菜。

## 2.6 修复成本核算

修复地区土壤按照耕层20 cm深度计算,土壤密度以1.2 g·cm<sup>-3</sup>计算,每亩(667 m<sup>2</sup>)地约为160 t土壤,所需修复剂质量分数为2%,则每亩地需要1.6 t生物炭、1.6 t硅酸钙。棕榈丝的市场价格为500元·t<sup>-1</sup>,生产1 t棕榈生物炭需要约2.4 t棕榈丝,折算后棕榈生物炭的制备成本约为1 200元·t<sup>-1</sup>,每亩地需1 920元;工业级硅酸钙价格为1 000元·t<sup>-1</sup>,每亩地修复成本约为2 920元。前期的钝化剂筛选试验结果表明,在土壤重金属浓度较低(Cd<3 mg·kg<sup>-1</sup>, Pb<500 mg·kg<sup>-1</sup>)时,质量分数为1%的棕榈生物炭和硅酸钙混合修复剂能够较好地修复污染土壤<sup>[8]</sup>,因此在实际施用过程中,可根据土壤污染状况选择适宜的钝化剂用量,以降低修复成本。

## 3 结论

(1)棕榈生物炭与硅酸钙复合钝化剂能够使土壤溶液pH显著提高2.1~3.5个单位,对土壤溶液Pb、Cd的降低效率分别在80.37%、98.06%以上,且在两次种植期间变化幅度较小,具有一定的稳定性。

(2)经钝化剂修复后土壤种植的小白菜生物量显著增加,约为对照组的4.8~7.8倍,小白菜可食部分Pb、Cd含量分别降低了62.20%~96.77%和92.76%以上;除Cd、Pb浓度(mg·kg<sup>-1</sup>)为(0.3, 250)、(0.6, 250)、(3, 500)的处理外,其他处理小白菜可食部分均符合食品安全国家标准。

(3)蔬菜对Cd的富集能力远远强于Pb,当土壤Pb<500 mg·kg<sup>-1</sup>时,可安全种植韭菜、苋菜、甘蓝和大白菜;当土壤Cd>0.6 mg·kg<sup>-1</sup>、Pb>500 mg·kg<sup>-1</sup>时,不适合

种植小白菜、韭菜、苋菜、甘蓝、大白菜五种蔬菜。

(4)经核算,在Cd含量3~4 mg·kg<sup>-1</sup>、Pb含量500~600 mg·kg<sup>-1</sup>复合污染土壤中使用质量分数为2%的棕榈生物炭-硅酸钙联合钝化剂进行修复,每亩地修复成本约为2 920元,在应用时可根据农田实际污染程度选用合适剂量钝化剂进行修复。

## 参考文献:

- [1] 苏辉跃,王璐,钱欢,等.武清区典型蔬菜种植区土壤重金属的风险评估和空间分布特征[J].农业资源与环境学报,2021,38(6):1122-1131. SU H Y, WANG L, QIAN H, et al. Risk assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soil of typical vegetable planting areas in Wuqing[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(6): 1122-1131.
- [2] ZHAN J, ZHANG Q P, LI T X, et al. Effects of NTA on Pb phytostabilization efficiency of *Athyrium wardii* (Hook.) grown in a Pb-contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(10): 3576-3584.
- [3] 瞿飞,范成五,刘桂华,等.钝化剂修复重金属污染土壤研究进展[J].山西农业科学,2017,45(9):1561-1565. QU F, FAN C W, LIU G H, et al. Research progress on remediation of heavy metal contaminated soils with different kinds of passivation agents[J]. *Research Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(9): 1561-1565.
- [4] 韩云昌,张乃明.施用钝化剂对土壤重金属污染修复的研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(10):52-56. HAN Y C, ZHANG N M. Research progress of applying passivating agent to remediation of heavy metal pollution in soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(10): 52-56.
- [5] 华子添,张素玲,张栋,等.生物质炭的制备及其在吸附方面的研究进展[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2021,41(1):69-75. HUA Z L, ZHANG S L, ZHANG D, et al. Preparation method of biochar and its application for pollutants adsorption: a review[J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences)*, 2021, 41(1): 69-75.
- [6] 黄晓雅,李莲芳,朱昌雄.生物炭老化对土壤重金属的固定效应研究进展[J].农业资源与环境学报,2022,39(1):157-164. HUANG X Y, LI L F, ZHU C X. Research progress on the fixation effect of biochar aging on heavy metals in soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 157-164.
- [7] 袁兴超,李博,朱仁凤,等.不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J].农业环境科学学报,2019,38(4):807-817. YUAN X C, LI B, ZHU R F, et al. Immobilization of Cd and Pb using different amendments of cultivated soils around lead-zinc mines[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 807-817.
- [8] 沈章军,侯万青,徐德聪,等.不同钝化剂对重金属在土壤-油菜中迁移的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(12):2779-2788. SHEN Z J, HOU W Q, XU D C, et al. Effects of different immobilization materials on heavy metal migration in contaminated soil-rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2779-2788.
- [9] 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 D, DING A F. 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.
- [10] 杨侨, 赵龙, 孙在金, 等. 复合钝化剂对污灌区镉污染农田土壤的钝化效果研究[J]. *应用化工*, 2017, 46(6):1037-1041. YANG Q, ZHAO L, SUN Z J, et al. Study on passivation effects of multi-passivators on the cadmium(Cd) contaminated soils in sewage irrigation area[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(6):1037-1041.
- [11] 罗唯叶, 朱靖宜, 陈涛, 等. 生物炭修复与改良矿区重金属污染土壤的研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(4):8-12. LUO W Y, ZHU J Y, CHEN T, et al. Research progress on remediation and improvement of heavy metal contaminated soil in mining area with biochar[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021, 33(4):8-12.
- [12] 江解增, 许学宏, 余云飞, 等. 蔬菜对重金属生物富集程度的初步研究[J]. *中国蔬菜*, 2006(7):8-11. JIANG J Z, XU X H, YU Y F, et al. Primary study of biological accumulation to heavy metals in vegetables[J]. *China Vegetables*, 2006(7):8-11.
- [13] 祁浩, 庄坚, 庄重, 等. 不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2023, 44(6):3600-3608. QI H, ZHUANG J, ZHUANG Z, et al. Enrichment characteristics of heavy metals and health risk in different vegetables[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(6):3600-3608.
- [14] 祖艳群, 李元, 陈海燕, 等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3):289-292. ZU Y Q, LI Y, CHEN H Y, et al. Research of factors influencing concentrations of Pb, Cd, Cu, Zn in vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):289-292.
- [15] 何梓林, 鲜杨, 孟晓霞, 等. 菌渣生物炭对镉污染土壤性质及小白菜吸收镉的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1):340-344. HE Z L, XIAN Y, MENG X X, et al. Effects of mushroom residues biochar on properties of cadmium-contaminated soil and Cd uptake by Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1):340-344.
- [16] 罗洋, 高晋, 罗绪强, 等. 木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(8):1676-1682. LUO Y, GAO J, LUO X Q, et al. Effects of charcoal on growth and Cd uptake by *Brassica chinensis* in Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1676-1682.
- [17] 周小平. Pb-Cd 复合污染土壤的钝化及对小白菜生长的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2017. ZHOU X P. Immobilization of Pb-Cd compound contaminated soil and effects on cabbage growth[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [18] 吴迪, 魏小娜, 彭湃, 等. 钝化剂对酸性高镉土壤钝化效果及水稻镉吸收的影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(2):482-488. WU D, WEI X N, PENG P, et al. Effects of passivators on acid and cadmium farmland soils and cadmium absorption by rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2):482-488.
- [19] 刘小燕, 曾清如, 周细红, 等. 尿素施用对砷污染土壤 pH 值及砷活性的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6):1441-1443. LIU X Y, ZENG Q R, ZHOU X H, et al. The short-term changes of soil pH and available As by fertilizing urea in contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6):1441-1443.
- [20] 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 D, LIU M D, JIANG F, 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.
- [21] CURTIN D, MICHELLE E P, CTAIG R A. pH-dependence of organic matter solubility: base type effects on dissolved organic C, N, P, and S in soils with contrasting mineralogy[J]. *Geoderma*, 2016, 271:161-172.
- [22] LU K P, YANG X, GIELEN G, et al. Effect of bamboo and rice straw biochars on the mobility and redistribution of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) in contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 186:285-292.
- [23] 黄连喜, 魏岚, 刘晓文, 等. 生物炭对土壤-植物体系中铅镉迁移累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10):2205-2216. HUANG L X, WEI L, LIU X W, et al. Effects of biochar on the migration and accumulation of lead and cadmium in soil-plant systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2205-2216.
- [24] SHEN Z, ZHANG J, HOU D, et al. Synthesis of MgO-coated corn cob biochar and its application in lead stabilization in a soil washing residue[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2019, 122:357-362.
- [25] 袁启慧, 包立, 张乃明. 钝化剂种类和粒径对复合污染土壤镉铅有效态的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(2):192-197. YUAN Q H, BAO L, ZHANG N M. The effect of type and particle size of passivator on effective state of Cd and Pb in compound polluted soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2):192-197.
- [26] 王玉婷, 王紫玥, 刘田田, 等. 钝化剂对镉污染土壤修复效果及青菜生理效应影响[J]. *环境化学*, 2020, 39(9):2395-2403. WANG Y T, WANG Z Y, LIU T T, et al. Effects of amendments on remediation of cadmium-contaminated soil and physiological characteristics of pakchoi[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(9):2395-2403.
- [27] 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 C Y, MU L, WANG H H, 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.
- [28] 孙健伶, 罗立强. 土壤铅、镉单一和复合污染及与钙、锌交互作用对韭菜生长和铅镉积累特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(6):1100-1105. SUN J L, LUO L Q. Influence of single and combined pollution of lead and cadmium and their interactions with calcium or zinc on growth and accumulation of lead and cadmium of leeks[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6):1100-1105.
- [29] 曹春, 张松, 张鹏, 等. 大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7):1521-1531. CAO C, ZHANG S, ZHANG P, et al. Heavy metal contamination in soil-vegetable systems and its health risks in an area irrigated with acid mine drainage in Dabaoshan, Guangdong, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1521-1531.