

叶面阻控剂对老旧设施菜地土壤镉的阻控效果研究

史效迪^{1,2}, 占楠彪^{1,2}, 杨宾豪^{1,2}, 郭庚子^{1,2}, 孙宇航^{1,2}, 崔秀敏^{1,2*}

1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018

2. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018

摘要: 为降低重金属镉(Cd)污染的老旧设施菜地土壤Cd有效性及蔬菜作物Cd积累量,通过利用污染土壤盆栽试验,研究叶面喷施硅钾型、纳米硅型、壳寡糖型、氨基酸型、富硒型及矿源黄腐酸钾配合基施氮磷增效剂氢醌、3,4-二甲基吡唑磷酸盐和生物炭对土壤Cd含量及形态和蔬菜作物Cd含量及积累量的影响。研究表明,泰安市郊区棚龄30年以上的老旧设施菜地土壤重金属Cd存在超标现象(超标率为34.62%);其中污染最为严重的土壤表层Cd含量超出重金属污染风险临界值的81.09%。通过叶面喷施阻控剂联合氮磷增效剂可不同程度降低土壤重金属Cd有效性,氮磷增效剂联合叶面阻控剂壳寡糖生物制剂(Chit)处理、氮磷增效剂联合叶面阻控剂氨基酸水溶肥(IP)处理降低土壤有效Cd效果最显著,较未喷施的对照组CK降低18.65%~40.14%。优选阻控剂组合壳寡糖生物制剂+氨基酸水溶肥(Chit+IP)处理能够促进有效性高的弱酸提取态Cd向稳定态的残渣态Cd转化,降低土壤有效Cd含量,残渣态Cd占比较常规施肥处理(CK0)增加12.94%~89.69%。优选阻控剂组合中量元素肥料+硅钾修复剂(MEF+SiK)能有效降低降低番茄和白菜可食用部分Cd含量和Cd积累量,可食用部分Cd含量较CK0降低14.97%~29.72%,Cd积累量降低22.43%~25.15%。研究表明,泰安市郊区设施菜地土壤Cd存在超标现象。叶面喷施阻控剂联合氮磷增效剂可不同程度降低重金属Cd有效性,施用优选阻控剂组合能有效降低番茄和白菜各器官Cd含量及积累量。

关键词: 重金属; 镉; 菜田; 钝化剂; 番茄; 白菜

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)06-1059-12

Immobilization Effect of Foliar Barrier Agents on Cadmium in Soil of Old Facility Vegetable Fields

SHI Xiao-di^{1,2}, ZHAN Nan-biao^{1,2}, YANG Bin-hao^{1,2}, GUO Geng-zi^{1,2}, SHUN Yu-hang^{1,2}, CUI Xiu-min^{1,2*}

1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an 271018, China

2. College of Resources and Environment/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: To reduce the availability of cadmium(Cd) in soil and its accumulation in vegetable plants in old facility vegetable fields polluted by heavy metal Cd, this research conducts a pot experiment using contaminated soil, investigating the effects of foliar application of silicon-potassium type, nano silicon type, chitosan oligosaccharide type, amino acid type, and selenium-rich type agents as well as mineral-source potassium fulvic acid, combined with nitrogen and phosphorus synergists (hydroquinone, 3,4-dimethylpyrazole phosphate) and biochar on Cd content and morphology in soil and Cd content and accumulation in vegetable plants. The results show that in greenhouse vegetable soils with a shed age of over 30 years in the suburban area of Tai'an City, Cd contamination exceeds regulatory standards, with an exceedance rate of 34.62%. Among them, the most severely polluted surface soil had Cd content exceeding the critical risk threshold for heavy metal contamination by 81.09%. Spraying barrier agents combined with nitrogen and phosphorus synergists on the leaves can reduce the availability of soil Cd to varying degrees. Notably, the combination of nitrogen and phosphorus synergists with chitosan biologics (Chit) and the combination of synergists with foliar amino acid water soluble fertilizer (IP) exhibit the most significant reduction in soil available Cd, decreasing it by 18.65%~40.14% compared with the untreated control group (CK). The optimized combination of chitosan oligosaccharide biopreparation and amino acid water-soluble fertilizer (Chit+IP) facilitates the transformation of highly available acid-extractable Cd into the stable residual fraction, thereby reducing the concentration of available Cd in soil. The proportion of residual Cd increases by 12.94%~89.69% compared with conventional fertilization treatment CK0. Another effective barrier combination—medium element fertilizer + silicon-

收稿日期: 2025-01-23

修回日期: 2025-11-13

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2021CXGC010801)

第1作者简介: 史效迪(2001-),女,博士研究生,研究方向:植物营养与肥料。E-mail:dixiaoshi@126.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: xiumincui@sdau.edu.cn

potassium restorer (MEF+SiK) treatment—significantly reduces the Cd content and accumulation in the edible parts of tomato and Chinese cabbage. Specifically, the Cd content in the edible parts decreases by 14.97%–29.72%, and Cd accumulation decreases by 22.43%–25.15% compared with CK0. In conclusion, the Cd content in the soil of some vegetable fields in the suburbs of Tai'an exceeds standard limits. Foliar spraying of barrier agents combined with nitrogen and phosphorus synergists reduces the availability of heavy metal Cd to varying degrees, while the application of the selected combination of barrier agents effectively decreases the Cd content and accumulation in various organs of tomato and Chinese cabbage.

Keywords: Heavy metals; cadmium; vegetable field; barrier agent; tomato; Chinese cabbage

土壤是人类物质生产和生存发展的重要基础,由于我国工业生产的迅猛发展,土壤重金属污染逐渐成为威胁环境质量和粮食安全的重大隐患。作为评价土壤质量的重要指标,土壤重金属污染日益受到广泛关注。由于我国设施栽培所具有的独特性,其土壤中Cd的主要来源也与常规露天栽培不同,设施栽培中Cd主要源自人为因素,如化肥、有机肥、农药、污水灌溉等^[1,2]。我国设施栽培处于长期连作状态,其土壤Cd的主要源于肥料的大量投入。此外,不同作物对Cd的富集能力不同,蔬菜作物相较于其它作物而言具有更强的重金属富集能力,更容易受到重金属的毒害^[3],且叶菜类蔬菜相比于茄果类、豆类等的重金属积累能力更强^[4]。土壤中Cd过量会导致蔬菜作物光合作用受到抑制、影响正常生长发育甚至导致死亡。此外,Cd还具有在作物体内富集和在食物链中传递的特点,Cd通过食物链进入人体后会损伤人类多个器官系统,长期低剂量接触Cd会增加罹患各种癌症的风险^[5,6]

面对设施土壤的重金属污染问题,目前常用的修复方法主要采用原位钝化法^[7],以及采用叶面肥等农艺措施阻控作物对重金属的吸收^[4]。在设施农业生产过程中,施用氮、磷肥料是保障产量的重要措施,而氮肥的施用导致土壤酸化,活化土壤Cd,从而增加植物对Cd的吸收,影响Cd在其体内的积累^[8,9],含Cd磷肥的施用也是设施菜田重金属Cd积累的重要因素^[10]。因此,为减轻因过量施用氮肥而引起的土壤Cd有效性提高及过量施用磷肥引起的Cd积累,通过添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂提高氮肥利用率,添加生物炭提高磷肥利用率^[11]。脲酶抑制剂和硝化抑制剂可以抑制氮肥施入后NH₃和N₂O的排放,减少氮素损失^[12];生物炭常通过改善土壤中磷素养分形态、提高菜地土壤有效磷含量和土壤中磷素的吸附-解吸过程等途径提高磷素利用率,同时生物炭还能作为钝化剂吸附重金属离子,有效固

定土壤中的重金属,减少作物吸收^[13,14]。叶面喷施是一种常用的缓解土壤污染危害的农艺措施,常用于对作物重金属的阻控。常见的叶面阻控剂包括含氮、磷、钾及常规微量元素成分、硅基(有机硅和无机硅)成分、含硒或稀土元素成分以及含有农作物生理调节类物质等^[15],通过Ca²⁺、Mg²⁺等与重金属离子间的拮抗作用,减少作物对Cd的转运,或通过螯合作用降低重金属活性减少作物的吸收,从而降低收获农产品中重金属的含量^[16]。

设施栽培,尤其是30年以上的老旧设施菜地,由于长期高强度利用,大量高频施肥、灌溉,其土壤Cd含量、形态及分布有待更深一步探究。此外,先前的研究只注重于单一土壤钝化剂或单一叶面阻控剂,对二者组合应用的研究较少,对于Cd污染的老旧设施菜地土壤改良以及栽培作物的重金属阻控技术尚不完善。鉴于此,本文针对重金属Cd污染的老旧设施菜地,研究通过基施氮磷增效剂联合叶面喷施阻控剂及其组合对土壤Cd含量及形态和蔬菜作物Cd含量及积累量的影响,以期为提高菜田土壤质量、重金属污染防治及保障蔬菜作物食品安全提供理论支撑和实践指导。

1 材料与方法

1.1 老旧设施菜地调查

采样地为泰安市房村镇和良庄镇,属于温带大陆性半湿润季风气候。冬暖型日光温室长年番茄、芸豆轮作;拱棚主要种植叶菜,包括菠菜、茼蒿、芹菜等。该地属于暖温带季风气候,年均气温15.0℃左右,地形均为山前冲积平原,年均降水量约为680 mm。

采样时间为收获期后、定植下茬蔬菜前,选取棚龄30年以上土壤表层有明显“绿苔”的设施菜地107个,其中日光温室81个,拱棚26个。土

壤样品采集按照“S”形取样法,分别采集小行间表层(0~0.5 cm)、0.5~20 cm和20~40 cm层次土壤,每个设施取样8~10个点,各层土壤分别混合均匀后,去杂、风干、粉碎、过筛,备用。番茄植株样品采集按照“五点取样法”,每个设施取样8~10株,将植株样品分为根、茎、叶、果实四部分,105 °C杀青30 min,80 °C烘干至恒重,粉碎、过筛

后保存备用。

1.2 盆栽试验设计

试验地位于山东省泰安市山东农业大学智能温室。供试土壤取自泰安市房村镇30年以上老旧设施菜地,土壤类型为潮棕壤,pH为4.90,全镉含量0.78 mg·kg⁻¹,土壤基本理化性质见表1。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)
Organic matter	Total nitrogen	Alkali-hydrolyzable nitrogen	Ammonium nitrogen	Nitrate nitrogen
16.77	0.82	253.90	20.35	92.70
全磷/(g·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	全镉/(mg·kg ⁻¹)	
Total Phosphorus	Available phosphorus	Available potassium	Total Cd	
0.92	49.03	294.65	0.78	

盆栽试验于2023年4月至7月进行,盆栽阻控剂筛选试验所用番茄品种为“HD8-3”。共设7个处理,每个处理10盆,每盆一株番茄幼苗。氮素增效剂为氢醌(1 mg·kg⁻²)和3,4-二甲基吡唑磷酸盐(0.34 mg·kg⁻²);磷素增效剂为生物炭(0.67 mg·kg⁻²)。氮磷增效剂与底肥混匀后一次性施入土壤,混匀装盆,叶面阻控剂每10 d喷施1次,每次每盆100 mL,共喷施7次。具体处理方案列于表2。

盆栽试验于2023年9月至12月进行,进行优选阻控剂试验番茄品种为“凯德雅丽1832”;

白菜品种为“绿尊F1”。番茄、白菜各设5个处理,每处理10盆,番茄每盆1株,白菜每盆两棵。叶面阻控剂每7 d喷施1次,每次每盆100 mL,共喷施10次。优选阻控剂的组合在综合其各自主要成分进行优化后确定。试验所用优马组合为硅钾修复剂(稀释倍数1:500)+中量元素肥料(稀释倍数1:500);水禾土组合为壳寡糖生物制剂(稀释倍数1:500)+氨基酸水溶肥(稀释倍数1:500);华宏康万家组合为有机富硒营养剂(稀释倍数1:1 000)+降镉钾士(稀释倍数1:50)。具体的处理方案列于表3。

表2 不同叶面阻控剂试验处理

Table 2 Pot experiment treatment of different foliar barrier agent

处理代号	处理
Treatment code	Treatment
CK	常规施肥+氮磷增效剂
SiK	常规施肥+氮磷增效剂+硅钾修复剂(硅钾型叶面阻控剂,稀释倍数1:500)
RCd	常规施肥+氮磷增效剂+降镉钾士(纳米硅型叶面阻控剂,稀释倍数1:50)
Chit	常规施肥+氮磷增效剂+壳寡糖生物制剂(寡糖型叶面阻控剂,稀释倍数1:500)
IP	常规施肥+氮磷增效剂+氨基酸水溶肥(氨基酸型叶面阻控剂,稀释倍数1:500)
OSe	常规施肥+氮磷增效剂+有机富硒营养剂(富硒型叶面阻控剂,稀释倍数1:1 000)
FaK	常规施肥+氮磷增效剂+矿源黄腐酸钾(黄腐酸型叶面阻控剂,稀释倍数1:500)

表3 优选阻控剂组合试验处理

Table 3 Pot experiment treatment of optimized foliar barrier agent combinations

处理代号	处理
Treatment code	Treatment
CK0	常规施肥
CK1	常规施肥+氮磷增效剂
MEF+SiK	常规施肥+氮磷增效剂+优马组合(硅钾组合)
Chit+IP	常规施肥+氮磷增效剂+水禾土组合(蛋白组合)
Ose+RCd	常规施肥+氮磷增效剂+华宏康万家组合(有机小分子组合)

叶面阻控剂组合供试肥料:硅钙钾镁肥(施可丰化工股份有限公司);磷酸二氢钾(深圳市杜高生物新技术有限公司);尿素(山东农大肥业科技股份有限公司);氢醌(天津市巴斯夫化工有限公司);3,4-二甲基吡唑磷酸盐(上海麦克林生化科技有限公司);生物炭(河南立泽环保科技有限公司);硅钾修复剂(主要成分 Si、K,上海优马生物技术有限公司);中量元素肥料(主要成分 Si,上海优马生物技术有限公司);降镉砷士(主要成分 Si,广西康万家农田土壤修复有限公司);壳寡糖生物制剂(主要成分壳寡糖,烟台水禾土生物科技有限公司);氨基酸水溶肥(主要成分植物免疫蛋白、氨基酸,烟台水禾土生物科技有限公司);有机富硒营养剂(主要成分 Se、氨基酸,成都华宏生物科技有限公司);矿源黄腐酸钾(主要成分:黄腐酸、K,山东农大肥业科技股份有限公司)。

1.3 样品采集与测定

土壤样品采集分为 0~10 cm、10~20 cm 层次土壤,每盆采集鲜土 50 g,相同处理间充分混匀后,自然风干,研磨过筛,密封保存,待测。待番茄生长至结果期进行破坏性取样,取样分为根、茎、叶、果实;白菜生长至莲座期,取样分为地上部分和地下部分。番茄和白菜植株洗净后在 105 °C 下杀青 30 min,然后在 80 °C 烘至恒重,粉碎过筛,待测。

土壤测试指标主要有:土壤全 Cd、EDTA 提

取态 Cd^[17],采用 HCl-HNO₃-HClO₄-HF 消煮,ICP-OES 测定;EDTA 提取态 Cd 采用 DTPA 浸提,ICP-OES 测定;使用 BCR 逐级提取法^[18]提取弱酸提取态,氧化结合态,有机结合态和残渣态四种结合态 Cd,ICP-OES 测定。植株测试指标主要有:植株各器官 Cd 含量,采用浓 HNO₃-HClO₄ 消煮,用 ICP-OES 测定;Cd 积累量=各器官 Cd 含量*各器官干重,分别计算。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2019 和 Origin 2024 软件对数据进行处理和作图,采用 SPSS 26.0 软件进行数据统计,Duncan 多重比较法进行显著性分析(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 老旧设施菜地土壤和植株 Cd 积累状况

2.1.1 老旧设施菜地土壤 Cd 积累状况 图 1 为泰安市郊区老旧设施菜地土壤重金属 Cd 含量和不同形态 Cd 占比,根据《农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018),在 pH<7.5 的农用地土壤 Cd 污染风险筛选值为 0.3 mg·kg⁻¹,调查样本中,Cd 超标率为 34.62%,重金属 Cd 超标现象突出,土壤表层全 Cd 含量最高为 0.54 mg·kg⁻¹,0~20 cm 土层全 Cd 含量最高为 0.53 mg·kg⁻¹,20~40 cm 土层全 Cd 含量最高为 0.52 mg·kg⁻¹,均已超过污染风险临界值,其中土壤表层 Cd 含量最高超过污染风险临界值的 81.09%。各层次土壤

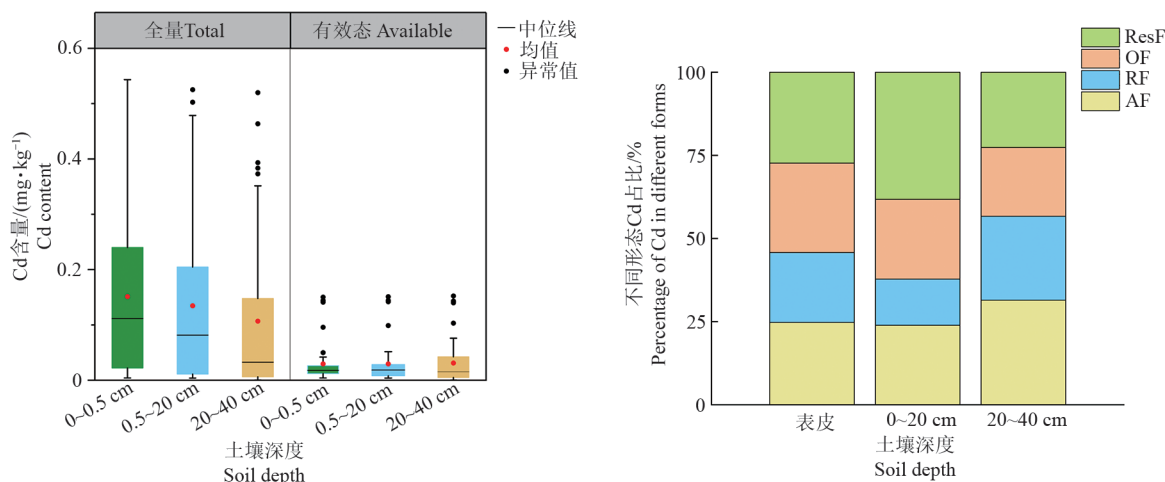


图 1 泰安市郊区老旧设施菜地土壤 Cd 含量和不同形态 Cd 占比

Fig. 1 Soil Cd content and percentage of Cd in different forms of old facility vegetable fields in Tai'an suburbs

注:ResF 为残渣态 Cd,OF 为可氧化态 Cd,RF 为可还原态 Cd,AF 为弱酸提取态 Cd,下同。

Note: ResF is residual Cd, OF is oxidizable Cd, RF is reducible Cd, AF is weak acid extractable Cd, same below.

有效态 Cd 含量最高可达 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在土壤表层和 0~20 cm 层次中,残渣态(ResF)Cd 占比最高,分别为 27.33% 和 29.26%。在 20~40 cm 土层中,弱酸提取态(AF)Cd 占比最高,为 27.76%。

整体看,老旧设施菜地土壤调查样本 Cd 含量超标现象较严重,随着土壤深度的增加 Cd 含量呈降低趋势,但有效性高的弱酸提取态(AF)Cd 呈增加趋势,这可能是由于水溶态 Cd 随灌溉向地下渗漏。

2.1.2 老旧设施菜地番茄植株 Cd 积累状况 土壤中重金属 Cd 达到一定水平时,会影响作物的生长和发育过程,甚至通过食物链危害人体健

康。由图 2 可以看出,番茄植株根的 Cd 含量整体较高,最高可达 $2.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;果实中 Cd 含量整体较低,最低仅有 $0.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。重金属 Cd 在叶片中积累量最高,在整株积累量的占比最高可达 77.20%;根的 Cd 积累量最低,仅占整株积累量的 0.017%。土壤中的 Cd 被植株根系吸收,进而转运到各器官最终在果实积累,果实中的 Cd 被人类食用后将会增加罹患各种疾病的风险。根据《食品安全国家标准》(GB2762-2017)新鲜蔬菜及新鲜水果的 Cd 限量为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (鲜重计),本调查中番茄果实 Cd 含量(鲜重计)最高可达 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,未超过国家食品中污染物限量标准。

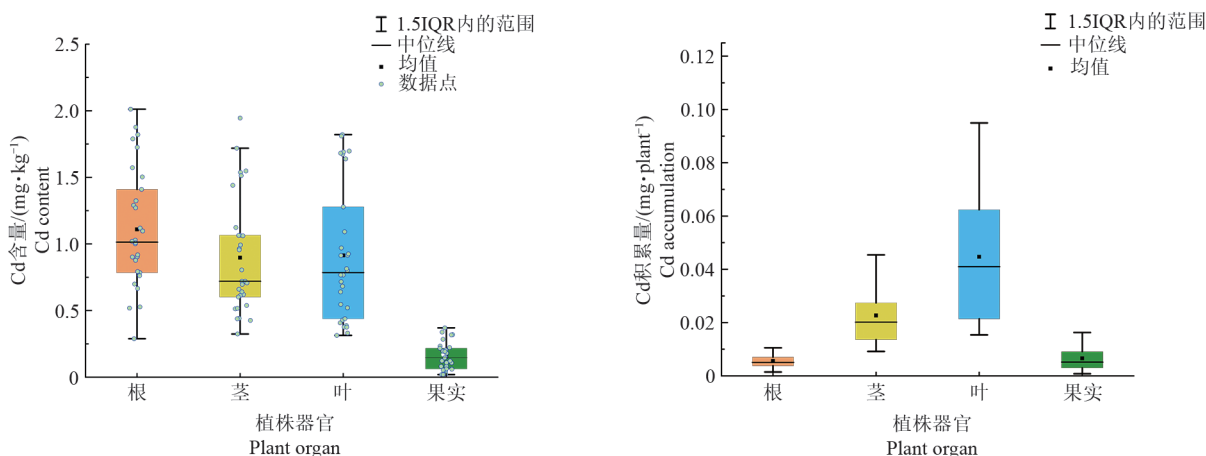


图 2 泰安市郊区老旧设施菜地番茄植株 Cd 含量及 Cd 积累量

Fig. 2 Cd content and accumulation of tomato plants in old facility vegetable fields in Tai'an suburbs

2.2 不同叶面阻控剂在老旧设施菜地上的初选

2.2.1 不同叶面阻控剂对老旧设施菜地土壤重金属 Cd 的影响 喷施叶面阻控剂的处理 SiK 的 0~10 cm 层次土壤全 Cd 含量均较 CK 显著降低 32.91%(图 3)。Chit、IP、OSe 和 FaK 处理的 10~

20 cm 层次土壤全 Cd 含量均较 CK 有不同程度提高,以 Chit 处理最显著,较 CK 提高 58.14%。与未喷施叶面阻控剂的 CK 相比,喷施叶面阻控剂的各处理 0~10 cm 和 10~20 cm 两个层次土壤有效 Cd 含量均有显著降低。在 0~10 cm 土层喷

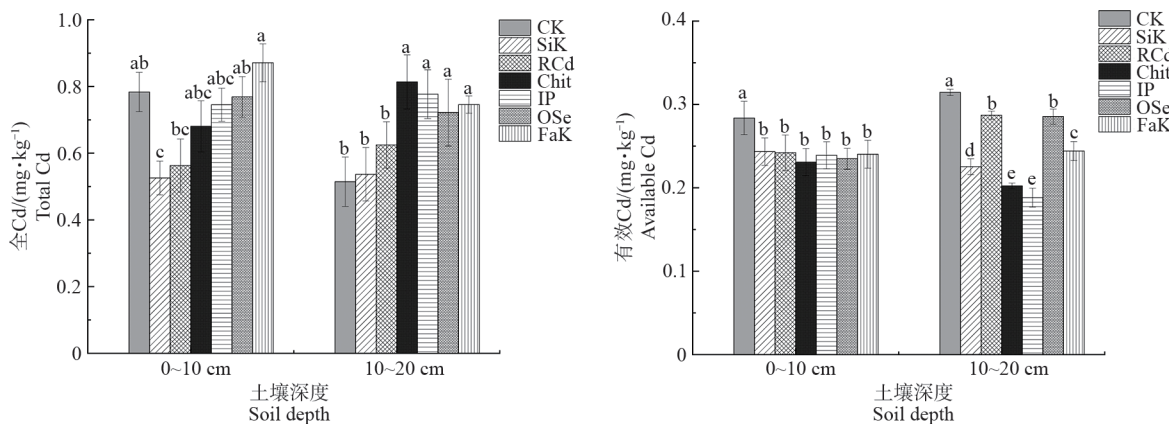


图 3 不同叶面阻控剂处理下不同层次土壤 Cd 含量

Fig. 3 Soil Cd content in different soil layers under different foliar barrier agent treatment

施阻控剂的各处理间有效 Cd 含量没有显著差异;10~20 cm 层次土壤中,喷施阻控剂的各处理有效 Cd 含量分别较 CK 降低 28.34%、8.72%、35.68%、40.14%、9.23%和 22.37%。

从不同土层全 Cd 和有效 Cd 的变化趋势来看,FaK 处理的 0~10 cm 层次全 Cd 含量最高,0~10 cm 层次的有效 Cd 含量却较低;Chit 和 IP 处理 10~20 cm 层次全 Cd 含量最高,但 10~20 cm 层次有效 Cd 含量最低;对照组 CK 的 10~20 cm 全 Cd 含量虽较低,其 0~10 cm 和 10~20 cm 层次的有效 Cd 含量均最高。

2.2.2 不同叶面阻控剂对番茄植株 Cd 含量的影响 由番茄植株各器官 Cd 含量(图 4),喷施阻控剂的处理 Chit、OSe 和 Fak 的根系 Cd 含量较 CK 显著增加,分别增加 33.66%、26.71%和 31.61%,这可能是由于茎叶对 Cd 离子的转运降低,导致其在根部的积累;仅 SiK 处理根系 Cd 含量较 CK 有降低趋势,但未达到显著水平。喷施叶面阻控剂的处理 FaK 茎中 Cd 含量较 CK 显著降低 14.47%;IP 处理和 OSe 处理与对照组 CK 无显著差异。喷施叶面阻控剂的处理 SiK、RCd 和 FaK 的叶片 Cd 含量较 CK 显著降低,分别降低 16.05%、8.81%和 18.44%。

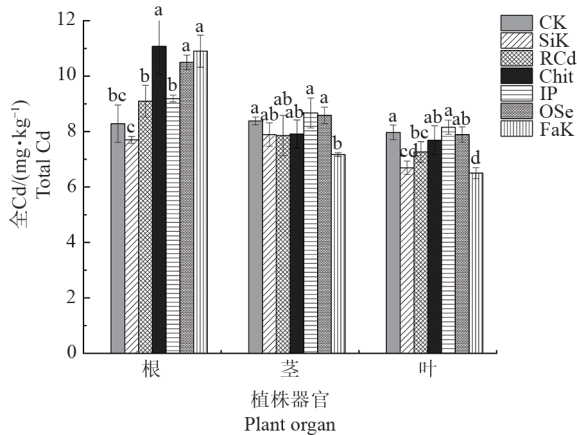


图 4 不同叶面阻控剂处理下番茄植株各器官全 Cd 含量
Fig. 4 Total Cd content in various organs of tomato plants under different foliar barrier agent treatment

2.3 优选阻控剂组合在番茄和白菜上的阻控效果

2.3.1 优选阻控剂组合对番茄土壤 Cd 含量及形态的影响 0~10 cm 层次土壤中,喷施优选阻控剂组合的各处理全 Cd 含量较空白对照组均显著降低,分别降低 6.11%、5.99%和 4.11%;10~20 cm

层次土壤中全 Cd 含量各处理间无显著差异(图 5a)。

0~10 cm 层次土壤中,喷施优选阻控剂组合的处理 MEF+SiK、Chit+IP 和 OSe+RCd 土壤有效 Cd 含量较对照组 CK0、CK1 均显著降低,较空白对照 CK0 分别降低 16.56%、16.07%和 12.97%,较基施氮磷增效剂的对照组 CK1 分别降低 9.72%、9.19%和 5.84%;对照组 CK1 较空白对照 CK0 显著降低 7.57%。10~20 cm 层次土壤中,仅有 Chit+IP 处理的有效 Cd 含量较空白对照 CK0 显著降低 16.46%(图 5b)。

0~10 cm 土层中,基施氮磷增效剂的对照组 CK1 及优选阻控剂组合 MRF+SiK、Chit+IP、OSe+RCd 较空白对照 CK0 的 AF 占比显著降低,分别降低 6.47%、11.35%、11.21%和 12.41%。基施氮磷增效剂的对照组 CK1 和优选阻控剂组合 OSe+RCd 的 RF 占比较空白对照 CK0 显著提高,分别增加 5.94%和 6.12%,MEF+SiK 处理的 RF 占比较对照组 CK1 显著降低 21.50%(图 5c)。MEF+SiK 处理的 OF 占比较对照组 CK0 和 CK1 均显著增加,分别增加 15.35%和 39.49%;Chit+IP 处理的 OF 占比较对照组 CK1 显著增加 33.96%;基施氮磷增效剂的对照组 CK1 较空白对照 CK0 显著降低 17.31%。MEF+SiK 处理和 Chit+IP 处理的 ResF 占比较对照组 CK0、CK1 均显著增加,较 CK0 分别增加 28.97%和 23.57%。

喷施优选阻控剂组合的处理 MEF+SiK、Chit+IP、OSe+RCd 的 10~20 cm 层次土壤 AF 的占比较空白对照 CK0 显著降低,分别降低 7.66%、10.82%和 7.02%;其中,Chit+IP 处理的 AF 占比较基施氮磷增效剂的对照组 CK1 显著降低 8.35%(图 5d)。Chit+IP 处理的 RF 和 OF 占比较基施氮磷增效剂的对照组 CK1 均显著降低,分别降低 24.93%和 24.88%。Chit+IP 处理的 ResF 占比较空白对照 CK0 显著增加 12.94%,较基施氮磷增效剂的对照组 CK1 显著增加 26.51%。从同一处理不同形态 Cd 占比来看,喷施优选阻控剂组合和基施氮磷增效剂能不同程度降低土壤中有效性高的 AF 占比,增加土壤中有效性低的 OF 和 ResF 占比。

2.3.2 优选阻控剂组合对老旧设施菜地白菜土壤 Cd 含量及形态的影响 基施氮磷增效剂的对照

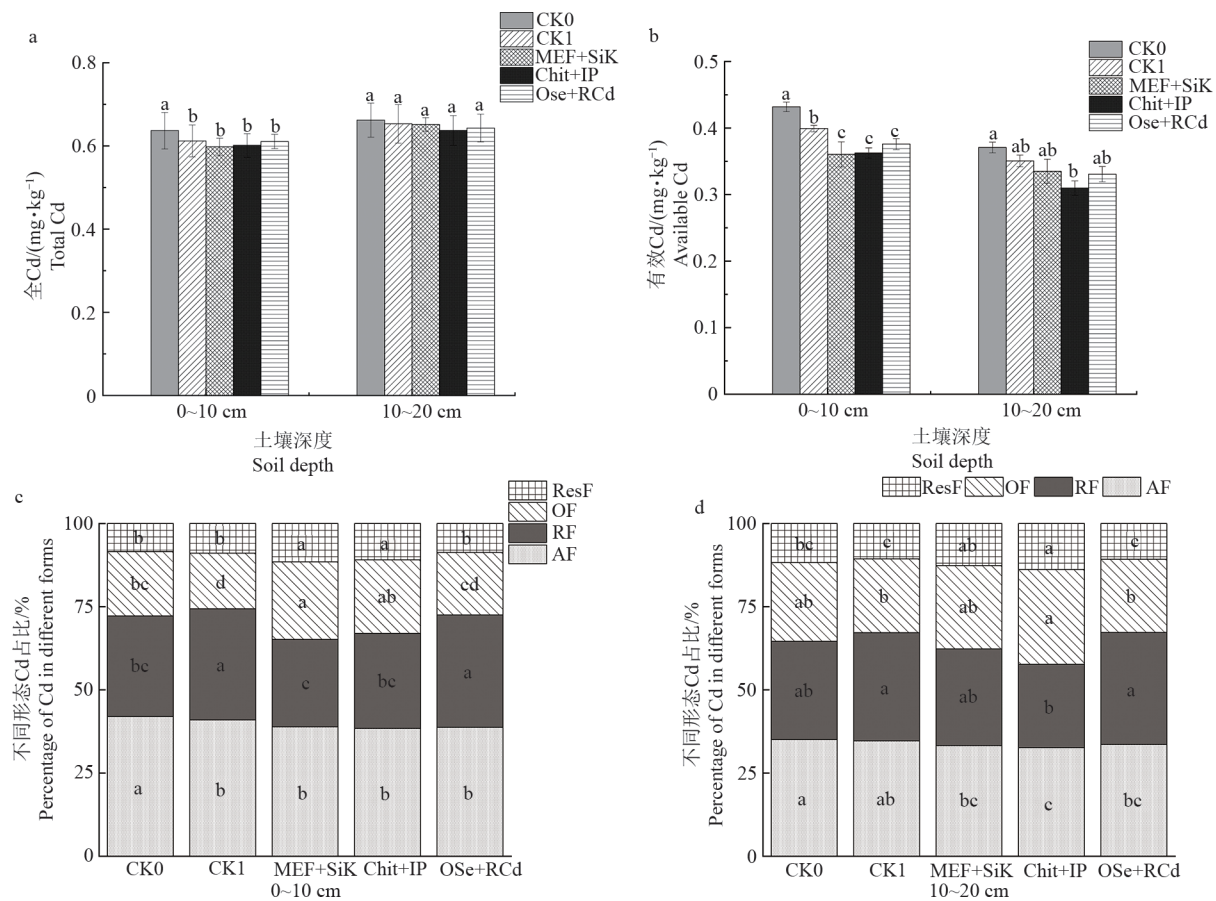


图 5 优选阻控剂组合下(番茄)不同层次土壤 Cd 含量及占比

Fig. 5 Cd content and percentage in different soil layers under optimized barrier agent combinations (for tomatoes)

组 CK1 及优选阻控剂组合 MEF+SiK、Chit+IP 和 OSe+RCd 的 0~10 cm 层次土壤的全 Cd 含量较空白对照 CK0 有降低趋势,分别降低 5.77%、8.16%、6.85% 和 7.06%,均未达显著水平;10~20 cm 层次土壤的全 Cd 含量各处理间没有显著差异(图 6a)。

0~10 cm 层次土壤中,基施氮磷增效剂的对照组 CK1 及优选阻控剂组合 MEF+SiK、Chit+IP 和 OSe+RCd 土壤有效 Cd 含量较空白对照 CK0 显著降低,以 Chit+IP 处理的有效 Cd 含量最低,为 0.35 mg·kg⁻¹,较 CK0 降低 20.85%,差异显著;CK1、MEF+SiK 和 OSe+RCd 处理的有效 Cd 含量较 CK0 分别降低 12.80%、18.31% 和 16.15%(图 6b)。10~20 cm 层次土壤中,以 Chit+IP 处理的有效 Cd 含量最低,为 0.28 mg·kg⁻¹,较空白对照 CK0 显著降低 23.71%,较基施氮磷增效剂的对照组 CK1 显著降低 18.69%;MEF+SiK 处理较空白对照 CK0 显著降低 11.44%。

基施氮磷增效剂的对照组 CK1 及优选阻控

剂组合 MEF+SiK、Chit+IP 和 OSe+RCd 的 0~10 cm 层次土壤 AF 占比较空白对照 CK0 显著降低,分别降低 11.71%、15.53%、16.94% 和 10.80%;其中,Chit+IP 处理的 AF 占比较对照组 CK1 显著降低 5.92%。喷施优选阻控剂组合的处理 MEF+SiK、Chit+IP 和 OSe+RCd 的 RF 占比较对照组 CK0、CK1 均显著降低,较 CK0 分别降低 22.66%、28.45% 和 33.12%;较 CK1 分别降低 20.85%、26.77% 和 31.55%(图 6c)。MEF+SiK、Chit+IP 和 OSe+RCd 的 OF 占比较对照组 CK0、CK1 均显著升高,较 CK0 分别增加 51.16%、82.41% 和 99.41%;较 CK1 分别增加 35.39%、63.38% 和 78.61%。基施氮磷增效剂的对照组 CK1 及优选阻控剂组合 MEF+SiK、Chit+IP 和 OSe+RCd 的 ResF 占比较 CK0 均显著提高,分别增加 48.15%、76.51%、89.69% 和 54.42%;MEF+SiK 处理和 Chit+IP 处理 ResF 占比较 CK1 显著提高,分别增加 19.14% 和 28.04%。

MEF+SiK 处理和 Chit+IP 处理的 10~20 cm

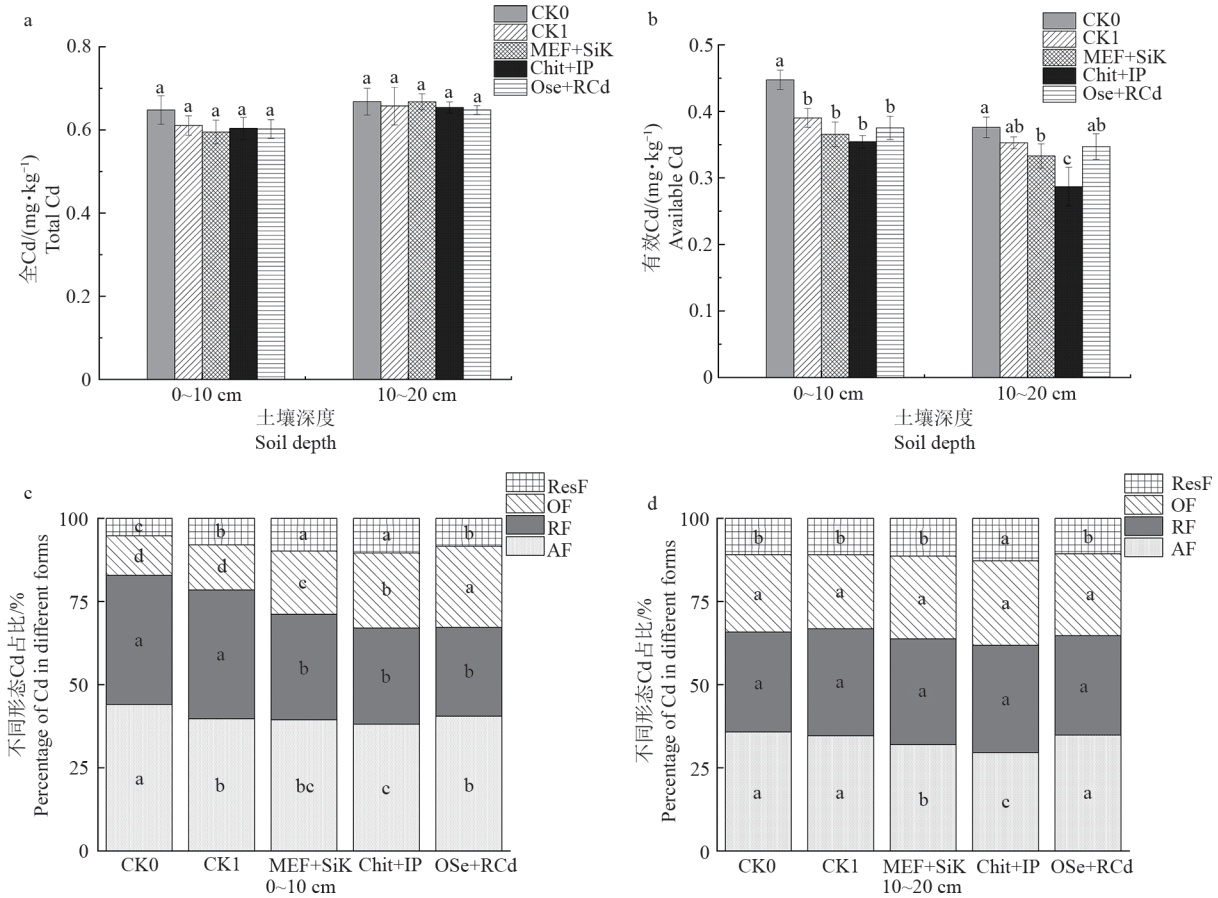


图6 优选阻控剂组合下(白菜)不同层次土壤Cd含量及占比

Fig. 6 Cd content and percentage of different soil layers under optimized barrier agent combinations (for Chinese cabbage)

层次土壤AF占比较对照组CK0、CK1均显著降低,较空白对照组CK0分别降低9.77%和17.56%,较CK1分别降低6.55%和14.61%;各处理RF和OF占比无显著差异;Chit+IP处理的ResF占比较对照组CK0、CK1显著升高,分别增加16.59%和16.55%(图6d)。

2.3.3 优选阻控剂组合对老旧设施菜地番茄植株Cd含量的影响 喷施优选阻控剂组合的植株根系Cd含量较对照组CK0、CK1有降低趋势,但未达显著水平(图7)。喷施优选阻控剂组合及基施氮磷增效剂的处理茎中Cd含量较空白对照CK0均显著升高,以OSe+RCd处理最高,CK1、MEF+SiK、Chit+IP和OSe+RCd处理分别增加11.35%、29.85%、39.17%和42.62%;喷施优选阻控剂组合的处理茎中Cd含量较对照组CK1均显著上升,分别增加16.61%、24.98%和28.08%。喷施优选阻控剂组合的处理叶片中Cd含量较对照组CK0、CK1均显著降低,MEF+SiK、Chit+IP和OSe+RCd处理较CK0分别降低19.34%、17.66%

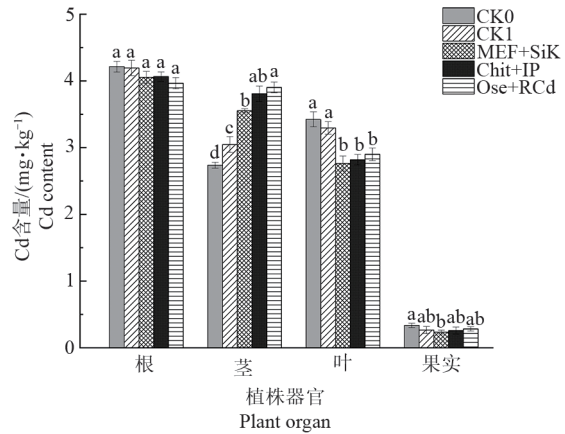


图7 优选阻控剂组合番茄植株各器官Cd含量

Fig. 7 Cd content in various organs of tomato plants under optimized barrier agent combinations

和15.30%;较CK1分别降低16.15%、14.40%和11.94%。喷施优选阻控剂组合及基施氮磷增效剂的处理果实中Cd含量较CK0有降低趋势,MEF+SiK处理的果实Cd含量最低,为0.23 mg·kg⁻¹,较CK0降低29.72%,且差异显著。

2.3.4 优选阻隔剂组合对老旧设施菜地白菜植株Cd含量的影响 喷施优选阻隔剂组合及基施氮磷增效剂的处理MEF+SiK植株地上部分Cd含量较空白对照CK0显著降低,地下部分Cd含量与空白对照CK0相比无显著差异(图8)。喷施优选阻隔剂组合的处理MEF+SiK处理地上部分Cd含量较空白对照CK0降低14.97%,差异显著,较对照组CK1降低5.87%,但未达显著水平;Chit+IP处理地上部分Cd含量较空白对照CK0降低11.83%,较对照组CK1降低2.40%,但未达显著水平;OSe+RCd处理地上部分Cd含量较空白对照CK0降低12.19%,较对照组CK1降低2.80%,但未达显著水平;对照组CK1地上部分Cd含量较空白对照CK0降低9.66%,差异不显著。

2.3.5 优选阻隔剂组合老旧设施菜地番茄、白菜Cd积累量的影响 优选阻隔剂组合番茄植株各器官Cd的积累量(图9a)可以看出,喷施优选阻隔剂组合的处理OSe+RCd植株根系Cd积累量较对照组CK0、CK1均显著降低,分别降低11.23%和14.68%。喷施优选阻隔剂组合及基施氮磷增效剂的处理茎中Cd积累量较空白对照CK0均显著增加,CK1、MEF+SiK、Chit+IP和OSe+RCd处理较CK0分别增加13.34%、28.95%、46.49%和32.43%;喷施优选阻隔剂组

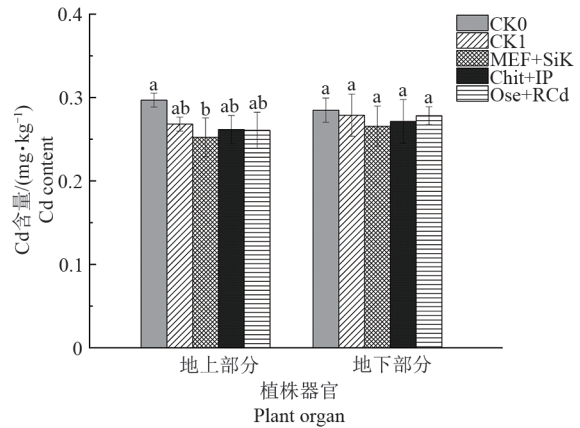


图8 优选阻隔剂组合白菜植株地上、地下部分Cd含量
Fig. 8 Cd content in aboveground and underground parts of Chinese cabbage plants under optimized barrier agent combinations

合的处理较对照组CK1均显著升高,分别增加13.77%、29.25%和16.84%。喷施叶优选阻隔剂组合的处理叶片中Cd积累量较对照组CK0、CK1均显著降低,较空白对照CK0分别降低18.91%、16.17%和18.83%,较CK1分别降低19.66%、16.94%和19.58%。喷施优选阻隔剂组合及基施氮磷增效剂的处理果实中Cd积累量较空白对照CK0均有不同程度降低,其中以MEF+SiK处理和OSe+RCd处理的Cd积累量最显著,较CK0分别降低30.94%和25.15%。

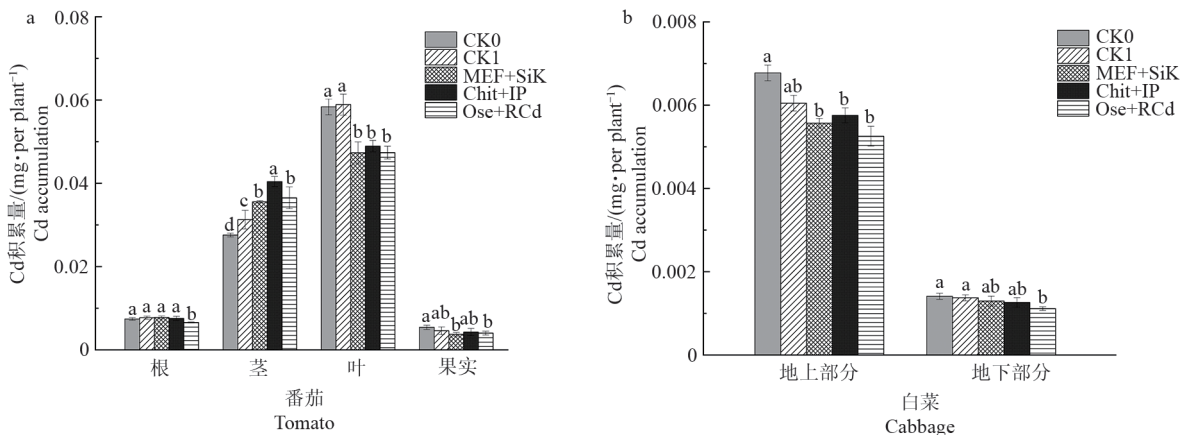


图9 优选阻隔剂组合番茄、白菜植株各器官Cd积累量

Fig. 9 Cd accumulation in various parts of tomato and cabbage plants under optimized barrier agent combinations

白菜植株地上、地下部分Cd积累量(图9b)可以看出,喷施优选阻隔剂组合及基施氮磷增效剂的处理地上、地下部分Cd积累量均有不同程度降低。其中喷施优选阻隔剂组合的处理较CK0地上部分

Cd积累量均显著降低,MEF+SiK、Chit+IP和OSe+RCd处理分别降低了17.80%、15.05%和22.43%;OSe+RCd处理的地下部分Cd积累量较对照组CK0、CK1均显著降低,分别降低20.91%和18.78%。

3 讨论

3.1 老旧设施菜地重金属Cd积累现状

在本调查研究中,山东省泰安市郊区老旧菜地土壤Cd超标污染点位较高,土壤表层Cd含量最高超过污染风险临界值的81.09%,且随灌溉流失风险较高。重金属Cd污染不仅会导致土壤和水生态环境恶化,还会对作物产生毒害作用,造成农产品产量和品质下降。本研究中,番茄植株根中Cd含量最高可达 $2.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶片中Cd积累量最高可达 $0.095 \text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$,占整株Cd积累量的77.20%。这与刘俊秀等的研究结果相似^[19],番茄植株根的Cd含量最高,叶片对Cd的富集能力最强。Cd在叶片中积累,会影响植物光合作用,甚至导致植物坏死。此外,Cd在作物可食用部分积累将会危害食品安全,人类过量摄入后可能会引发肺癌、血尿等疾病^[20]。在本研究中番茄果实Cd含量为 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,虽并未超过国家食品安全标准Cd限量($0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但在土壤Cd超标且不断积累的严峻形势下,蔬菜食品存在潜在风险,蔬菜食品安全的保障迫在眉睫。

3.2 叶面阻控剂对土壤Cd形态及含量的影响

在本研究中,喷施叶面阻控剂能有效降低0~10 cm和10~20 cm层次土壤有效Cd含量,但可能会增加Cd向深层土壤迁移的风险,喷施优选阻控剂促进土壤Cd由易于植物吸收的高有效性向难吸收的高稳定性转化,即由弱酸提取态向残渣态转化方面表现出较好效果。叶面喷施腐殖酸水溶肥能降低土壤中有效态Cd含量促进土壤中Cd由有效性高的弱酸可提取态和可氧化态向有效性低的可还原态和残渣态转化^[21]。叶面喷施微量元素肥料如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等,可以与 Cd^{2+} 竞争吸附位点从而降低Cd的有效性^[22]。本研究发现基施氮磷增效剂的处理土壤有效Cd均有不同程度降低,残渣态Cd含量呈增加趋势,喷施叶面阻控剂具有促进该趋势的作用。这可能是由于氮素增效剂硝化抑制剂和脲酶抑制剂在提高氮肥利用率的同时减缓因氮肥投入而引起的土壤酸化,提高土壤pH,降低Cd有效性;作为磷素增效剂的生物炭因具有的多孔、比表面积较大等特性,常作为重金属有机钝化剂应用,可以通过

吸附-解吸、络合作用和还原作用等固定土壤重金属,降低弱酸提取态Cd含量^[23],此外,生物炭还能有效改善受Cd污染的温室土壤^[24],生物炭因自身含有较多的盐基离子,通过提高土壤盐基离子饱和度,促进重金属离子交换,进而提高其吸附重金属的能力^[25]。研究表明,叶面硅肥与生物炭配施可以抑制Cd的生物有效性,降低土壤有效Cd含量^[26],生物炭可以通过改变土壤理化性质从而促进Cd由生物可利用态(弱酸提取态)向生物难利用态(残渣态)转化^[25,27]。在本试验中,叶面喷施阻控剂联合基施生物炭的处理设施白菜和设施番茄土壤的弱酸可提取态Cd含量有不同程度降低,其有效Cd含量也有相应降低。此外,本研究发现叶面喷施优选阻控剂组合联合基施生物炭处理的有效Cd含量较单施生物炭的处理有效态Cd含量降低5.84%~18.69%,说明叶面喷施阻控剂能在添加生物炭的基础上进一步降低土壤有效Cd含量。

3.3 叶面阻控剂对老旧设施菜地番茄、白菜植株重金属Cd含量和积累量的影响

在本试验中,叶面喷施不同阻控剂及优选阻控剂组合均能不同程度降低番茄、白菜植株Cd含量及积累量。有研究表明,中量元素 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等具有减轻作物重金属毒性的作用, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子可以通过与作物竞争根上的吸附位点减轻 Cd^{2+} 对作物根系的毒性,从而减少作物根系的交换和复合 Cd^{2+} ^[28]。在本研究中,喷施叶面阻控剂的处理番茄植株茎、叶Cd含量降低,但根系Cd含量增加,与前人对辣椒^[29]、小麦^[30]的研究结果相似,这可能是由于叶面喷施硒、硅等可与重金属产生拮抗作用,通过改变植物细胞膜对重金属离子的通透性,进而影响其在植株中的运输,从而导致在根部的积累。叶面施用硅肥可以通过提高叶绿素含量和光合速率,调控酶活性以及增强植株抗逆性等方式降低植物细胞对Cd的吸收及其毒害作用^[31,32]。叶面喷施黄腐酸通过提高叶片ROS清除能力降低作物对Cd的吸收与转运^[33]。叶面喷施硒可以通过防止镉诱导的氧化应激、调节光系统和修复受损细胞来减轻Cd对植物的毒害^[34-36]。有研究结果表明,叶面阻控剂能有效抑制作物对Cd的富集,叶面喷施氨基酸类、硒肥、硅肥均可有效降低作物地上部分

Cd含量^[37,38]。叶面喷施氨基酸、腐殖酸、硒肥等均能有效降低马铃薯块茎Cd的积累^[39]。在本试验中,喷施叶面阻控剂联合基施氮磷增效剂的处理较单施氮磷增效剂的处理可有效降低设施白菜、番茄可食用部分Cd含量和白菜、番茄可食用部分Cd积累量。这与前人对辣椒和小白菜的研究结果一致^[40,41]。叶面阻控剂通过降低Cd²⁺向植物地上部的转运和富集,降低植物可食用部分Cd含量。前人对碱性土壤中油菜的研究结果表明,生物炭可以降低作物对Cd的吸收量^[42]。这与本试验的研究结果相似,单施生物炭的处理白菜可食用部分和番茄果实Cd积累量降低13.88%~14.81%,生物炭可能通过降低土壤中Cd的有效性,减少植物对Cd的吸收,从而降低白菜和番茄的Cd积累量。此外,本研究发现叶面阻控剂联合基施氮磷增效剂的处理白菜可食用部分Cd积累量降低21.22%,番茄果实降低30.93%,说明喷施叶面阻控剂能够在基施生物炭的基础上进一步降低蔬菜作物对Cd的吸收与积累。

4 结论

(1)泰安市郊区设施菜地土壤重金属Cd存在超标现象,超标率为34.62%。Cd污染最为严重的土壤表层Cd含量超出污染风险临界值的81.09%。

(2)叶面喷施阻控剂联合氮磷增效剂可不同程度降低重金属Cd有效性。叶面喷施壳寡糖生物制剂(Chit)处理和氨基酸水溶肥(IP)处理降低土壤有效Cd最显著。施用优选阻控剂组合能促进土壤重金属Cd向稳定态转化。叶面喷施壳寡糖生物制剂+氨基酸水溶肥(Chit+IP)处理对土壤有效Cd含量降低最显著,同时促进有效性高的弱酸提取态Cd向稳定态的残渣态Cd转化,有助于重金属Cd污染土壤的改良。

(3)施用优选阻控剂组合能有效降低番茄和白菜各器官Cd含量及Cd积累量。叶面喷施中量元素肥料+硅钾修复剂(MEF+SiK)处理对降低番茄和白菜可食用部分Cd含量和Cd积累量的效果最优,有助于保障蔬菜作物的食品安全。

参考文献

[1] 茹淑华,徐万强,侯利敏,等.连续施用有机肥后重金

属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J].生态环境学报,2019,28(10):2070-2078.

- [2] 卢维宏,刘娟,张乃明,等.中国典型设施栽培土壤Cu、Zn累积特征及风险预测[J].农业工程学报,2021,37(11):189-196.
- [3] 刘意章,肖唐付,熊燕,等.西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J].环境科学,2019,40(06):2877-2884.
- [4] 王子豪,梁红怡,张冬寒,等.中国设施土壤重金属累积特征与污染阻控技术研究进展[J].农业工程学报,2024,40(09):1-14.
- [5] Satir S. The relationship between oral cancer and cadmium: A review[J]. Mol Biol Rep, 2022, 49(3): 2413-2419.
- [6] Ali Hussein M, Kamalakkannan A, Valinezhad K, et al. The dynamic face of cadmium-induced Carcinogenesis: Mechanisms, emerging trends, and future directions [J]. Curr Res Toxicol, 2024, 6: 100166.
- [7] Palansooriya K N, Shaheen S M, Chen S S, et al. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: A critical review[J]. Environment International, 2020, 134: 105046.
- [8] 张琦,杨洋,涂鹏飞,等.氮肥对油菜在不同土壤中吸收积累Cd的影响[J].农业资源与环境学报,2019, 36(01):43-52.
- [9] Cheng M, Wang P, Kopittke PM, et al. Cadmium accumulation is enhanced by ammonium compared to nitrate in two hyperaccumulators, without affecting speciation[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67: 5041-5050.
- [10] 贾丽,乔玉辉,陈清,等.我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素[J].农业环境科学学报,2020, 39(02):263-274.
- [11] Li S C, Wang N, Chen S Q, et al. Enhanced soil P immobilization and microbial biomass P by application of biochar modified with eggshell[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118568-118568.
- [12] 曾科,王书伟,朱文彬,等.施氮方式与添加脲酶/硝化抑制剂对稻季NH₃挥发和N₂O排放的影响[J].植物营养与肥料学报,2023,29(02):220-231.
- [13] Gong H, Tan Z, Huang K, et al. Mechanism of cadmium removal from soil by silicate composite biochar and its recycling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 409(32): 125022.
- [14] Yu H, Zou W, Chen J, et al. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review [J]. J Environ Manag, 2019, 232: 8-21.

- [15] 刘家豪. 叶面阻隔剂对水稻镉吸收及转运的影响机制[D]. 太原:山西大学,2020:0-25.
- [16] 曾秀君,程 坤,黄学平,等. 石灰、腐植酸单施及复配对污染土壤铅镉生物有效性的影响[J]. 生态与农村环境学报,2020,36(01):121-128.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京:中国农业出版社,2000:25-239.
- [18] Lukowski Adam, Dec Dorota. Fractions of Ni, Pb, Cr, and Their impact on enzyme activities of arable land cultivated by the simplified method[J]. Minerals, 2021,11(6):584.
- [19] 刘俊秀,朱正阳,王 甦,等. 重金属镉在番茄及其害虫西花蓟马中的积累与传递[J]. 环境昆虫学报, 2023,45(03):673-681.
- [20] Cui J, Wang W, Peng Y, et al. Effects of simulated Cd deposition on soil Cd availability, microbial response, and crop Cd uptake in the passivation-remediation process of Cd-contaminated purple soil[J]. Science of the Total Environment, 2019,683:782-792.
- [21] 张雨佳. 轮作方式下土壤调理剂与叶面阻隔剂混合削减菜地 Cd 污染研究[D]. 重庆:西南大学,2023: 49-56.
- [22] Yin Z R, Sheng H, Xiao H C, et al. Inter-annual reduction in rice Cd and its eco-environmental controls in 6-year biannual mineral amendment in subtropical double-rice cropping ecosystems[J]. Environmental Pollution, 2022,293:118566-118566.
- [23] Leila M, Sara F, Mohammad M. Biochar application modified growth and physiological parameters of *Ocimum ciliatum* L. and reduced human risk assessment under cadmium stress[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,409(prepublish):124954.
- [24] Rai P K, Lee S S, Zhang M, et al. Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management [J]. Environment international, 2019,125:365-385.
- [25] 安 梅,董 丽,张 磊,等. 不同种类生物炭对土壤重金属镉铅形态分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018,37(05):892-898.
- [26] 陈思慧,张亚平,李 飞,等. 钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(03):563-572.
- [27] 王艳红,李盟军,唐明灯,等. 稻壳基生物炭对生菜 Cd 吸收及土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015,23(02):207-214.
- [28] Dong G, Nkoh N J, Hong Z, et al. Phytotoxicity of Cu^{2+} and Cd^{2+} to the roots of four different wheat cultivars as related to charge properties and chemical forms of the metals on whole plant roots[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 196(C):110545.
- [29] 俞 朝,周其耀,詹丽钊,等. 叶面喷施纳米硅肥对 2 个辣椒品种镉积累的阻控作用[J]. 生态与农村环境学报,2024,40(12):1687-1692.
- [30] 曹 阳,李撑娟,王 辉,等. 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作 Cd 吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报,2023,42(02):319-326.
- [31] Greger M, Kabir H A, Landberg T, et al. Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat[J]. Environmental Pollution, 2016,211:90-97.
- [32] 刘佳炜,周 航,魏宾纭,等. 组配改良剂联合硅肥对 Cd 污染稻田的修复效果[J]. 中国环境科学, 2020, 40(08):3512-3519.
- [33] Wang Y, Yang R, Zheng J, et al. Exogenous foliar application of fulvic acid alleviate cadmium toxicity in lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019,167:10-19.
- [34] 黄亚涛,雷宁宇,范 蓓,等. 硒对农产品营养品质的影响[J]. 农产品质量与安全, 2021(02):80-87.
- [35] 王晓莹,吴贝贝,吴 东,等. 硒-生物炭复合调理剂对镉污染菜地空心菜生长及土壤镉生物有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2025,45(02):523-532.
- [36] Wu Z, Yin X, Bañuelos G S, et al. Indications of selenium protection against cadmium and lead toxicity in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2016,7:1875.
- [37] Hu Q Y, Tang Y G, Zhang Z Q, et al. Effects of 4 types of remediation agents on reducing Cd contents in soil and rice on Cd-contaminated farmland [J]. Agricultural Science and Technology, 2021,22(03):7-12.
- [38] 谭 骏,潘丽萍,黄雁飞,等. 叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020,37(06):981-987.
- [39] 付天岭,秦 冉,龚思同,等. 喷施叶面阻隔剂对马铃薯 Cd、Cu、Ni、Zn 富集转运的影响[J]. 安全与环境学报, 2022,22(04):2217-2230.
- [40] 王卫红,高双全,杜衍红,等. 镉污染菜地叶面阻隔剂对不同品种辣椒镉积累影响[J]. 生态环境学报, 2021,30(08):1751-1756.
- [41] 李 松,孙向阳,李素艳,等. 改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021,40(06):1229-1235.
- [42] 任心豪,陈 乔,李 锦,等. 小麦秸秆生物炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021,38(01):119-126.