

菌肥及泥炭土浸提液对植物提取土壤Cd的影响

黄彦, 黄靖淇, 钟娴慧, 吴启堂, 陈杨梅, 卫泽斌

引用本文:

黄彦, 黄靖淇, 钟娴慧, 吴启堂, 陈杨梅, 卫泽斌. 菌肥及泥炭土浸提液对植物提取土壤Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1029–1035.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-1103>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>

外源硫化钠对土壤-水稻体系中镉迁移积累的影响

官迪, 吴家梅, 刘昭兵, 陈山, 纪雄辉

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1460–1469 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0067>

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2762–2770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>

不同形态硫对水稻吸收积累镉的影响

刘颖, 苏广权, 郭湘, 杨燕花, 姚爱军, 仇荣亮, 汤叶涛

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1208–1218 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1164>

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响

范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143–2150 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄彦, 黄靖淇, 钟娴慧, 等. 菌肥及泥炭土浸提液对植物提取土壤Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 1029–1035.

HUANG Y, HUANG J Q, ZHONG X H, et al. Effects of bacterial fertilizer and peat soil extract on soil Cd extracted by plants[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(5): 1029–1035.



开放科学 OSID

菌肥及泥炭土浸提液对植物提取土壤Cd的影响

黄彦, 黄靖淇, 钟娴慧, 吴启堂, 陈杨梅, 卫泽斌*

(华南农业大学资源环境学院, 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 广州 510642)

摘要: 采用温室盆栽试验, 研究菌肥和泥炭土浸提液对东南景天生物量、Cd富集特征、土壤Cd有效性和土壤理化性质及对后茬水稻在落干条件下水稻Cd的影响。结果表明, 菌肥和泥炭土浸提液均能提高东南景天对土壤重金属的提取效率, 其中施用两次液体菌肥的效果最好, 东南景天对Cd提取量为 $0.34 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$, 是对照的3.1倍, 泥炭土浸提液处理的东南景天Cd提取量为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$, 是对照的2.9倍, 这两种处理对Cd的提取率较高, 达到13%~15%, 土壤全量Cd的降低幅度达到17.55%~20.41%。东南景天收获后种植水稻, 落干条件下促进了水稻对Cd的吸收, 稻米和茎叶的Cd提取量较对照增幅分别为30.31%~396.24%和12.36%~257.65%, 其中在菌肥及泥炭土浸提液联合处理下水稻对Cd的吸收最大, 稻米和茎叶的Cd含量分别为 $2.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水稻地上部对Cd总提取率达到3.15%。因此, 施用两次菌肥是提高东南景天提取土壤Cd的有效措施, 菌肥与泥炭土浸提液联合施用在落干条件下显著强化了水稻对土壤Cd的提取。

关键词: 植物修复; 菌肥; 泥炭土浸提液; 东南景天; 水稻; 镉

中图分类号: X173; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)05-1029-07 doi:10.11654/jaes.2023-1103

Effects of bacterial fertilizer and peat soil extract on soil Cd extracted by plants

HUANG Yan, HUANG Jingqi, ZHONG Xianhui, WU Qitang, CHEN Yangmei, WEI Zebin*

(College of Natural Resources and Environment, Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural & Rural Pollution Abatement and Environmental Safety, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A greenhouse pot experiment was used to study the effects of bacterial fertilizer and peat extract solution on the biomass and cadmium enrichment characteristics of *Sedum alfredii*, the Cd availability and physical and chemical properties of the soil, and the Cd content of the subsequent rice crop under dry conditions. The results showed that, bacterial fertilizer and peat soil extract improved the extraction efficiency of heavy metals from the soil by *Sedum alfredii*, and applying two liquid bacterial fertilizers had the greatest effect. The amount of Cd extracted by *Sedum alfredii* was $0.34 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$, which was 2.1 times greater than that of the control, and the amount of Cd extracted by *Sedum alfredii* treated with peat extract was $0.32 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$, which was 1.9 times greater than that of the control. The phytoextraction rates of Cd were higher for these two treatments, reaching 13%–15%, and the reduction in total soil Cd content ranged from 17.55% to 20.41%. Compared with the control, Cd extraction by rice grains and straw increased by 30.31%–396.24% and 12.36%–257.65%, respectively. Cd uptake by rice was highest under the combined treatment of bacterial fertilizer and peat extract, resulting in a Cd content of $2.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the rice grains and $2.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the straw. The total Cd extraction rate of rice shoots reached 3.15%. Therefore, the double application of microbial fertilizer is an effective measure to enhance the phytoextraction of Cd from the soil by *Sedum*

收稿日期: 2023-12-26 录用日期: 2024-02-27

作者简介: 黄彦(1999—), 女, 广东揭阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤农田重金属修复。E-mail: 1300518038@qq.com

*通信作者: 卫泽斌 E-mail: wezebin@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点专项课题(2023YFD1702202); 广东省特支计划本土创新团队项目(2019BT02L218)

Project supported: National Key Research & Developmental Program of China(2023YFD1702202); Local Innovation and Entrepreneurship Team Project of Guangdong Special Support Program(2019BT02L218)

alfredii, and the combination of microbial fertilizer with peat extract has the potential to promote the phytoextraction of Cd by rice under dry conditions.

Keywords: phytoremediation; bacterial fertilizer; peat extract; *Sedum alfredii*; rice; cadmium

随着我国工业化和城市化进程不断加速,土壤重金属污染成为威胁人体健康以及环境安全的因素,农田Cd污染已经成为突出的农业环境问题之一^[1-4]。常见的Cd污染土壤修复技术有多种,包括植物提取、固化/稳定化、土壤淋洗、电化学技术等,其中植物提取技术因其环境友好、能够彻底去除土壤重金属等特点,是有前途的修复方式之一,如何提高植物修复的效率成为突破局限的关键。已有相关学者采用施肥等农艺手段^[5-6],微生物强化^[7],螯合剂、植物生长调节剂等^[8-11],促进植物对重金属的吸收和积累,从而进一步提高植物对重金属的提取效率。

EDTA(乙二胺四乙酸)具有较强的络合能力,是目前研究较多的螯合剂,但EDTA具有不易被生物降解、抑制植物生长的缺点^[12]。因此,有必要寻找环境友好的促进植物提取重金属的活化剂或材料。有研究表明利用植物的水提取物促进了龙葵对土壤Cd的吸收提取^[13-14],果皮果渣的水提取物被用于活化土壤中铅以促进植物提取^[15],利用植物相关材料获取绿色的活化剂是一种可行的选择。泥炭土浸出液中含有溶解性有机碳和营养物质,其中的小分子富里酸等可以活化重金属,增加重金属的溶出率,提高生物可利用性^[16-17]。本项目组前期研究发现泥炭土清洗与否,对植物吸收土壤Cd的影响不同。添加未清洗的泥炭土,其水稻Cd含量高于添加清洗后的泥炭土。因此,可以用泥炭土浸提液来促进水稻的生长和对Cd的吸收。向土壤中施入菌肥可以改善土壤微生物生态结构、提高作物抗性^[18],从而提高作物的产量和品质^[19-21]。将菌肥和泥炭土浸提液等应用于污染农田的植物修复,有望同时协同改善土壤环境。稻田落干排水会增加水稻对Cd的吸收^[22-24],通过施用菌肥和泥炭土浸提液能否进一步提高水稻对Cd的吸收,从而进行植物修复值得研究。水稻是一种广泛种植的作物,其生物量较大且有一套完整的耕作和收获方法,易于种植,在植物提取方面已被证明具有潜力^[25],可以拓展植物修复的应用。

本研究通过温室盆栽试验,研究菌肥和泥炭土浸提液能否在促进东南景天生长的同时提高东南景天对土壤中Cd的吸收提取,并探讨落干条件下对水稻生长和吸收Cd的影响。以期为植物修复效率的提高

提供科学依据,为Cd污染农田的植物修复提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤采自韶关市某水稻农田Cd污染土壤,pH为5.66,有机质含量为 $35.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总氮为 $1.49\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总磷为 $0.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总钾为 $10.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,CEC为 $12.60\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,总Cd含量为 $2.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效态Cd含量为 $1.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中总Cd含量高达 $2.445\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中 $2.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的Cd含量风险管制值。

试验菌肥为微生物菌剂——菌旺丰,是华南农业大学研发的高品质液体肥,有机质含量 $\geq 40\%$,其中腐植酸 $\geq 20\%$,内含氨基酸、海藻酸等多种活性成分,可有效预防土传病害的发生、促进作物健康生长,提高农作物产量及品质。泥炭土为安秋农资专营店购买的纯泥炭土,为植物松针腐殖的泥炭土,有机质含量 $\geq 60\%$,对泥炭土进行浸提获取植物源活化剂。试验所用菌肥溶液的制备:菌肥原液500倍稀释液,溶液pH为4.53;泥炭土浸提液的制备:以水为浸提剂,泥炭土和水质量比为1:10,浸提时间12 h,浸提液pH为5.56。

1.2 试验设计

东南景天试验采用盆栽,土壤自然风干并过5 mm筛,充分混匀土壤,采用尿素和 KH_2PO_4 (均为分析纯)作基肥与土壤混匀,用量分别为:氮 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,磷 $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,钾 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。每盆装土1 kg,每盆种植2株大小均匀的东南景天,共5个处理,每个处理4次重复。

将种植过东南景天的盆栽土壤继续种植水稻,具体处理见表1,每个处理4次重复,每盆土壤0.8 kg,每盆移栽水稻3棵。水稻在移栽后分蘖期30 d内保持土壤表面水层1~2 cm以保持水稻分蘖期所需,分蘖期后保持落干(水面无水层)。

东南景天盆栽试验于2022年3月19日将长势均匀的东南景天种植在重金属污染的土壤中,处理中每次液体肥的添加量为40 mL,并在移栽后第50天于2022年5月8日进行第一次处理液的添加,J-2、T和

表1 东南景天和水稻盆栽试验设计
Table 1 Experimental design of pot plants

处理 Treatment	液体肥 Liquid fertilizer	添加量 Additive amount	添加时期 Addition period	
			东南景天 <i>Sedum alfredii</i>	水稻 Rice
CK	无	无	无	无
J-1	菌肥	40 mL 菌肥	移栽第50天	返青期
J-2	菌肥	每次40 mL 菌肥,共两次	移栽第50天,间隔7 d再次施加	返青期,孕穗期
T	泥炭土浸提液	每次40 mL 泥炭土浸提液,共两次	移栽第50天,间隔7 d再次施加	返青期,孕穗期
JT	菌肥+泥炭土浸提液	每次40 mL 菌肥+40 mL 泥炭土浸提液,共两次	移栽第50天,间隔7 d再次施加	返青期,孕穗期

JT处理在间隔7 d后于2022年5月15日进行第二次处理液的添加,每次浇水总量保持一致,2022年6月30日收获东南景天,种植周期为103 d。水稻盆栽试验于2022年8月16日至2022年11月24日进行,2022年8月19日返青期进行第一次处理液的添加,2022年10月19日孕穗期进行第二次处理液的添加,种植周期为100 d。

1.3 样品的采集与分析

1.3.1 样品的预处理

东南景天植物样品预处理:用剪刀剪取东南景天地上部分,收获后的东南景天用自来水冲洗表面的杂质,再用双蒸水洗净并擦干表面水分,将东南景天装入信封,于95 °C杀青1 h,然后置于45 °C的烘箱中烘干至质量恒定,称量后为每盆的东南景天的干质量生物量,将烘干植物研磨成粉末状,贮存于封口袋保存。

水稻糙米样品预处理:将收获的水稻籽粒进行烘干脱壳,并称其干质量,用粉碎机研磨后置于封口袋保存。

土壤样品预处理:将盆中的土壤敲碎混匀,用抖根法采集不同处理的根际土壤样品,自然风干,用研钵研磨后分别过20目和100目筛,分开保存于封口袋备用。

1.3.2 样品分析方法

土壤的基本理化性质按照《土壤农业化学分析方法》^[26]进行;土壤pH值测定采用水土比为2.5:1的电位法;土壤重金属有效态采用DPTA提取法;土壤重金属全量使用HNO₃-HCl-HF微波消解;植物重金属全量使用HNO₃-H₂O₂微波消解;用火焰原子吸收光谱仪测定重金属Cd。

1.4 数据分析与方法

所有数据用Excel进行整理,用SPSS 26.0进行单因素方差分析的差异显著性检验($\alpha=0.05$),用Origin 2021绘图。

土壤重金属提取率(%)用植物吸收重金属总量与土壤重金属总量比值的百分数表示,生物富集系数(BCF)用植物地上部分Cd含量与土壤全Cd含量比值来表示。东南景天对重金属的提取量通过地上部生物量与重金属含量的乘积来表示^[10]。

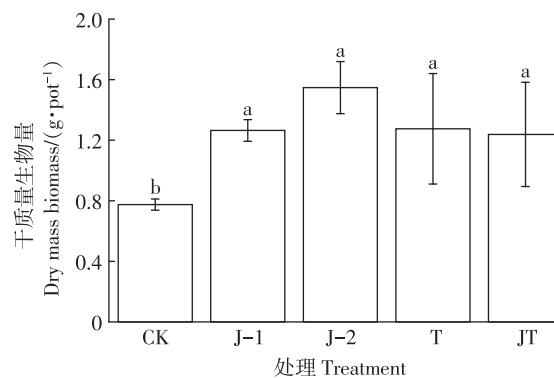
2 结果与分析

2.1 对东南景天生物量的影响

从图1可以看出,与对照处理相比,施加菌肥和泥炭土浸提液显著提高了东南景天地上部的生物量($P<0.05$),液体肥促进了东南景天的生长。施加两次液体菌肥(J-2)对东南景天的生长促进效果最明显,生物量较对照提高了99.68%。施加一次液体菌肥(J-1)、泥炭土浸提液(T)以及菌肥和泥炭土的复合液(JT)对东南景天的生长均有促进作用,其生物量比对照处理分别提高了63.16%、64.58%、59.77%。

2.2 对东南景天重金属含量和富集系数的影响

施用液体菌肥和泥炭土浸提液提高了东南景天地上部Cd含量(表2)。T处理的东南景天Cd含量最高,达到260.45 mg·kg⁻¹,是对照处理的1.8倍。J-1和



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

图1 不同处理东南景天的生物量

Figure 1 Biomass in *Sedum alfredii* in different treatments

J-2处理的东南景天Cd含量分别是对照处理的1.1倍和1.6倍,说明随着液体菌肥施用次数的增加,东南景天Cd含量得到进一步提高。菌肥和泥炭土浸提液联合施用情况下,东南景天Cd含量的提高幅度为53.2%。施加菌肥和泥炭土浸提液均提高了东南景天的Cd生物富集系数,其中T处理Cd生物富集系数达到106.52,远大于1。

表2 不同处理东南景天地上部Cd含量(干质量)

Table 2 Cd content in *Sedum alfredii* in different treatments(DW)

处理 Treatment	Cd含量 Cd content/(mg·kg ⁻¹)	Cd富集系数 BCF-Cd
CK	142.56±30.65c	58.30±12.54c
J-1	161.26±33.25bc	65.96±13.60bc
J-2	232.65±78.54ab	95.15±32.12a
T	260.45±61.30a	106.52±25.07a
JT	218.35±48.64abc	89.31±19.89ab

注:表中数值为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Values in the table are mean ± standard deviation; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments($P<0.05$). The same below.

2.3 对东南景天提取重金属的影响

由表3可以看出,施加液体肥提高了东南景天对Cd的提取量,具体表现为:J-2>T>JT>J-1>CK。施用两次液体菌肥(J-2)的效果最好,东南景天对Cd提取量为0.34 mg·pot⁻¹,是对照处理的3.1倍;泥炭土浸提液处理(T)的东南景天Cd提取量为0.32 mg·pot⁻¹,是对照的2.9倍。J-2和T处理的东南景天对Cd的提取率分别达到了14.98%和12.92%。菌肥和泥炭土浸提液复合处理的东南景天对Cd的提取效率稍低于单一添加菌肥和单一添加泥炭土浸提液处理,其提取效率为11.47%。菌肥和泥炭土浸提液都可通过提高东南景天生物量和东南景天Cd含量来强化东南景天对土壤Cd的提取。

表3 不同处理东南景天的Cd提取量及提取率(干质量)

Table 3 Extraction amount and extraction rate of Cd in *Sedum alfredii* in different treatments(DW)

处理 Treatment	Cd Cd extraction/(mg·pot ⁻¹)	Cd提取率 Cd extraction rate/%
CK	0.11±0.02c	4.47
J-1	0.20±0.03bc	8.28
J-2	0.34±0.15a	14.98
T	0.32±0.03ab	12.92
JT	0.28±0.13ab	11.47

2.4 对土壤理化性质和重金属含量的影响

不同处理对土壤理化性质的影响见表4。与对照处理相比,施加菌肥和泥炭土浸提液对土壤的pH值、有效养分含量的影响不显著。土壤pH值变化不明显,可能是添加物的量较少,土壤本身的缓冲能力强的原因。菌肥和泥炭土浸提液联合施用(JT处理)显著提高了土壤有机质含量,与对照处理相比提高了4.81%;而单独施用泥炭土浸提液降低了土壤有机质含量。

不同处理的土壤重金属含量见表5。种植东南景天后,不同处理的土壤全Cd含量比起始值低。J-2、T和JT处理的土壤全Cd含量均显著低于对照处理,其中J-2处理的土壤Cd含量最低,其次是T处理。与对照处理相比,J-2处理的土壤Cd含量降低幅度为20.41%,T处理的土壤Cd含量降低幅度为17.55%。东南景天处理后,土壤有效态Cd含量比土壤有效态本底值低,液体肥强化东南景天植物提取后,土壤有效态Cd含量呈现降低趋势,J-2处理土壤有效态Cd含量最低。菌肥和泥炭土浸提液两种液体肥强化了东南景天对土壤中Cd的提取,从而降低了土壤中的重金属含量。

2.5 对水稻的影响

不同处理的水稻稻米和茎叶部分的生物量、Cd

表4 不同处理的土壤理化性质(干质量)

Table 4 Physicochemical properties in different treatments(DW)

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Rapidly available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
CK	5.82±0.10a	38.65±0.39b	67.51±2.70a	150.28±4.86a	198.51±9.34a
J-1	5.86±0.07a	38.73±0.42ab	64.64±1.61a	154.00±8.57a	196.86±6.37a
J-2	5.92±0.14a	37.95±0.76bc	64.98±4.19a	145.95±13.83a	173.01±20.03a
T	5.88±0.08a	37.33±1.13c	64.07±3.51a	151.03±7.28a	173.15±20.86a
JT	5.79±0.07a	40.51±2.11a	62.36±1.61a	147.35±8.03a	184.02±22.70a

表5 不同处理的土壤重金属含量(干质量)

Table 5 Soil heavy metal content in different treatments(DW)

处理 Treatment	总量Cd Total Cd content/(mg·kg ⁻¹)	DTPA 提取态Cd DTPA-Cd content/(mg·kg ⁻¹)
CK	2.27±0.11a	1.51±0.14a
J-1	2.24±0.06ab	1.51±0.05a
J-2	1.95±0.17c	1.33±0.16a
T	2.02±0.09c	1.39±0.05a
JT	2.05±0.16bc	1.42±0.13a

含量和Cd提取量见表6。落干条件下水稻对Cd的吸收会增加,经过一季东南景天修复后进行水稻种植,并在分蘖期后进行落干(土面没有水层),添加液体肥显著促进水稻对Cd的吸收和提取。不同液体肥处理提高了稻米和茎叶的生物量,提高了稻米和茎叶Cd含量,生物量和地上部Cd含量的提高增加了水稻对土壤Cd的提取。与对照处理相比,不同液体肥处理均提高了稻米和茎叶的Cd提取量,增幅范围分别为30.31%~396.24%和12.36%~257.65%。不同处理的水稻地上部对土壤Cd的总提取率范围为0.7%~3.15%,其中T处理和JT处理达到了2.39%和3.15%,菌肥和泥炭土浸提液强化了落干条件下水稻对土壤中Cd的提取。此外,不同处理的水稻茎叶Cd含量高于稻米,茎叶Cd含量是稻米的1.35~1.76倍。

3 讨论

3.1 菌肥和泥炭土浸提液对东南景天的影响

植物对土壤重金属的提取量是由其生物量和地上部重金属含量来决定的。施用菌肥可以促进农作物健康生长,提高农作物产量及品质,在重金属超富集植物东南景天上应用也获得了相同的效果。添加菌肥提高了东南景天地上部的生物量和Cd含量(图1和表2),这与菌肥含的腐植酸钾、氨基酸、海藻酸等多种活性成分能提高植物对重金属的吸收有关^[27-29],

施加2次菌肥的效果优于施加1次。施加有机物料能提高东南景天的修复效果^[30],本实验施加泥炭土浸提液后,东南景天对Cd提取效率较对照处理提高了1.8倍,这是因为泥炭土浸提液中含有有机酸、腐植酸等^[6],有研究表明腐植酸可以提高东南景天修复土壤Cd的效率^[31],溶解性有机质可以提高植物对重金属的吸收^[32]。两种液体肥均提高了东南景天地上部Cd含量,最高达到260 mg·kg⁻¹以上,远高于的超富集植物Cd为100 mg·kg⁻¹的临界标准,这更有利于超富集植物的后续处理。

3.2 落干条件下水稻对Cd的吸收及修复污染土壤的潜力

在排水或者氧化土壤条件下,水稻对土壤中的Cd吸收量会增加^[22-24],采取措施进一步提高水稻对Cd的吸收有望通过移除秸秆降低土壤中Cd含量^[33]。施加菌肥和泥炭土浸提液后,提高了水稻的产量,这些与在东南景天的效果(图1)和前人的研究结果是一致的^[18-20,34]。土壤落干条件下,菌肥和泥炭土浸提液联合施用大幅度提高稻米和秸秆Cd含量,对土壤Cd的总提取率达到了3.15%,与单独种植东南景天对Cd的提取率4.47%稍低(表3),提取能力与东南景天相当。本实验对照处理的水稻茎叶的Cd含量为0.94 mg·kg⁻¹,低于报道的相对高积累Cd水稻Cho-ko-koku品种^[35],后期可以筛选和采用高积累Cd水稻品种,利用菌肥、泥炭土浸提液等提高水稻的植物修复效率,使水稻成为可以推广应用的修复植物^[25]。

种植东南景天没有降低后茬水稻稻米Cd含量,其后茬稻米Cd含量为0.53 mg·kg⁻¹(表6),高于在未种植过东南景天的相同土壤上稻米Cd含量(0.39 mg·kg⁻¹,数据未列),东南景天在土壤中的残茬会使得下一季作物重金属吸收积累增加^[36]。此外种植一季东南景天后,土壤总量Cd和有效态Cd含量依然较高(表5),还不宜进行水稻安全生产。土壤施加菌肥和

表6 不同处理水稻生物量、Cd含量和提取量(干质量)

Table 6 Plant biomass, Cd content and Cd extraction amount of rice under different treatments(DW)

处理 Treatment	稻米 Grain			茎叶 Stem and leaf			Cd 总提取率 Total Cd extraction rate/%
	生物量 Biomass/(g·pot ⁻¹)	Cd 含量 Cd content/(mg·kg ⁻¹)	Cd 提取量 Cd extraction/(μg·pot ⁻¹)	生物量 Biomass/(g·pot ⁻¹)	Cd 含量 Cd content/(mg·kg ⁻¹)	Cd 提取量 Cd extraction/(μg·pot ⁻¹)	
CK	8.49±1.75b	0.53±0.01e	4.52±0.88d	8.73±1.47a	0.94±0.01d	8.17±1.38c	0.70
J-1	10.01±0.62ab	0.59±0.03d	5.89±0.36cd	9.71±0.89a	0.95±0.03d	9.18±0.97c	0.81
J-2	10.19±0.23ab	0.77±0.01c	7.83±0.18c	8.92±1.04a	1.16±0.02c	10.34±1.13c	1.17
T	10.76±0.75a	1.40±0.02b	15.03±0.92b	9.69±0.74a	2.42±0.03b	23.48±1.91b	2.39
JT	10.50±1.43a	2.14±0.03a	22.43±3.04a	10.16±1.34a	2.88±0.03a	29.22±3.83a	3.15

泥炭土浸提液提高稻米Cd含量,稻米Cd含量均超过了国家食品卫生标准 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,需要防范食品安全风险。从水稻用于植物修复移除土壤Cd的角度^[37],水稻无需到成熟季收获,可以考虑在灌浆期收获植株并加以回收集中处理,可避免稻谷进入食物链。

4 结论

(1)添加菌肥和泥炭土浸提液两种液体肥可以促进东南景天的生长,提高东南景天对Cd的提取,施用两次菌肥和泥炭土浸提液处理的东南景天的Cd含量分别为 $232.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $260.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,提取量分别为 $0.34 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$,两者对土壤Cd的提取率可达13%~15%,显著促进东南景天吸收土壤中的Cd,降低土壤Cd含量。

(2)施加液体肥种植水稻,并在分蘖期后进行落干,促进了水稻的生长和对Cd的吸收提取,其中菌肥及泥炭土浸提液联合处理下水稻对Cd的吸收量最大,稻米和茎叶的Cd含量分别为 $2.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,水稻地上部对Cd提取率达到3.15%,与东南景天提取能力相当。落干条件下栽培水稻并施加液体肥来促进植物提取Cd,具有一定的应用前景。

参考文献:

- ZHAO H D, WU Y, LAN X P, et al. Comprehensive assessment of harmful heavy metals in contaminated soil in order to score pollution level[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1-13.
- ZHANG X Y, ZHONG T Y, LIU L, et al. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China[J]. *Plos One*, 2015, 77(8): 5-15.
- 葛芳芳, 王学锋, 付卫静, 等. 我国农耕土壤Cd污染与植物修复现状[J]. *环境保护科学*, 2017, 43(5): 105-110. GE F F, WANG X F, FU W J, et al. A review of cadmium polluted agricultural soils and phytoremediation in China[J]. *Environmental Protection Science*, 2017, 43(5): 105-110.
- HAMID Y, TANG L, SOHAIL M I, et al. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660(1): 80-96.
- 崔立强, 吴龙华, 李娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(4): 572-576. CUI L Q, WU L H, LI N, et al. Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Solis*, 2009, 41(4): 572-576.
- 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 不同磷肥对砷超富集植物蜈蚣草修复砷污染土壤的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(10): 2906-2911. LIAO X Y, CHEN T B, YAN X L, et al. Effects of different forms P fertilizers on phytoremediation for As-contaminated soils using As-hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2906-2911.
- LI F, TANG K, CAI C, et al. *Phytolacca acinosa* Roxb. with *Arthroba-*
- ter echigonensis* MN1405 enhances heavy metal phytoremediation[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(10): 956-965.
- SILLANPAA M E T, KURNIAWAN T A, LO W. Degradation of chelating agents in aqueous solution using advanced oxidation process (AOP) [J]. *Chemosphere*, 2011, 83(11): 18.
- 周宽, 皇甫卓曦, 钟承韡, 等. 可生物降解螯合剂GLDA诱导葎草修复镉污染土壤[J]. *环境工程*, 2021, 39(5): 165-170. ZHOU K, HUANGFU Z X, ZHONG C W, et al. Biodegradable chelate CLDA enhanced phytoextraction for cadmium-contaminated soil[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(5): 165-170.
- 陈亦铎, 曾非凡, 林贤柯, 等. 谷氨酸N, N-二乙酸及液体肥联合强化对东南景天修复重金属污染土壤的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 378-383. CHEN Y D, ZENG F F, LIN X K, et al. Effects of L-glutamic acid N, N-diacetic acid (GLDA) and liquid fertilizer on phytoremediation of heavy metal contaminated soils by *Sedum alfredii*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 378-383.
- LINGUA G, TODESCHINI V, GRIMALDI M, et al. Polyaspartate, a biodegradable chelant that improves the phytoremediation potential of poplar in a highly metal-contaminated agricultural soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 132: 9-15.
- MOHAMMADI S, POURAKBAR L, MOGHADDAM S S, et al. The effect of EDTA and citric acid on biochemical processes and changes in phenolic compounds profile of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) under mercury stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 208: 111607.
- HAN R, DAI H, GUO B, et al. The potential of medicinal plant extracts in improving the phytoremediation capacity of *Solanum nigrum* L. for heavy metal contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 220: 12411.
- HAN R, DAI H, SKUZA L, et al. Stem aqueous extracts of accumulator *Bidens tripartita* L. strongly promoted *Solanum nigrum* L. Cd hyperaccumulation from soil[J]. *Plant and Soil*, 2019, 443(1/2): 401-411.
- NING Y, LIU N, SONG Y, et al. Enhancement of phytoextraction of Pb by compounded activation agent derived from fruit residue[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(14): 1449-1456.
- 李胜鹏, 姚蕊, 何天容, 等. 改性泥炭土对稻田土壤汞污染的修复效果研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(12): 1-8. LI S P, YAO C, HE T R, et al. Study on the remediation effect of modified peat soil on mercury contaminated paddy soil[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2022, 44(12): 1-8.
- 胡梦凌, 曾和平. 不同来源腐殖质淋洗去除土壤中Cd、Pb的研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(1): 14-19. HU M L, ZENG H P. The performance of different sources of humic substances for leaching removal of Cd and Pb from soils[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43, (1): 14-19.
- BABAEI K, SHARIFI R S, PIRZAD A, et al. Effects of bio fertilizer and nano Zn-Fe oxide on physiological traits, antioxidant enzymes activity and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salinity stress [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2017, 12(1): 381-389.

- [19] 决超. 微生物菌肥与土壤改良基质对连作马铃薯土壤性质及微生物群落的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 218-224. JUE C. Effects of microbial fertilizer and soil improvement substrate on properties and microbial community of continuous cropping potato[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 218-224.
- [20] 崔欣格, 王瑞, 赵昊, 等. 微生物菌肥对不同连作土壤及烟株生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 240-245. CUI X G, WANG R, ZHAO H, et al. Effects of microbial fertilizer on different continuous cropping soils and growth of tobacco plants[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(13): 240-245.
- [21] 张芮, 温文, 董博, 等. 不同水分条件下菌肥施用对陇椒产量与品质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(2): 337-348. ZHANG R, WEN W, DONG B, et al. Effects of bacterial fertilizer application on yield and quality of plateau Long pepper under different water conditions[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(2): 337-348.
- [22] 王惠明, 林小兵, 黄欠如, 等. 不同灌溉模式对稻田土壤及糙米重金属积累的影响[J]. 生态科学, 2019, 38(3): 152-158. WANG H M, LIN X B, HUANG Q R, et al. Effects of different irrigation modes on heavy metal accumulation in paddy soil and brown rice[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(3): 152-158.
- [23] 张丽娜, 宗良纲, 付世景, 等. 水分管理方式对水稻在Cd污染土壤上生长及其吸收Cd的影响[J]. 安全与环境学报, 2006(5): 49-52. ZHANG L N, ZONG L G, FU S J, et al. Effects of water control on rice growth and its intake of cadmium on Cd contaminated soil[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006(5): 49-52.
- [24] 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 等. 典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2512-2521. ZHANG Y T, TIAN Y B, HUANG D Y, et al. Effects of water management on cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) growing in typical paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2512-2521.
- [25] TAKAHASHI R, ITO M, KAWAMOTO T. The road to practical application of cadmium phytoremediation using rice[J]. *Plants*, 2021, 10(9): 1926.
- [26] 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: 150-193. LU R K. Analysis method of agricultural chemistry in soil[M]. Beijing: Agriculture and Science Press, 2000: 150-193.
- [27] 赵文瑞, 高双, 赵宽, 等. 腐殖酸钾对酸性土壤铝毒害的缓解作用与机制[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(5): 185-191. ZHAO W R, GAO S, ZHAO K, et al. Alleviating effect and mechanism of potassium humate fertilizer on aluminum toxicity in acid soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(5): 185-191.
- [28] 蒋涵煦. 高分子化合物强化东南景天修复铅镉复合污染土壤的效果研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021: 26-28. JIANG H X. Research on polymer modifiers effect on *Sedum alfredii* treating Pd/Cd/As-contaminated soil[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021: 26-28.
- [29] 王怀凤, 永毛, 李良, 等. 海藻酸对萝卜生长及镉积累的影响[J]. 北方园艺, 2021(13): 30-35. WANG H F, YONG M, LI L, et al. Effects of alginic acid on growth and cadmium accumulation of radish[J]. *Northern Horticulture*, 2021(13): 30-35.
- [30] 陈绩, 赵科理, 柳丹, 等. 有机肥料联合东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11): 1346-1351. CHEN J, ZHAO K L, LIU D, et al. Remediation of organic fertilizer combined with *Sedum alfredii* for heavy metals contaminated soil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(11): 1346-1351.
- [31] 王凯迪. 堆肥腐殖酸强化东南景天修复镉铅污染土壤的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 48-50. WANG K D. Augmentation of FA and HA from compost on remediating Cd- and Pb- contaminated soils by *Sedum alfredii*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 48-50.
- [32] 朱国辰. 畜禽粪便堆肥衍生的溶解性有机质对黑土中重金属稳定性的影响及作用机制[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023: 61-64. ZHU Y C. Effect and mechanism of dissolved organic matter derived from livestock manure compost on heavy metal immobilization in black soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023: 61-64.
- [33] 赵方杰, 赵星宇, 陶祎敏, 等. 秸秆移除对降低土壤镉含量的效果有限[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 693-699. ZHAO F J, ZHAO X Y, TAO Y M, et al. Straw removal has a limited effect on decreasing cadmium concentration in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 693-699.
- [34] YU X, YANG L, FAN C, et al. Abscisic acid (ABA) alleviates cadmium toxicity by enhancing the adsorption of cadmium to root cell walls and inducing antioxidant defense system of *Cosmos bipinnatus*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 261(8): 115101.
- [35] CHEN W, KANG Z, YANG Y, et al. Interplanting of rice cultivars with high and low Cd accumulation can achieve the goal of "repairing while producing" in Cd-contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851(1): 158229.
- [36] 吴拓铮, 詹娟, 周嘉文, 等. 滇东地质高背景区土壤镉的伴矿景天修复及其对后茬水稻的影响[J]. 土壤学报, 2023, 59(2): 292-300. WU T Z, ZHAN J, ZHOU J W, et al. Phytoextraction of the soils from the east of Yunnan Province with a high cadmium geological background and its effect on rice cadmium uptake[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 59(2): 292-300.
- [37] 汪鹏, 赵方杰. 土壤-水稻系统中镉迁移与阻控[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(5): 990-1000. WANG P, ZHAO F J. The transfer and control of Cd in the soil-rice systems[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2022, 45(5): 990-1000.

(责任编辑:叶飞)