

玉米套种苕麻对镉污染土壤修复研究

李桥¹, 郎建¹, 刘杰¹, 陈超²

¹中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都

²四川农业大学环境学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年5月21日; 录用日期: 2024年6月28日; 发布日期: 2024年7月31日

摘要

通过田间试验设置玉米与苕麻的单作模式、玉米与苕麻的套作模式, 研究玉米与苕麻套作模式对植物样本质量、株高, 土壤基本理化性质、土壤与植物Cd含量变化的影响。结果表明: 1) 与单作模式相比, 套作处理玉米的植株质量及玉米颗粒质量均呈下降趋势, 对玉米株高无显著影响, 对苕麻株高、植株质量却有所提高, 质量提升幅度达789.49%; 2) 套作处理促进了苕麻生物量与Cd富集总量, 富集总量与单作相比显著提升3.84倍至6.78倍; 3) 套作处理使苕麻对Cd的吸收下降45.3%, 但玉米叶部Cd富集量大幅上涨, 涨幅为178.15%, 玉米根际土Cd富集量上涨50%; 4) 与单作相比, 套作系统中玉米、苕麻的Cd富集系数分别增加128%和减少39.77%。玉米与苕麻套作能提升作物生物量, 利于Cd污染土壤的修复以及对污染土壤的安全利用。

关键词

玉米, 苕麻, 套种, 植物修复, 镉污染土壤

Study on the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Intercropping Maize and Ramie

Qiao Li¹, Jian Lang¹, Jie Liu¹, Chao Chen²

¹Power China of Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan

²College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan

Received: May 21st, 2024; accepted: Jun. 28th, 2024; published: Jul. 31st, 2024

Abstract

The single-cropping mode of maize and ramie and the intercropping mode of maize and ramie

文章引用: 李桥, 郎建, 刘杰, 陈超. 玉米套种苕麻对镉污染土壤修复研究[J]. 土壤科学, 2024, 12(3): 158-166.

DOI: 10.12677/hjss.2024.123019

were set up in field experiments to study the influence of changes in plant sample quality and plant height, basic physical and chemical properties of soil, and Cd content in soil and plant under the intercropping mode of maize and ramie. The results showed that: 1) Compared with the single cropping mode, the intercropping had a downward trend on the plant quality and corn kernel quality of maize, and had no significant effect on the plant height of maize, but improved the plant height and plant quality of ramie. The range was 789.49%; 2) The intercropping treatment promoted the increase of ramie biomass and the total amount of Cd enrichment, and the total amount of Cd enriched by a single ramie plant was significantly increased by 3.84 times to 6.78 times; 3) Intercropping treatment made ramie absorption of Cd decreased by 45.3%, the Cd enrichment in maize leaves rose sharply by 178.15%, and the Cd enrichment in maize rhizosphere soil increased by 50%; 4) Compared with single cropping, in the intercropping system, maize, The enrichment coefficients of ramie varied by +128% and -39.77%, respectively. The intercropping of maize and ramie can increase the biomass, which is helpful for the remediation of cadmium contaminated soil, the safe utilization of contaminated soil.

Keywords

Maize, Ramie, Intercropping, Phyto-Remediation, Cadmium Contaminated Soil

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的发展,冶炼、采矿、加工等工业生产活动增多,土壤重金属污染愈加严重,土壤重金属通过直接接触或经食物链等途径进入到动植物以及人类体内,威胁健康。近年来,植物修复技术作为一种新型的重金属污染土壤修复技术,逐渐成为重金属污染土壤修复领域的研究热点[1],玉米具有较强的镉(Cd)胁迫耐受能力,并且玉米吸收的Cd元素主要富集在根系或茎叶部位,较少向籽实内转运,因此在Cd污染的土壤中种植玉米是相对安全的[2],通过套种玉米这类Cd低积累品种及与其他超重金属富集植物的方式来修复Cd污染土壤是具有应用潜力的[3]。苧麻是中国特有的以纺织为主要用途的农作物[4],苧麻因具有耐Cd性强、易成活、生物量大的优良特点,故苧麻对Cd污染土壤的修复能力是其多功能开发的一大热门[5]。苧麻经浓度为153 mg/kg的Cd处理后,会出现叶片变黄、黑斑等不良症状,生长发育也会受到明显抑制,但是其仍能完成正常的生长周期,这表明了苧麻对Cd胁迫具有良好的耐性[6] [7]。苧麻对Cd元素的富集是较均匀的分布在其根部、麻秆、麻皮及麻叶部位,并且土壤pH的下降会促进苧麻的麻秆、麻皮两个部位对Cd的吸收累积[8]。玉米对Cd有着较好的吸收作用,并且玉米吸收Cd的主要部位为根、茎、叶,而且间作能够有效促进玉米整体对Cd的吸收,但显著降低玉米籽粒中的Cd含量[9]。

由于植物修复存在生长较缓慢、植株较矮小的缺陷,为提高种植效率与玉米、苧麻生物量,减少玉米Cd富集量,选用Cd超富集植物苧麻作为非食用植物与玉米套种,这是较为理想的植物修复重金属污染土壤的方案。并且目前在玉米与重金属富集植物套种处理重金属污染土壤方面的相关研究较少。

本研究基于套作栽培技术,经大田种植试验,研究玉米与苧麻单作以及玉米与苧麻套作模式下各器官生物量、Cd含量、富集与转运系数,探讨苧麻与低累积玉米套作对Cd污染土壤的修复潜力,为受污染农田的边生产边修复提供理论依据与实验支撑。

2. 材料与方法

2.1. 实验设置

土壤采自四川某 Cd 污染试验田, 土壤类型为黄壤, 质地为壤土。试验于 2023 年 4 月~8 月进行, 植株于 4 月初进行播种, 8 月 10 日收获。供试玉米为课题组前期筛选的低积累品种川单 15, Cd 富集植物为荨麻科苧麻, 实验设置 4 个小区, 分别为空白组(无植物, CK0), 玉米单作(CKY), 苧麻单作(CKZ), 玉米苧麻套作(T1), 其中套作处理共 3 种处理方案, 玉米(Y)与苧麻(Z)种植行距设置为 60 cm, 玉米株距设置为 40 cm, 苧麻株距设置为 20 cm, 每个处理设重复实验, 每个小区面积规模为 4 × 8 m, 间作方案株间距为 1 m。取样时每组方案随机取样 6 组样品。种植过程定期浇水、施肥、除草和驱虫, 8 月收获取样, 玉米与苧麻整株采集, 同时点对点采集根际土进行处理与样品制作, 并对制作完成的样品进行分析。

2.2. 样品处理及分析

1) 植物样品的采集与制备

在玉米成熟期对各种植株进行采集, 各小区随机选取 6 个点采集长势一致的玉米与其他植株, 采取五点取样法, 在玉米成熟期对各种植株进行采集并记录株高、质量, 每小区取 6 株玉米, 分别将根、茎、叶、玉米粒装袋。苧麻样品同样按照五点取样法, 每小区每种植物各采 6 株长势具有代表性的苧麻, 将其根、茎、原麻分别装袋。

对每小区样品实收测产, 并对采集分装好后的样品用蒸馏水洗根、进行曝晒, 将晒干的不同植株的秸秆(茎与叶片)、籽粒烘干至恒重, 并利用粉碎机粉碎装袋备用。

2) 土壤样品的采集

分别取各处理的根际土, 带回实验室自然风干 1 个月, 风干后的土壤经研磨, 过 100 目筛后装袋备用。

3) 土壤基本理化性质分析

根据鲍士坦《土壤农化分析》(第三版)的测定方法[10], 结合农业部 NY/T1121 土壤检测系列标准, 测定土壤 pH (电位法)、总磷(酸溶——钼锑抗比色法)、有效磷(钼锑抗比色法)、速效钾(火焰光度计法)、总钾(NaOH 熔融法, 火焰光度法)、有机质(重铬酸钾容量法)、碱解氮(碱解扩散法)。

4) 土壤和植物镉含量的测定

植物各部分 Cd 含量采用 HNO₃-HClO₄ (V:V = 9:1)消化, 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定; 土壤 Cd 含量采用 HF-HNO₃-HClO₄ (V:V:V = 4:1:1)消化, ICP-MS 测定。运用此方法测定操作简便, 分析速度快, 硝酸使用量少, 对环境污染小且效率高[11]。

作物富集系数(BCF)指作物地上部分 Cd 含量与土壤中 Cd 含量的比值, 是作为描述 Cd 迁移能力与预测植物对重金属富集能力的指标之一, 其值越大表示植物富集积累能力越强, 农作物食品安全受到的威胁越大, BCF 的数值主要受土壤的重金属含量、有机质含量、pH 大小与 CEC 含量的影响, 其计算的公式(2.2.1)为:

$$BCF = \text{植物地上部分Cd含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) / \text{土壤Cd含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) \quad (2.2.1)$$

作物转运系数(TF)表示的是植物地上部分 Cd 含量与植物地下部分中 Cd 含量的比值, 反映植物吸收 Cd 后其在植物体内的转移能力, 其计算公式(2.2.2)为:

$$TF = \text{植物地上部分Cd含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) / \text{根Cd含量}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}) \quad (2.2.2)$$

2.3. 数据分析处理

所有数据采用方差分析, 比较差异显著性(表 1~5), 对植物体的富集系数(BCF)、转运系数(TF) (图 1)

进行对比分析。所有试验数据采用 SPSS5.0 统计分析, Excel2010 制图。

3. 结果与分析

3.1. 生物量

表 1 显示, 套种处理的苕麻的干重、根重、地上部分重量、株高生物量指标均显著上升($p < 0.01$)。上涨幅度 24.02%至 789.49%, 重量提升幅度较大, 株高小幅增长。根据邱丹等将玉米与蜈蚣草套作以修复砷污染农田土壤的实验, 其中开放式套作蜈蚣草的生物量显著提高, 地上部提高了 55.7% [12]; 陈国皓等将玉米与伴矿景天进行间套作处理, 伴矿景天单株生物量显著上升了 20.3%~73.4% [13]; 可以推测, 将超富集植物与玉米套作, 会提升超富集植物的生物量。因此, 苕麻的生物量提升的结果是可信的。

Table 1. Biomass indexes of ramie with different planting treatments

表 1. 不同种植处理方式苕麻的生物量指标

处理方式(平均值 ± 标准差)	CKZ (n = 6)	Z (n = 6)	F	p
植物干重(g)	21.86 ± 5.06	191.00 ± 45.06	83.504	0.000**
根重(g)	1.37 ± 0.71	9.55 ± 3.86	26.009	0.000**
地上部分重量(g)	20.49 ± 5.00	181.45 ± 45.28	74.921	0.000**
株高(cm)	175.83 ± 11.32	219.00 ± 13.11	37.247	0.000**

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

表 2 显示, 套种处理后的玉米的干重和根重生物量指标显著下降($p < 0.05$)。套作处理在一定程度上使得玉米的根重与地上部重量(整体干重 = 根重 + 地上部重量)下降, 幅度为 15.81%, 为小幅度下降, 考虑苕麻重量的大幅提升, 在一定程度上使得玉米的整体重量有所下降, 玉米套作处理后的有效磷虽未显著下降, 但考虑样本数量仅为 6, 且均值下降 50%左右, 考虑是苕麻玉米套作, 使得玉米有效磷下降进而使得玉米重量下降。

Table 2. Biomass index of maize under different planting treatments

表 2. 不同种植处理方式玉米的生物量指标

处理方式(平均值 ± 标准差)	CKY (n = 6)	Y (n = 6)	F	p
植物干重(g)	488.00 ± 59.73	410.83 ± 45.10	6.378	0.030*
根重(g)	20.01 ± 4.63	14.35 ± 2.23	7.277	0.022*
地上部分重量(g)	467.99 ± 57.55	396.49 ± 44.20	5.826	0.036*
株高(cm)	221.00 ± 13.65	230.33 ± 10.33	1.783	0.211

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

3.2. 玉米、苕麻根际土与各器官中 Cd 的含量变化

表 3 显示, 套种处理后苕麻的茎部和果实部对 Cd 的富集量显著下降($p < 0.05$)。根部与根际土的重金属 Cd 含量没有显著变化。王家悦等利用 Cd 高积累番茄与玉米间作, 结果显示间作后番茄根、茎、叶中

Cd 含量均有所提高[14], 刘海军等将马唐与玉米间作, 发现间作马唐积累的镉高于单作马唐[15], 在 Caifang Wu 等的研究中表明将龙葵、双叶茄与树番茄间套种, 结果显著降低树番茄幼苗的镉含量[16], 在重金属富集植物花叶滇苦菜和玉米的套作实验中, 两种植物的生物量均上升, 花叶滇苦菜对重金属 Cd 的富集能力得到一定提升, 同时玉米中的重金属 Cd 含量下降[17]; 但在 Zhihua Xiao 等的研究中发现和黑麦草间作促进了油菜镉的积累[18], 冯子龙将玉米与香根草、伴矿景天间作探究其对重金属 Cd 污染土壤的修复效果的研究, 发现伴矿景天、香根草与玉米间套种抑制了伴矿景天对 Cd 的吸收, 相比于单作, 降低幅度最高可达 65.86% [9]。因此, 在植物间套种修复镉污染土壤的大田实验中, 有的方案能够促进高富集植物对镉的富集吸收, 有的也不能达到很好的处理吸附效果, 对修复镉污染土壤没有增益。

Table 3. Cadmium enrichment of ramie rhizosphere soil and organs under different planting treatments

表 3. 不同种植处理方式苕麻根际土以及各器官对镉的富集量

处理方式(平均值 ± 标准差)	CKZ (n = 6)	Z (n = 6)	F	p
根际土壤重金属 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	1.78 ± 0.26	2.01 ± 0.49	1.123	0.314
植物根部 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	2.50 ± 0.56	2.03 ± 0.42	2.426	0.154
植物茎部 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	2.50 ± 0.69	1.20 ± 0.38	16.169	0.002**
植物果实部 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	1.65 ± 0.27	1.07 ± 0.38	9.407	0.012*

*p < 0.05, **p < 0.01。

本实验苕麻玉米套作方案中, 苕麻对 Cd 的吸收下降幅度为 45.3%, 相比其他修复镉污染土壤的套作方式, 苕麻与玉米套作方案不是最佳的方案, 但为研究超富集植物与玉米套作边生产边修复镉污染土壤提供了一项值得改进和考虑的方案。

Table 4. Cadmium enrichment in maize rhizosphere soil and organs under different planting treatments

表 4. 不同种植处理方式玉米根际土以及各器官对镉的富集量

处理方式(平均值 ± 标准差)	CKY (n = 6)	Y (n = 6)	F	p
根际土壤重金属 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	1.84 ± 0.04	2.76 ± 0.71	10.148	0.010**
植物根部 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	1.38 ± 0.18	1.37 ± 0.66	0	0.987
植物茎部 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	0.42 ± 0.14	0.77 ± 0.45	3.295	0.1
植物叶部 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	1.51 ± 0.27	4.20 ± 2.23	8.662	0.015*
植物果实部 Cd 含量(mg·kg ⁻¹)	0.38 ± 0.23	0.28 ± 0.03	1.134	0.312

*p < 0.05, **p < 0.01。

表 4 显示, 套种处理后的玉米的根际土壤 Cd 含量显著上升(p < 0.01), 提升幅度为 50%, 叶部 Cd 含量显著上升(p < 0.05), 提升幅度为 178.15%, 其余部位没有显著变化。果实部位的 Cd 含量有所下降, 虽未呈显著变化, 但过半样品的 Cd 含量均小于单作的值, 如果后续加大样品的采集量, 排除其余干扰, 或许能得出果实部位 Cd 含量显著下降的结果。且有可能是土壤 pH 值和 Cd 总量等关键因子可以掩盖其它土壤性质对 Cd 在籽粒中积累的贡献[19]。

Table 5. Concentrations of cadmium in shoots and roots of a single plant with different planting treatments
表 5. 不同种植处理方式单个植株地上部与根部对镉的富集量

处理方式	苕麻			玉米		
	CKZ	Z	P	CKY	Y	P
根	0.0027 ± 0.0009	0.0210 ± 0.0053	0.000**	0.0281 ± 0.0094	0.0206 ± 0.0128	0.272
地上部	0.0862 ± 0.0290	0.4174 ± 0.1741	0.001**	1.0794 ± 0.2006	2.0692 ± 0.9748	0.035*

*p < 0.05, **p < 0.01。

根据植物根部重量(g)与地上部重量(g)与相应部位对 Cd 的富集量(ppm)的乘积, 计算出不同种植方式单个植株相应部位对 Cd 的富集总量, 如表 5, 结果显示苕麻在套种处理后, 其单个植株对 Cd 的富集总量显著提升(p < 0.01), 单个植株所富集的镉总量(mg)量提升 3.84 倍~6.78 倍, 效果显著; 单个玉米根部 Cd 总量(mg)没有显著变化, 地上部总量提升 1 倍(p < 0.05), 主要提升部位为玉米的叶部, 提升了 1.8 倍, 主要原因考虑为套种使得玉米根际土中的 Cd 含量增加进而使得玉米富集的 Cd 含量增加。

可以考虑添加可降解整合剂提高 Cd 污染土壤中玉米的植物修复效率[20], 也可以施加不同的氮肥来提升套作系统中玉米各器官的生物量, 以及不同的氮肥施用量来提升超富集植物对 Cd 的富集并降低玉米对 Cd 的富集浓度[21]; 也可以添加钝化剂使玉米与超富集植物套作系统生物量增大, 从而减少玉米植株对 Cd 的富集[13]。因此, 单纯的将苕麻与玉米套作, 不添加其他促进措施, 在一定程度上能够显著提升苕麻的生物量以及对 Cd 的富集总量, 但同时玉米的生物质量会有所下降, 并且叶部 Cd 富集量会有所上升, 故此方案需要在套种过程中添加其他促进利好的措施以达到良好效果。

3.3. 土壤理化性质

各处理后土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量分别在 6.07~6.23、17.18~32.81、27.67~37.88、18.24~26.61 以及 241.15~366.43 之间(表 6)。整体表现为 T1 > CKY > CKZ > CK0, 说明种植植物对土壤营养成分有一定的提升, 套作要优于单作。

Table 6. Basic physical and chemical properties of soil
表 6. 土壤基本理化性质

指标	CK0 (n = 6)	CKY (n = 6)	CKZ (n = 6)	T1 (n = 6)
pH	6.07 ± 0.38	5.87 ± 0.49	6.60 ± 0.38	6.23 ± 0.40
有机质(g·kg ⁻¹)	17.18 ± 2.39	22.29 ± 4.57	20.15 ± 7.93	32.81 ± 5.83
碱解氮(mg·kg ⁻¹)	27.67 ± 2.32	33.88 ± 12.05	30.59 ± 9.22	37.88 ± 5.69
有效磷(mg·kg ⁻¹)	18.24 ± 4.08	22.02 ± 24.27	22.55 ± 1.86	26.61 ± 1.10
速效钾(mg·kg ⁻¹)	241.15 ± 19.70	292.56 ± 16.76	250.32 ± 31.00	366.43 ± 24.31

3.4. 不同种植处理方式苕麻和玉米的富集与转运系数变化

不同种植处理方式的苕麻、玉米的 Cd 富集系数与位移系数计算结果如图 1, 由图 1 可知套种处理后苕麻的 BCF 系数有所下降, 下降幅度达 39.77%, 玉米的 BCF 系数反而有所上升, 上涨幅度达 128%; 苕麻的 TF 系数有所下降, 相反, 玉米的 TF 系数有所上升, 上涨幅度超过 1 倍。虽土壤中的有效态 Cd

与土壤 pH 值呈负相关的关系[22], 但本研究 pH 没有显著变化, 因此排除 pH 的干扰; 且在伴矿景天与玉米套作的实验中, 伴矿景天地上部、地下部 Cd 含量均有提高, 但玉米各部位 Cd 含量没有显著改变, 但玉米 Cd 含量在收获期会有所下降[22], 故针对本实验中苧麻、玉米富集位移系数的变化, 考虑为在种间关系, 采集时间[23], 施肥方式[21]等复合情况共同影响下导致的结果。

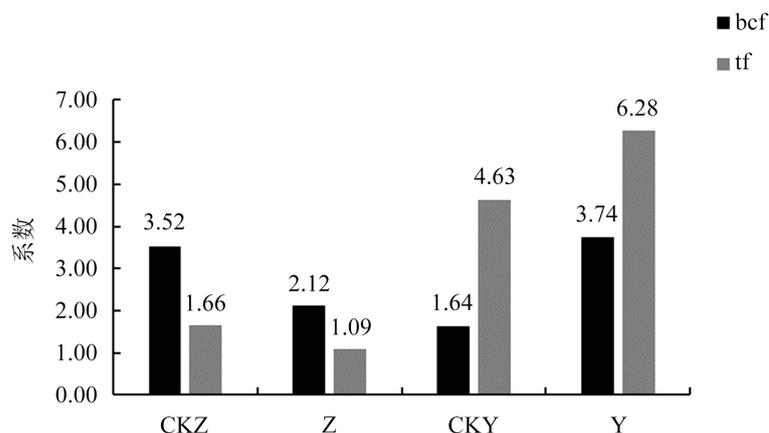


Figure 1. Concentration coefficient (BCF) and transport coefficient (TF) of ramie and maize in different planting treatments

图 1. 不同种植处理方式苧麻和玉米的富集系数(BCF)、转运系数(TF)

4. 结论

本文采用盆栽试验, 通过玉米套作苧麻的处理, 对玉米各器官 Cd 含量以及根际土 Cd 全量与有效态含量进行了测定与分析, 研究结果表明:

1) 与单作相比, 套作玉米高度变化不显著, 而苧麻高度增加了 24.02%; 玉米与苧麻套作, 玉米的质量显著($p < 0.05$)下降 15.81%, 而苧麻质量大幅度提高 789.49%, 且差异达到显著水平($p < 0.05$)。苧麻与玉米套作对两种植物的总体生物量呈增益效果, 能有效促进生物量。

2) 套作使得玉米叶部 Cd 含量上升 178.15%, 差异达到显著水平($p < 0.05$), 根际土中 Cd 含量提高了 49.95%; 苧麻茎部、果实部的 Cd 含量分别下降 52%、34.73%。套作对苧麻整体吸收 Cd 的含量有显著增益, 增幅可达 3.84 倍~6.78 倍, 但同时会小幅提升玉米叶部对 Cd 的富集量。

3) 玉米苧麻套作系统使得玉米 BCF 上涨 128.05%, 苧麻 BCF 降低下降 39.77%; 玉米 TF 提高 35.64%, 苧麻 TF 下降 39.77%。

采用苧麻作为非食用植物与玉米套种, 以提高种植效率和减少玉米中镉(Cd)的富集量, 是一种创新的植物修复重金属污染土壤的方案。这种方法不仅可以利用苧麻对重金属的高富集能力, 还能通过其较快的生长速度来提高整体种植效率。从现有的研究来看, 虽然关于苧麻和玉米套种的具体研究较少, 但已有的实践表明, 这种模式在实际应用中是可行的, 并且已经在一些地区进行了试点。

此外, 苧麻作为一种快速生长的植物, 其生物量高, 有助于在短时间内显著提高土地的利用效率和农作物的产量。采用苧麻和玉米的套种方式, 可以在一定程度上通过植物吸收和固定土壤中的重金属, 从而降低这些重金属在玉米中的积累。

总之, 将苧麻与玉米进行套种, 不仅可以提高种植效率, 还可以有效减少重金属在玉米中的富集, 是一种具有潜力的植物修复重金属污染土壤的创新方案。未来的研究应更多关注这种模式的具体实施效果, 以及如何进一步优化这一模式以达到最佳的环境修复效果。

基金项目

中国电建集团科研项目资助(P42819, DJ-ZDXM-2019-42)。

参考文献

- [1] 刘星, 刘晓文, 吴颖欣, 等. 农用地重金属污染植物提取修复技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(4): 507-513.
- [2] 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 等. 镉胁迫对不同基因型玉米生长和镉吸收分配的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1440-1447.
- [3] 陈铭孙, 李择桂, 林贤柯, 等. 低镉铅甜玉米品种筛选及在间套种修复污染土壤中的应用[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 285-289.
- [4] 郝冬梅, 邱财生, 龙松华, 等. 麻类作物在重金属污染耕地修复中的应用研究进展[J]. 中国麻业科学, 2019, 41(1): 36-41.
- [5] 李玉兰, 陈坤梅, 喻春明, 等. 镉胁迫下苧麻生理生化变化规律及品种间差异比较[J]. 中国麻业科学, 2017, 39(3): 105-110.
- [6] 林欣, 张兴, 朱守晶, 等. 苧麻对重金属 Cd 污染的耐受和富集能力研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(17): 145-150.
- [7] 杨叶萍. 镉胁迫下苧麻(*Boehmeria nivea*)的生理生态适应性研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2016: 41-42.
- [8] 刘冲, 赵玲, 李秀华, 傅赵聪, 刘方, 滕应. 苧麻对农田土壤中汞、镉的吸收累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1034-1042.
- [9] 冯子龙. 玉米与香根草、伴矿景天间作对重金属 Cd、Pb 污染土壤的修复研究[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州大学, 2017: 35-41.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114, 370-380.
- [11] 徐芳. 电感耦合等离子体质谱法测定苧麻不同部位的铬、砷、镉、铅 4 种重金属元素含量[J]. 分析测试技术与仪器, 2018, 24(2): 77-80.
- [12] 邱丹, 杜芮萍, 孟德凯, 等. 玉米套作蜈蚣草修复砷污染农田土壤的效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 101-107.
- [13] 陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 等. 钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2103-2110.
- [14] Wan, J.Y., Bao, H., Peng, W.H., *et al.* (2020) Effects of Intercropping on Cadmium Uptake by Maize and Tomato. *Chinese Journal of Biotechnology*, **36**, 518-528.
- [15] 刘海军, 陈源泉, 隋鹏, 等. 马唐与玉米间作对镉的富集效果研究初探[J]. 中国农学通报, 2009, 25(15): 206-210.
- [16] Wu, C., Huan, Y., Yang, L., Lin, L., Liao, M., Wang, J., *et al.* (2020) Effects of Intercropping with Two *Solanum* Species on the Growth and Cadmium Accumulation of *Cyphomandra betacea* Seedlings. *International Journal of Phytoremediation*, **22**, 1242-1248. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1759505>
- [17] Qin, L., Yuan-Qun, Z.U., Zhan, F.D., *et al.* (2013) Absorption and Accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill and Maize in Intercropping Systems. *Journal of Agro-Environment Science*, **32**, 471-477.
- [18] Xiao, Z., Zou, D., Zeng, X., Zhang, L., Liu, F., Wang, A., *et al.* (2020) Cadmium Accumulation in Oilseed Rape Is Promoted by Intercropping with Faba Bean and Ryegrass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **205**, Article 111162. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111162>
- [19] Zhuang, Z., Niño-Savala, A.G., Mi, Z., Wan, Y., Su, D., Li, H., *et al.* (2021) Cadmium Accumulation in Wheat and Maize Grains from China: Interaction of Soil Properties, Novel Enrichment Models and Soil Thresholds. *Environmental Pollution*, **275**, Article 116623. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116623>
- [20] Yang, Q., Yang, C., Yu, H., Zhao, Z. and Bai, Z. (2021) The Addition of Degradable Chelating Agents Enhances Maize Phytoremediation Efficiency in Cd-Contaminated Soils. *Chemosphere*, **269**, Article 129373. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129373>
- [21] 霍文敏. 不同间作模式及施肥处理对玉米吸收 Cd 的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2019: 23-42.

- [22] 彭曦. 镉污染农田土壤植物修复的强化措施及其效果研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南师范大学, 2020: 41-51.
- [23] Wen, Q.H. and Yu, L.H. (2006) The Ability of Accumulate Cadmium and the Best Harvest Time of Six Series Maize Inbred Lines in Cd-Contaminated Soil. *Acta Ecologica Sinica*, **26**, 4066-4070.