



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

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, 陈璘涵, 杨洋, 袁婧, 陈奕暄, 杨耀东, 曾清如

引用本文:

涂鹏飞, 谭可夫, 陈涵, 等. 红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤Cd的能力[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 609-614.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外来入侵植物黄顶菊生长及生理生态特性对镉胁迫的响应

张思宇, 田佳源, 祁小旭, 刘红梅, 杨殿林, 王慧

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 445-452 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0091>

成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价

刘海涛, 陈一兵, 田静, 林超文

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 184-191 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0164>

不同叶用黄麻种质对重金属吸附的差异及其机制分析

邓灿辉, 唐靖, 戴志刚, 杨泽茂, 程超华, 许英, 陈小军, 刘婵, 陈基权, 粟建光

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 438-444 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0523>

水氮处理对复播油葵产量和水氮利用效率的影响

谈建鑫, 景峰, 刘建国

农业资源与环境学报. 2015, 32(5): 456-462 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0032>

沈抚灌区耕地重金属Cd、Pb的变化特征分析

徐宁, 魏忠义

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 783-791 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0129>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

涂鹏飞, 谭可夫, 陈璘涵, 等. 红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤Cd的能力[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 609–614.

TU Peng-fei, TAN Ke-fu, CHEN Lin-han, et al. Ability of red leaf beet-peanut and oil sunflower-peanut rotation patterns to remediate soil Cd[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 609–614.



开放科学 OSID

红叶甜菜-花生和油葵-花生轮作修复土壤Cd的能力

涂鹏飞¹, 谭可夫¹, 陈璘涵¹, 杨 洋², 袁 婧², 陈奕暄¹, 杨耀东¹, 曾清如^{1,2*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128)

摘 要: 利用生物量高的经济作物进行轮作, 可在加快修复土壤Cd污染进程的同时获得一定的经济效益。本研究在长沙市望城区群力村Cd轻度污染的土壤进行冬季种植红叶甜菜、夏季复种植花生和春末种植油葵、夏季复种植花生的轮作模式试验, 探究重金属修复潜力。结果表明: 花生、油葵、红叶甜菜各部位Cd富集系数除花生果实外均大于1, 对Cd均有较强的富集能力。油葵-花生、红叶甜菜-花生轮作模式种植一季可提取土壤Cd总量分别为40.80 g·hm⁻²和53.34 g·hm⁻²。红叶甜菜-花生轮作将土壤Cd含量由0.316 mg·kg⁻¹降至0.286 mg·kg⁻¹, 油葵-花生轮作一季将土壤Cd含量由0.316 mg·kg⁻¹降至0.283 mg·kg⁻¹。研究表明, 红叶甜菜-花生、油葵-花生轮作模式均对土壤重金属Cd有较好的修复潜力。

关键词: 植物修复; 镉; 土壤; 轮作; 花生; 红叶甜菜; 油葵

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)04-0609-06

doi: 10.13254/j.jare.2019.0065

Ability of red leaf beet-peanut and oil sunflower-peanut rotation patterns to remediate soil Cd

TU Peng-fei¹, TAN Ke-fu¹, CHEN Lin-han¹, YANG Yang², YUAN Jing², CHEN Yi-xuan¹, YANG Yao-dong¹, ZENG Qing-ru^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. College of Bioscience and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Rotation of cash crops with large biomass can accelerate the process of soil Cd pollution remediation and achieve certain economic benefits. In this study, two plant rotation patterns were carried out in soil mildly contaminated with Cd (Qunli Village, Wangcheng District, Changsha City, China) to explore their remediation potential for heavy metal pollution in soil. The red leaf beet and peanuts were grown in winter and summer, respectively, for the first pattern and the oil sunflower and peanuts were planted in late spring and summer, respectively, for the second pattern. The experiment results demonstrated that, except peanut seed, the Cd bioaccumulation coefficients in all parts of peanut, oil sunflower, and red leaf beet were greater than 1, exhibiting superior Cd accumulation ability. The total amount of soil Cd extracted in the rotation cultivation mode of oil sunflower-peanut and red leaf beet-peanut was 40.80 g·hm⁻² and 53.34 g·hm⁻², respectively. Red leaf beet-peanut rotation could reduce the content of Cd from 0.316 mg·kg⁻¹ to 0.286 mg·kg⁻¹, and oil sunflower-peanut rotation could reduce the content of Cd from 0.316 mg·kg⁻¹ to 0.283 mg·kg⁻¹ in soil. Both rotation patterns showed considerable capability for the remediation of Cd contaminated soil.

Keywords: phytoremediation; cadmium; soil; rotation; peanuts; red leaf beet; oil sunflower

收稿日期: 2019-02-03 录用日期: 2019-04-23

作者简介: 涂鹏飞(1993—), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 从事农田土壤重金属修复研究。E-mail: 905383771@qq.com

*通信作者: 曾清如 E-mail: qzeng@163.com

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFD0800807); 长沙市科技计划项目(kq1801025); 国家自然科学基金项目(41701366)

Project supported: The National Key Research and Development Program (2016YFD0800807); Changsha Plan Project of Science and Technology (kq1801025); The National Natural Science Foundation of China (41701366)

我国农田重金属污染问题日益严重^[1-2]。农田土壤重金属的持续输入及不断积累已致我国0.1亿hm²的耕地受到不同程度的重金属污染,其中又以Cd污染最为严重,约占重金属污染土地面积的56.9%^[3-6]。土壤重金属污染可能导致作物重金属超标,长期食用这些重金属超标的作物会对人体造成相当大的危害,重金属污染问题已经严重威胁到国民健康^[7-10]。

目前较为成熟的重金属污染治理方法有工程治理、化学治理、生物治理(微生物和植物治理)^[11]。工程治理、化学治理由于其局限性不能大规模推广,而植物修复由于其绿色安全、经济环保而引起学术界的广泛关注^[12-14]。程晨等^[15]研究发现在种植两季、三季伴矿景天后,后茬低Cd水稻Cd含量仅为0.03 mg·kg⁻¹,后茬高Cd水稻品种在添加钝化剂后Cd含量也能降低至0.2 mg·kg⁻¹。单一超富集植物对土壤重金属富集能力虽强,但地上部分生物量小,因此总提取量有限。且因其对生长环境要求高、缺乏经济价值、田间管理难度大等缺点,难以在土壤重金属修复实践中大范围推广。因此寻找富集能力强、生物量较大,并且有一定经济价值的作物来修复土壤重金属污染是当前的研究热点^[16]。杨洋等^[17]研究发现向日葵和油菜在生物量上有显著的优势,且在修复的同时可以产生一定经济效益。朱俊艳等^[18]研究发现在油菜-海州香薷轮作体系中两茬植物对土壤中的Cd与Cu都有一定的活化作用,能促进植物吸收重金属。

红叶甜菜、花生、油葵是较为常见的农产品^[19-22],且具有较高的生物量和良好的经济价值。本试验选用这三种经济作物,在长沙市望城区桥驿镇群力村的重金属污染土壤上进行实验,通过冬季种植红叶甜菜、夏季复种植花生和春末种植油葵、夏季复种植花生两种轮作模式,计算作物Cd富集能力、Cd提取总量等指标来探究两种轮作模式的修复潜力。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

本试验地点位于湖南省长沙市望城区桥驿镇群力村(28°26′22.53″N, 112°57′21.85″E),该村附近有长沙市最大的黑麋峰垃圾填埋场,填埋的垃圾渗滤液会渗透并污染地下水资源。附近农田长期使用污水灌溉种植,导致该地重金属含量超标,已经威胁到作物安全和人体健康。本试验所用土壤的有机质(OM)、阳离子交换量(CEC)分别为33.43 g·kg⁻¹和11.17 cmol·kg⁻¹,pH值为5.56,属于酸性土壤,Pb、Zn、Cu含量分别

为46.96、85.00、14.93 mg·kg⁻¹,按国家酸性土壤污染标准参考二级标准,均未超标,而该地Cd含量为0.316 mg·kg⁻¹,超过国家标准(0.3 mg·kg⁻¹),CaCl₂提取态Cd为0.137 mg·kg⁻¹,属于Cd轻度污染区域。

1.2 试验设计

红叶甜菜-花生和油葵-花生每组轮作模式设置三个独立平行小区,在试验地划分6块6 m×6 m的小区。第一季分别种植红叶甜菜(种植密度30 cm×30 cm)和油葵(种植密度50 cm×30 cm)。红叶甜菜和油葵收获后,将土壤深翻均匀,复种植花生(种植密度30 cm×20 cm)于之前的轮作土壤上。每块试验地随机在收获时采集5株植物样品进行后处理。

1.3 样品的采集和分析方法

通过五点采样法均匀采取试验地里0~20 cm深度的土样,去除大块杂物石块并风干。四分法多次混匀后,用研钵磨粉碎,分别过10目和100目筛,待测土壤理化性质。将收获的植物样品洗净烘干后称量各个部位干质量,用粉碎机粉碎过100目筛,待测植物中的Cd含量。

采用HNO₃、HF、HClO₄和H₂O₂消解定容,测定土壤重金属含量^[22]。生物有效态Cd的测定使用TCLP溶液、0.1 mol·L⁻¹ HCl(V/m=5:1),0.1 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液(V/m=5:1)提取,石墨炉原子吸收分光光度计(240 Z AA, Agilent Technologies公司)和电感耦合等离子源自发射光谱仪(ICP-OES optima 8300,美国PE公司)测定^[23]。

1.4 修复潜力的计算(Cd去除总量和土壤Cd含量)

Cd的富集系数(BCF)=植物各部位Cd的含量/土壤中Cd的含量。

转运系数(TF)=植物各部位Cd的含量/根部Cd的含量。

植物提取Cd总量=植物地上部Cd的含量×植物地上部质量+植物地下部Cd的含量×植物地下部质量。

1.5 数据分析

数据采用Excel 2016、SPSS 19.0进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 两种轮作模式下的Cd积累

由表1、图1、图2可知,在作物各组分中,红叶甜菜叶片对Cd的富集能力最强,为3.440 mg·kg⁻¹,是土壤Cd本底值的10.89倍,红叶甜菜各部位的Cd含量均大于1.000 mg·kg⁻¹,BCF值均大于1。从转移系数TF来看,红叶甜菜茎、叶的TF值分别为1.64和3.37,均大于1,这表明红叶甜菜具有很强的Cd转运能力。

两种模式中花生各部位Cd含量分布呈现茎>叶>根>果壳>果实的特点。红叶甜菜-花生模式下花生茎、叶Cd含量略高,其中茎Cd含量最高,为2.771 mg·kg⁻¹。除了果实之外,花生的根、茎、叶、果壳BCF值均大于1,其茎、叶的转运系数TF均大于1,表明Cd更多地向茎和叶中输送。油葵中Cd含量最高的部位为果

实和叶,富集系数都大于6。除果壳外,油葵的TF均大于1,表现出较强的Cd富集能力。

2.2 两种轮作模式修复潜力的比较

本试验的三种作物在轻度Cd污染土壤下生长正

表1 作物各部位Cd含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Cd content of each component in crops(mg·kg⁻¹)

作物部位 Crop component	红叶甜菜-花生轮作 Red leaf beet-peanuts		油葵-花生轮作 Oil sunflower-peanuts	
	红叶甜菜 Red leaf beet	花生 Peanuts	油葵 Oil sunflower	花生 Peanuts
根	1.021±0.103	0.593±0.102	1.002±0.143	0.548±0.064
茎	1.668±0.084	2.771±0.422	1.301±0.202	2.285±0.523
叶	3.440±0.116	1.819±0.070	2.080±0.270	1.771±0.292
壳	—	0.323±0.048	0.743±0.104	0.321±0.060
果实	—	0.151±0.042	2.120±0.246	0.158±0.052
花盘	—	—	1.203±0.167	—

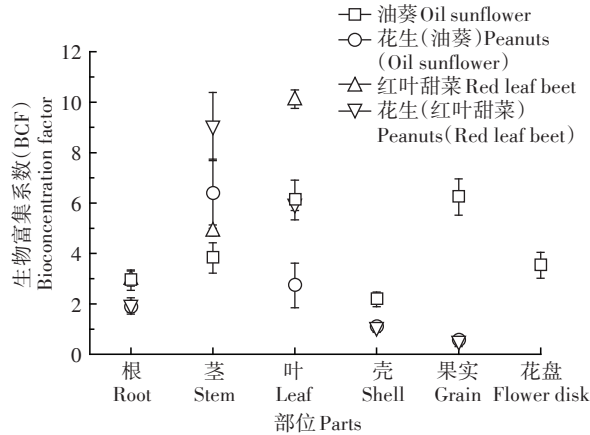


图1 作物各部位BCF值

Figure 1 BCF values of different parts of crop

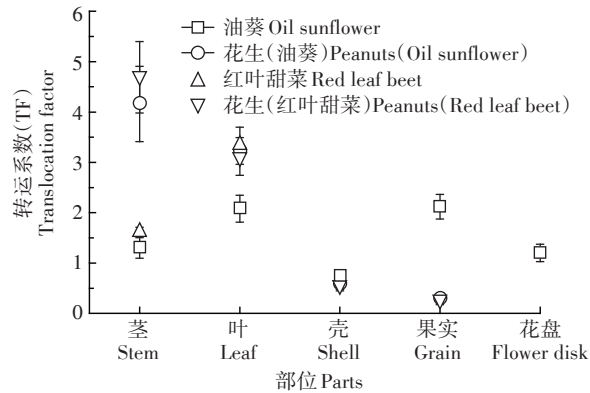


图2 作物各部位TF值

Figure 2 TF values of different parts of crops

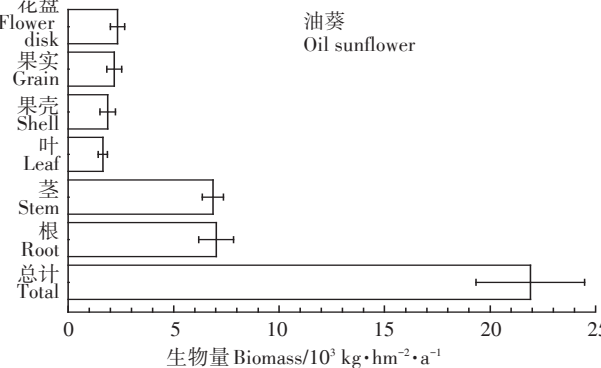
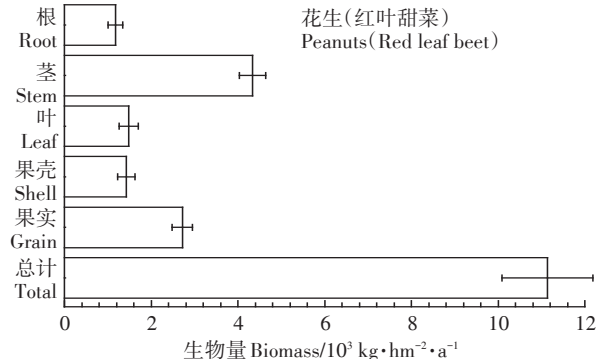
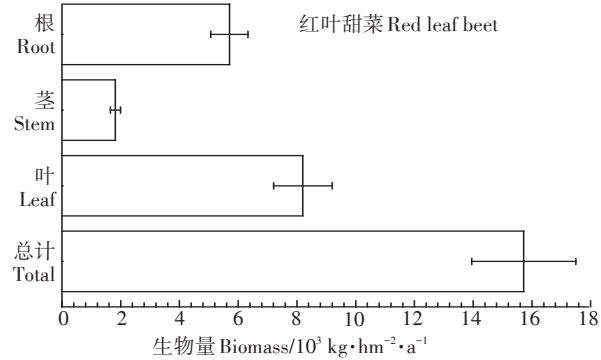


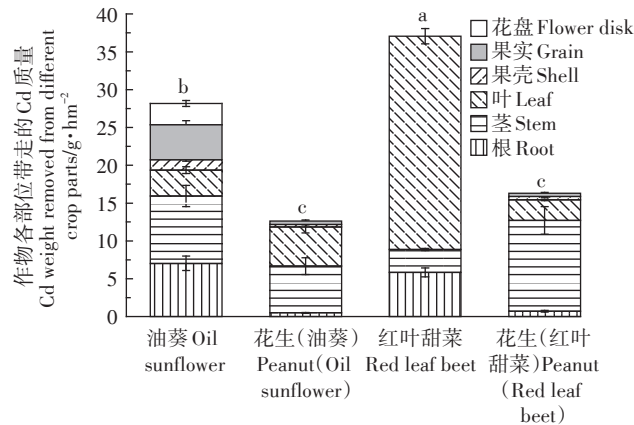
图3 作物各部位干质量

Figure 3 Dry weight of each component of crops

常。红叶甜菜、油葵、花生生物量如图3所示。油葵的生物量最大,其次是红叶甜菜、花生。油葵、花生果实产量为2 183.34、2 969.18 kg·hm⁻²·a⁻¹。每公顷油葵、花生、红叶甜菜干物质量均大于10 t,远高于超富集作物的公顷质量。

由图4可知在红叶甜菜-花生模式下,红叶甜菜一季可带走Cd 37.07 g·hm⁻²;种植一季花生可以带走Cd的量为16.27 g·hm⁻²;轮作一季红叶甜菜-花生可带走Cd的量为53.34 g·hm⁻²。在油葵-花生模式下,油葵每年能提取的Cd的量为28.17 g·hm⁻²。在油葵-花生轮作模式下,花生种植一季可以带走Cd 12.63 g·hm⁻²;轮作一季油葵-花生可带走的Cd的量是40.80 g·hm⁻²。该模式带走的Cd总量低于红叶甜菜-花生模式。

由表2可知,在红叶甜菜-花生轮作模式下,种植完一季红叶甜菜土壤Cd含量由原始0.316 mg·kg⁻¹下



不同字母表示不同作物提取Cd总量间差异显著($P<0.05$)
Different letters indicate significant differences in total Cd extracted from different crops ($P<0.05$)

图4 种植一季作物各部位带走的Cd质量

Figure 4 Amount of Cd taken away by different crop parts

降至0.300 mg·kg⁻¹,种植完花生后,土壤Cd下降至0.286 mg·kg⁻¹,具有显著性差异,说明红叶甜菜-花生模式对于土壤Cd污染具有较好的修复效果。轮作一季红叶甜菜和花生后土壤Cd由0.316 mg·kg⁻¹下降至0.286 mg·kg⁻¹,符合国家标准(0.3 mg·kg⁻¹)。在油葵-花生轮作模式下,种植一季油葵后,土壤Cd下降至0.296 mg·kg⁻¹,具有显著性差异。在该土壤复种植花生后,土壤Cd降至0.283 mg·kg⁻¹,符合国家标准。两种轮作模式经过三种浸提液提取发现CaCl₂浸提液提取态Cd显著下降;HCl提取态Cd在轮作前后无显著差异;TCLP提取态Cd在油葵-花生模式下含量显著下降,红叶甜菜-花生模式下无显著差异。

3 讨论

研究发现,油葵的耐受性和富集能力较高,在Cd污染植物修复中可优先选用^[24]。与超富集植物相比,利用红叶甜菜-花生、油葵-花生这两种轮作模式来修复Cd污染的农田既可以有效地去除土壤Cd,减轻环境危害,又能在收获农作物后及继续利用,带来经济效益,这种治理方法是可行的^[25]。

每公顷油葵、花生、红叶甜菜干物质量远大于超富集作物,如天蓝遏蓝菜(0.9 t·hm⁻²)^[26],花生、油葵、红叶甜菜对Cd的富集系数除果实外都大于1,油葵-花生、红叶甜菜-花生能带走40.80 g·hm⁻²和53.34 g·hm⁻²,土壤Cd由0.316 mg·kg⁻¹降至国家安全标准以下。说明这两种模式能对农田Cd污染进行有效的修复,在轻度Cd污染情况下能有效地带走Cd。

谢华等^[27]在研究中发现0.670 mg·kg⁻¹ Cd土壤浓度下皇竹草富集系数(2.38)和作物体内Cd含量(1.690 mg·kg⁻¹)均不及花生、油葵和红叶甜菜。重金属超标的红叶甜菜经过一系列脱毒达标后可以当饲料使用。分析表明花生、油葵果实提取的油中重金属

表2 轮作前后土壤Cd含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 Concentration of Cd before and after rotation in soil (mg·kg⁻¹)

轮作模式 Rotation pattern	土壤Soil	总Cd Total Cd	CaCl ₂ 提取态Cd Cd extracted by CaCl ₂	HCl提取态Cd Cd extracted by HCl	TCLP提取态Cd Cd extracted by TCLP
红叶甜菜-花生	原始土壤	0.316±0.005a	0.137±0.004a	0.165±0.030a	0.128±0.004a
	收获红叶甜菜	0.300±0.006b	0.126±0.001b	0.152±0.020a	0.120±0.005a
	收获花生	0.286±0.006cd	0.120±0.008bc	0.147±0.030a	0.115±0.011ab
油葵-花生	收获油葵	0.296±0.004bc	0.121±0.005bc	0.149±0.030a	0.115±0.009ab
	收获花生	0.283±0.001d	0.112±0.007c	0.146±0.010a	0.108±0.013b

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column show significant differences among treatments ($P<0.05$).

并不超标,重金属富集在粕饼中,对粕饼进行脱毒后可再利用^[28]。对花生、油葵秸秆进行废物利用^[29],可以带来经济收益,解决秸秆后处理困难的问题。苏慧等^[30]介绍了化学强化和农艺措施强化植物修复的方法,Wei等^[31]研究发现合理增加尿素施用量可以增加蒲公英产量且不降低植物体内Cd含量,蒲公英带走的Cd总量增加3~5倍。Pietro等^[32]研究发现在冬天利用白羽扇豆与适当作物轮作可以促进土壤质量的恢复,采用农艺措施代替土壤添加剂可以提升植物修复效率。

本研究讨论了红叶甜菜、油葵、花生的修复潜力,冬季种植红叶甜菜、春季种植油葵、夏季种植花生这种四季轮作模式,在有效修复土壤Cd污染同时还能创造一定的经济价值。在本研究基础上通过化学生物农业强化技术加速土壤重金属Cd的修复效率,将是下一步的重点研究工作。本研究为一年或一个轮作周期的试验结果,长期效应还有待进一步探索。

4 结论

(1)红叶甜菜、花生、油葵对重金属Cd的富集系数虽不及超富集植物,但其具有较高的生物量和较强的富集能力,田间管理难度相对较小且能带来一定的经济效益,因此更适合作为农田Cd污染修复植物。油葵-花生、红叶甜菜-花生能带走 $40.80\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $53.34\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的土壤Cd,土壤Cd含量由 $0.316\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至国家安全标准以下。这两种模式均对农田Cd污染有较好的修复潜力。

(2)两种轮作模式的作物都能在试验农田上正常生长,且生物量高,能有效地提取土壤中的Cd。在轻微Cd($0.300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右)污染土壤条件下经过一季轮作可将土壤Cd含量降至国家安全标准以下。

参考文献:

- [1] Sun Y, Zhou Q, Xu Y, et al. Phytoremediation for co-contaminated soils of benzo[a]pyrene (B[a]P) and heavy metals using ornamental plant *Tagetes patula*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2/3):2075-2082.
- [2] Zhang Z, Rengel Z, Chang H, et al. Phytoremediation potential of *Juncus subsecundus*, in soils contaminated with cadmium and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Geoderma*, 2012, 175/176(1):1-8.
- [3] 陈玉梅, 和苗苗, 宁皎莹, 等. 蔬菜地重金属镉污染植物修复研究进展[J]. 上海农业学报, 2015, 31(1):110-117.
CHEN Yu-mei, HE Miao-miao, NING Jiao-ying, et al. Research progress in phytoremediation of Cd-polluted vegetable fields[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2015, 31(1):110-117.
- [4] 周建军, 周 桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014(3):315-320.
ZHOU Jian-jun, ZHOU Ju, FENG Ren-guo. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2014(3):315-320.
- [5] Salt D E, Prince R C, Pickering I J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(4):1427-1433.
- [6] 刘海东, 李 琳, 张维俊, 等. 华东地区不同种类畜禽粪便对农田土壤重金属输入的影响[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(6):136-139.
LIU Hai-dong, LI Lin, ZHANG Wei-jun, et al. Effects of different kinds of livestock manure on heavy metal input in agricultural soil of eastern China[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2017, 42(6):136-139.
- [7] 田 桃, 雷 鸣, 周 航, 等. 两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2553-2560.
TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, et al. Effects of two amendments on remedying garden soil complexly contaminated with Pb, Cd and As[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6):2553-2560.
- [8] 曾清如, 廖铭长. 郴县东西河流域重金属污染农田的防治技术和生态利用模式[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5):428-431.
ZENG Qing-ru, LIAO Ming-chang. Control of pollution of heavy metals on farmland by ecological engineering in east and west valley in Chen County[J]. *Journal of Agro-environment Protection*, 2002, 21(5):428-431.
- [9] 曾 敏, 廖柏寒, 曾清如, 等. 湖南郴州、石门、冷水江3个矿区As污染状况的初步调查[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):418-421.
ZENG Min, LIAO Bo-han, ZENG Qing-ru, et al. Investigation of arsenic pollution of 3 mining areas in Chenzhou, Shimen, and Lengshuijiang, 3 cities in Hunan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2):418-421.
- [10] Yang Y, Zhou X H, Tie B Q, et al. Comparison of three types of oil crop rotation systems for effective use and remediation of heavy metal contaminated agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 188:148-156.
- [11] 王 斌, 康娜英, 张 明. 重金属污染土壤修复技术综述[J]. 广东化工, 2018, 369(7):211-212.
WANG Bin, KANG Na-ying, ZHANG Ming. Review on remediation technology of heavy metal contaminated soil[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 369(7):211-212.
- [12] 陈桂秋, 曾光明, 袁兴中, 等. 治理重金属污染河流底泥的生物淋滤技术[J]. 生态学报, 2008, 27(4):639-644.
CHEN Gui-qiu, ZENG Guang-ming, YUAN Xing-zhong, et al. Research progress of bioleaching for remediation of heavy metal polluted river sediment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4):639-644.
- [13] 孙约兵, 周启星, 郭观林. 植物修复重金属污染土壤的强化措施[J]. 环境工程学报, 2007, 1(3):103-110.
SUN Yue-bing, ZHOU Qi-xing, GUO Guan-lin. Phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(3):103-110.
- [14] 林诗悦, 冯义彪. 镉锌铅复合污染土壤的超富集植物修复能力研究[J]. 环境工程, 2017, 35(3):168-173.

- LIN Shi-yue, FENG Yi-biao. Study on phytoremediation of hyperaccumulators for cadmium, zinc and lead in the multiple contaminated soils[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(3):168-173.
- [15] 程晨, 高文姬, 胡鹏杰, 等. 植物吸取修复及钝化处理对后茬水稻镉吸收的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(3):476-481.
CHENG Chen, GAO Wen-ya, HU Peng-jie, et al. Effects of phytoextraction and stabilization on Cd uptake by rice[J]. *Soils*, 2017, 49(3):476-481.
- [16] 杨学乐, 何录秋, 刘寿明, 等. 向日葵、油菜对镉胁迫反应及对镉污染土地修复作用研究进展[J]. *作物研究*, 2017, 31(1):93-98.
YANG Xue-le, HE Lu-qiu, LIU Shou-ming, et al. Research on the reaction of sunflower and rapeseed under cadmium stress and their phytoremediation for the cadmium contaminated soil[J]. *Crop Research*, 2017, 31(1):93-98.
- [17] 杨洋, 陈志鹏, 黎红亮, 等. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. *生态学报*, 2016, 36(3):688-695.
YANG Yang, CHEN Zhi-peng, LI Hong-liang, et al. The potential of two agricultural cropping patterns for remediating heavy metals from soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3):688-695.
- [18] 朱俊艳, 于玲玲, 黄青青, 等. 油菜-海州香薷轮作修复铜镉复合污染土壤: 大田试验[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6):1166-1171.
ZHU Jun-yan, YU Ling-ling, HUANG Qing-qing, et al. Application of rotation system of *Brassica Juncea* and *Elsholtzia Splendens* to remediate copper and cadmium-contaminated soil: A field trial[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6):1166-1171.
- [19] 刘公社, 陈中岳. 向日葵生物柴油的开发前景[J]. *中国油料作物学报*, 2006, 28(2):224-227.
LIU Gong-she, CHEN Zhong-yue. Prospect of sunflower biodiesel[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28(2):224-227.
- [20] 曾露苹, 周飞, 陈明如, 等. 木薯和花生间作对Cd吸收及根区速效养分的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2):303-309.
ZENG Lu-ping, ZHOU Fei, CHEN Yue-ru, et al. Effects of cassava-peanut intercropping on the absorption of cadmium and available nutrient in rhizosphere soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(2):303-309.
- [21] 陈璘涵, 曾红远, 葛一陈, 等. 2种轮作模式对镉污染土壤修复潜力的比较[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6):3873-3878.
CHEN Lin-han, ZENG Hong-yuan, GE Yi-chen, et al. Comparison of remediation potential for two crop rotation patterns on Cd contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(6):3873-3878.
- [22] 罗子锋, 周峰平, 高岐. 花生农作物对污染土壤中重金属镉的富集研究[J]. *广州化工*, 2016(2):132-133.
LUO Zi-feng, ZHOU Feng-ping, GAO Qi. Research on the enrichment of cadmium in contaminated soil by peanut crops[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2016(2):132-133.
- [23] 刘亚轩, 李晓静, 白金峰, 等. 植物样品中无机元素分析的样品前处理方法和测定技术[J]. *岩矿测试*, 2013, 32(5):681-693.
LIU Ya-xuan, LI Xiao-jing, BAI Jin-feng, et al. Review on sample pretreatment methods and determination techniques for inorganic elements in plant samples[J]. *Rock & Mineral Analysis*, 2013, 32(5):681-693.
- [24] 孙月美, 宁国辉, 刘树庆, 等. 耐受性植物油葵和棉花对镉的富集特征研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(6):281-286.
SUN Yue-mei, NING Guo-hui, LIU Shu-qing, et al. Accumulation characteristics of cadmium in 2 tolerant plant species, oil sunflower and cotton[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2015, 29(6):281-286.
- [25] 文春波, 钱发军, 刘鹏. 农业秸秆资源化利用现状与评价[J]. *生态经济*, 2018(2):147-150.
WEN Chun-bo, QIAN Fa-jun, LIU Peng. Situation and evaluation of agricultural straw resource utilization[J]. *Ecological Economy*, 2018(2):147-150.
- [26] 杨勇, 王巍, 江荣风, 等. 超累积植物与高生物量植物提取镉效率的比较[J]. *生态学报*, 2009, 29(5):2732-2737.
YANG Yong, WANG Wei, JIANG Rong-feng, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5):2732-2737.
- [27] 谢华, 赵雪梅, 谢洲, 等. 皇竹草对酸与Cd污染农田土壤的治理效果及安全应用分析[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3):478-484.
XIE Hua, ZHAO Xue-mei, XIE Zhou, et al. Phytoremediation efficiency of *Pennisetum hybridum* for acid- and cadmium-polluted soil and its safe utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):478-484.
- [28] Yang Y, Li H L, Peng L, et al. Assessment of Pb and Cd in seed oils and meals and methodology of their extraction[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197(A):482-488.
- [29] Yang Y, Ge Y C, Tu P F, et al. Phytoextraction of Cd from a contaminated soil by tobacco and safe use of its metal-enriched biomass[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 363:385-393.
- [30] 苏慧, 魏树和, 周启星. 镉污染土壤的植物修复研究进展与展望[J]. *世界科技研究与发展*, 2013, 35(3):315-319.
SU Hui, WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing. Advances in phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2013, 35(3):315-319.
- [31] Wei S H, Wang S S, Zhou Q X, et al. Potential of *Taraxacum mongolicum* Hand-Mazz for accelerating phytoextraction of cadmium in combination with eco-friendly amendments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1/2/3):480-484.
- [32] Pietro F, Roberto C, Chiara F. The rotation of white lupin (*Lupinus albus* L.) with metal-accumulating plant crops: A strategy to increase the benefits of soil phytoremediation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 145:35-42.