

王京文, 蔡梅, 郑洁敏, 等. 丝瓜与伴矿景天间作对土壤Cd形态及丝瓜Cd吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2292-2298.

WANG Jing-wen, CAI Mei, ZHENG Jie-min, et al. Investigating the intercropping effects of *Sedum plumbizincicola* and *Luffa cylindrica* on soil cadmium fractions and cadmium uptake by *Luffa cylindrica*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2292-2298.

丝瓜与伴矿景天间作对土壤Cd形态及丝瓜Cd吸收的影响

王京文¹, 蔡梅², 郑洁敏³, 李丹¹, 王贤波³, 张奇春^{2*}

(1. 杭州市植保土肥总站, 杭州 310020; 2. 污染环境修复与生态健康教育部重点实验室(浙江大学), 杭州 310058; 3. 杭州市农业科学研究院, 杭州 310024)

摘要:采用盆栽实验将丝瓜和超积累植物伴矿景天间作于重金属污染土壤中,并向土壤添加钙镁磷肥或向丝瓜根际添加固镉菌剂,研究间作对土壤Cd的形态及丝瓜重金属积累性的影响。结果表明,丝瓜与伴矿景天间作一定程度上减少了丝瓜的结果数量,同时存在增大丝瓜果实中Cd含量的风险;通过施加固镉菌剂或钙镁磷肥增加了丝瓜的结果数,且丝瓜果实中Cd含量均未超过国家标准的限定值。同时,景天和丝瓜对土壤Cd具有移除能力,丝瓜主要表现在茎叶对Cd的吸收,其中重污染土壤中的景天和丝瓜对土壤Cd的移除能力大于低污染土壤种植的景天和丝瓜。总体来看,丝瓜与超积累植物伴矿景天间作可用于低污染土壤进行边修复边生产。但是,由于存在较高食品安全风险,在间作的同时可采取施加固镉菌剂或钙镁磷肥等措施来降低果实部分Cd含量。

关键词:伴矿景天;丝瓜;间作;土壤Cd形态

中图分类号:X153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)12-2292-07 doi:10.11654/jaes.2016-0825

Investigating the intercropping effects of *Sedum plumbizincicola* and *Luffa cylindrica* on soil cadmium fractions and cadmium uptake by *Luffa cylindrica*

WANG Jing-wen¹, CAI Mei², ZHENG Jie-min³, LI Dan¹, WANG Xian-bo³, ZHANG Qi-chun^{2*}

(1. Plant Protection Station of Hangzhou city, Hangzhou 310020, China; 2. Key Laboratory of Environment Remediation and Ecological Health (Zhejiang University), Ministry of Education, Hangzhou 310058, China; 3. Academy of Agricultural Sciences in Hangzhou, Hangzhou 310024, China)

Abstract: Natural occurring processes particularly human activities contribute to release heavy metals in the environment. Cadmium (Cd) is a widespread heavy metal now, released into the environment through various activities. Cadmium uptake by crops is a serious concern because of its potential toxicity to humans. A pot experiment was conducted to investigate the effects of *Luffa cylindrica* intercropped with zinc/cadmium hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*, calcium magnesium phosphate was added, and immobilized cadmium bacteria were inoculated, the soil Cd fractions and *Luffa cylindrica*'s heavy metal accumulation in polluted soil were studied. The results showed that the fruit number was reduced and Cd concentration was increased in the treatment of *Luffa cylindrica* and *Sedum plumbizincicola* intercropping, while the fruit number was increased by inoculation with cadmium stabilizing bacteria or addition of calcium magnesium phosphate, more over the Cd concentrations in fruit of *Luffa cylindrica* didn't exceed the national standard. Furthermore, *Sedum plumbizincicola* and *Luffa* were found to have strong extraction ability of Cd. In heavily polluted soil, *Luffa* had higher ability of Cd removal than in the lightly polluted soil. Therefore, *Luffa cylindrica* and hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* intercropping assisted by immobilized cadmium bacteria or calcium magnesium can be used for remediation and production in lightly contaminated soil to reduce Cd contents in edible part of crops.

Keywords: *Sedum plumbizincicola*; *Luffa cylindrica*; intercropping; soil cadmium fractions

收稿日期:2016-06-20

基金项目:杭州市科技项目(20140533B03, 20140533B10);国家重点研发项目(2016YFD0801100);国家自然科学基金项目(41401266)

作者简介:王京文(1974—),女,山东淄博人,硕士研究生,从事土壤污染生态研究。E-mail:wjingwen@hz.cn

*通信作者:张奇春 E-mail:qczhang@zju.edu.cn

镉(Cd)是一种常见的重金属污染物,具有较强的移动性和生物富集性。据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示 Cd 污染物点位超标率达到 7.0%。土壤中 Cd 的形态有离子态、可交换态、吸附态、化学沉淀态和难溶络合态等,它们随环境条件的变动而互相转化,对作物起危害作用的主要是水溶性和交换态 Cd。Cd 活性明显受酸碱度影响,pH 值越高活性越低^[1]。土壤中可溶性 Cd 沿食物链逐级往上传递,不易随水移动或生物体分解,在生物体内浓缩放大,最终产生毒性效应,且具有长期性、隐蔽性和不可逆性等特点^[2-4]。土壤 Cd 污染的主要来源是采矿、冶炼、电镀及基础化工行业的废水、废渣和废气,同时施用含 Cd 的农药、化肥以及污泥也是土壤 Cd 污染的重要来源^[5]。

目前,土壤污染治理常用的方法有物理及物理化学法、化学法、生物治理法和农业治理法^[6]。采用生物治理法,不仅成本低廉,也可边生产边修复,同时对于环境的破坏程度较小。伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)是已被证实的在我国境内生长的 Zn 和 Cd 的超富集植物^[7],已被应用到 Cd 污染土壤的植物修复中^[8-10]。但当超积累植物与作物间作时,超积累植物根系分泌物是否会影响作物产量?其对土壤中 Cd 形态的影响如何?相关报道鲜见。研究已经表明瓜类为重金属低积累型蔬菜^[13],如王钢军等^[14]利用受不同重金属污染的土壤栽培不同的蔬菜发现,叶菜类不适宜种植在重金属污染的土壤上,瓜类相对安全。可食部分 Cd 的富集能力是叶菜类>茄果类>瓜类,普通植物体内 Cd 分布顺序为根>叶>茎^[15-16]。因此,本文通过盆栽实验进行丝瓜和超积累植物伴矿景天间作,并向土壤添加钙镁磷肥或向丝瓜根际添加固镉菌剂,研究间

作对土壤 Cd 的形态及丝瓜重金属积累性的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自浙江省杭州市郊区某电镀厂附近农田。该地区属亚热带季风气候,年均气温 16.1℃,最热月为 7—8 月,最冷月为 1 月,年均日照时数 1 927.7 h,无霜期约 231 d,年均降雨量 1 441.9 mm。从污染点的农田到距离镀锌厂不同距离进行分别采样作为供试土壤。采样深度 0~20 cm,采多点进行混合,土壤风干后去除草根,过 2 mm 筛,测定土壤的重金属含量,结果见表 1。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2015 年在大棚中开展。选用 70 cm×40 cm×27 cm 长形花盆,取 T1(离电镀厂较近点的土壤)和 T2(离电镀厂较远点的土壤)不同污染程度的土壤分别设置表 2 各处理,重复三次。

具体做法为:在花盆内装 50 kg 风干土并以 1 g·kg⁻¹ 土的量施入三元复合肥(15-15-15)混匀作为基肥。供试蔬菜选择管理较为粗放、重金属低积累型的丝瓜(杭州农家品种)。超积累植物伴矿景天采自富阳基地,由中科院与富阳土肥站共同种植,与丝瓜幼苗同时进行移栽。本实验室在前期已分离获得固 Cd 能力达 33%的 K1 菌(*Micrococcineae Arthrobacter*)^[17]作为固镉菌,将 K1 菌制成菌悬液(cfu≥10⁸ 个·mL⁻¹)。在丝瓜营养繁殖期,固镉菌以菌液的形式直接施加于丝瓜根际土壤表面,每次每株作物施加量为 300 mL,每周一次,一共施用 8 次;钙镁磷肥的添加量为 4 g·kg⁻¹ 土,以基肥的形式施入。在生长期根据需水、搭架子,前期对因病虫害而死亡的苗及时补苗,中

表 1 离电镀厂不同距离土壤的重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Content of heavy metals in soils at different distances from electroplating factory

离电镀厂距离 Distance from electroplating factory/m	地点 place	pH	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	Cr	As
400	T3	7.68	0.38	63.7	0.071	35.1	179	16.1	6.01
200	T2	7.76	3.54	64.7	0.078	37.9	194	26.2	6.26
50	T1	7.62	5.12	51.9	0.116	68.7	1570	51.0	12.4
5	T0	7.45	12.2	58.8	0.072	169	3018	113	10.7

表 2 试验处理设计

Table 2 Different treatments in the experiment

处理 Treatments	S	J	SJ	SJ+B	SJ+F	CK
T1	丝瓜单作	景天单作	丝瓜-景天间作	丝瓜-景天间作+菌剂	丝瓜-景天间作+钙镁磷肥	未污染土壤(T3)丝瓜单作
T2	同上	同上	同上	同上	同上	同上

后期发生病害及时用药。整个生长期不追肥。在丝瓜开花结果期间进行定期采摘、记录,试验结束后,对丝瓜茎叶部和景天地上部的生物量进行收获,测定各种植物中 Cd 含量,同时取土分析土壤重金属含量及形态。

1.3 测定方法

土壤中重金属 Cd 的不同存在形态(即水溶态、可交换态、铁锰氧化物结合态、有机态、残渣态)采用改进的 Tessier 多级连续提取法^[18-19]测定;土壤有效态 Cd 采用 DTPA 浸提火焰原子吸收分光光度法。植株重金属测定:经 105 ℃杀青并于 80 ℃烘干至恒重,经 HClO₄:HNO₃ (优级纯,V:V=13:87) 消煮后用 ICP-MS 测重金属离子浓度,丝瓜果实 Cd 浓度分别以鲜重和干重进行计算。Varian 820-MS 电感耦合等离子体质谱仪(美国瓦里安公司),配置碰撞/反应接口及 ICPM-SExpert 工作站。选择土壤标样作为样品制备的质量控制标样,用相同的制备方法处理标样。每测 10 个样品检测质控样,以检验仪器是否正常,误差是否在允许范围内。如果系统误差在控制范围之外,仪器须重新标准化,以保证分析数据的可靠与准确。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤中 Cd 浓度和形态的影响

从图 1 可以看出,试验前 T1 土壤的有效态 Cd 的含量明显高于 T2 土壤,但 T1 土壤有效态 Cd 含量变异较大。通过不同的丝瓜间作处理之后,土壤中的有效态 Cd 含量有不同程度的降低,土壤中 Cd 有效态减少率范围在 20%~80%之间(图 2)。从图 2 可以看出,各个处理对土壤有效态 Cd 的减少率 T1 土壤明显高于 T2 土壤,说明污染较严重的土壤中 Cd 有效态减少率相对更高。从各处理来看,不管是 T1 还是

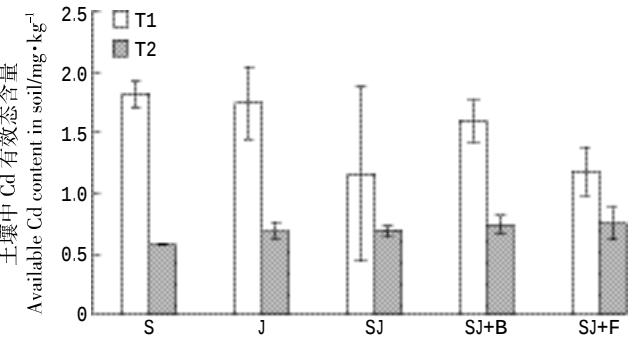
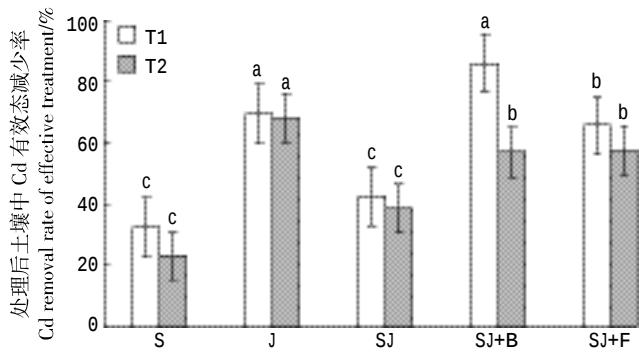


图 1 处理前供试土壤中 Cd 有效态含量
Figure 1 Available content of Cd in soil before



图中字母相同表示未达到 5% 差异水平
The same letters in figure denote no-difference at LSD 5%

图 2 处理后土壤中 Cd 有效态的减少率
Figure 2 Decrease rate of available Cd in soil after different treatments

T2 土壤,丝瓜单作(S 处理)对 Cd 有效态减少率最低;T1 土壤添加固镉菌的丝瓜和景天间作处理 (SJ+B)的土壤 Cd 有效态减少率高达 80%以上,说明工程菌通过对土壤有效态 Cd 进行吸附并钝化,减少了土壤中有有效态 Cd 的含量。相比 SJ 处理,SJ+F 处理土壤中 Cd 有效态减少率增加了 50%。

由表 3 可见,不同处理后土壤中 Cd 的存在形态明显不同。各处理土壤重金属 Cd 各形态大多表现为铁锰氧化物结合态>残渣态>可交换态>有机态>水溶态。T1 中 S 和 J 的土壤中 Cd 可交换态含量仅低于铁锰氧化物结合态,在丝瓜与景天间作、添加固镉菌和钙镁磷肥后,土壤中 Cd 残渣态含量增加,可交换态含量降低;T2 中 SJ+B 和 SJ+F 的土壤中残渣态 Cd 含量分别为 2.70%和 8.55%,低于同组的 S、J,但铁锰氧

表 3 处理后土壤中各 Cd 形态占总 Cd 量(%)

Table 3 Total cadmium content in different Cd forms in soil after different treatments

土壤 Soil	处理 Treatments	水溶态 Water soluble	可交换态 Exchange- able	铁锰氧化物结 合态 Fe-Mn bound	有机态 Organic bound	残渣态 Residual
T1	S	0.084a	13.8a	78.9a	3.19ab	3.95b
	J	0.037c	9.50b	82.9a	2.75b	3.73b
	SJ	0.062b	9.82b	65.3bc	5.44a	12.2a
	SJ+B	0.067b	6.35c	75.2ab	3.69ab	15.7a
	SJ+F	0.027c	7.44c	74.0ab	3.61ab	16.8a
T2	S	0.066a	10.1a	76.9b	8.98b	3.99d
	J	0.055b	7.34b	64.2c	18.2a	10.1b
	SJ	0.078a	6.39b	63.8c	9.55b	20.1a
	SJ+B	0.048b	6.19b	86.7a	4.33c	2.70d
	SJ+F	0.075a	7.81b	79.7b	3.89c	8.55c

化物结合态 Cd 含量很高。不管是 T1 还是 T2 土壤,相比 SJ, 经过添加菌液或钙镁磷肥的丝瓜与伴矿景天间作后,发现土壤中 Cd 铁锰氧化物结合态比例增加,而有机态明显减少,说明菌液和钙镁磷肥一样可使土壤中有效态 Cd 向难溶态 Cd 转化。这可能就是引起土壤 Cd 有效态去除的主要原因。

2.2 不同处理对丝瓜结果率的影响

各处理的丝瓜果实数见图 3,不同处理对丝瓜的果实数量影响十分明显。在 T1、T2 的 S 处理中,T1 的丝瓜果实数量明显小于 T2,说明土壤严重Cd 污染会影响丝瓜的果实数量。T1 土壤中,与 S 相比,其他处理丝瓜的果实数量均有增加,其中丝瓜植株土壤表面施加固镉菌液后丝瓜果实数量增加最多,与 S 和SJ 处理达到极显著性差异 ($P<0.01$);T2 土壤中,与其他处理相比,SJ 不同程度地降低了丝瓜的果实数量。无论 T1、T2,添加钙镁磷肥使丝瓜果实数量增多,但在 Cd 污染程度低的土壤中丝瓜果实数增加的更多。

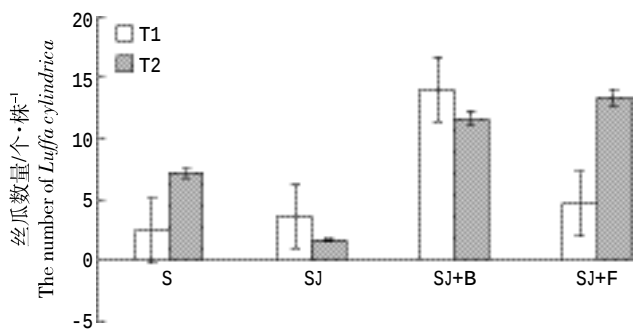


图 3 不同处理的丝瓜果实数

Figure 3 The number of Luffa cylindrica in different treatments

2.3 不同处理对丝瓜吸收 Cd 的影响

不同处理后丝瓜果实中 Cd 含量列于表 4 和表 5。在 T2 土壤中种植的丝瓜果实中,Cd 含量平均值为 $0.146\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高值为 $0.227\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最低值为 $0.051\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;T1 土壤中种植的丝瓜果实中,Cd 含量平均值为 $0.277\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高值为 $0.411\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最低值为 $0.087\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据试验测定,丝瓜果实的平均含水量为 93.2%,因此 T2 和 T1 的丝瓜果实中 Cd 平均含量分别为 $0.009\ 92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 和 $0.018\ 89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$ 。土壤 Cd 污染较严重的土壤,施加固镉菌和钙镁磷肥可降低丝瓜果实中 Cd 含量,在 Cd 污染较轻的土壤中,施加固镉菌和钙镁磷肥反而具有增加瓜果实中 Cd 含量的风险。

为了解丝瓜植株对土壤中 Cd 的去除能力,分别对 CK、T1 和 T2 土壤中的丝瓜单作处理的所有植株

表 4 T1 和 T2 土壤中丝瓜果实 Cd 浓度 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 The concentration of Cd in Luffa cylindrical fruits

土样	果实中 Cd Cd in fruits/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ DW}$	果实中 Cd Cd in fruits/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$
T1 最高值 (Max)	0.411	0.028
最低值 (Min)	0.087	0.006
平均值 (Mean)	0.277a	0.019a
T2 最高值 (Max)	0.227	0.015
最低值 (Min)	0.051	0.004
平均值 (Mean)	0.146b	0.010b

注:同一列数字后的字母相同表示未达 5% 差异水平。

Note: In a column, data followed by the same letters denote no difference at LSD 5%.

表 5 各处理丝瓜果实 Cd 浓度

Table 5 The concentration of Cd in Luffa cylindrical fruits in different treatments

处理 Treatment	果实中 Cd Cd in fruits/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ DW}$	果实中 Cd Cd in fruits/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ FW}$
T1 S	0.29 ± 0.18	0.02 ± 0.01
SJ	0.31 ± 0.01	0.02 ± 0.00
SJ+B	0.26 ± 0.05	0.02 ± 0.00
SJ+F	0.21 ± 0.03	0.01 ± 0.00
T2 S	0.14 ± 0.03	0.01 ± 0.00
SJ	0.10 ± 0.06	0.01 ± 0.00
SJ+B	0.15 ± 0.04	0.01 ± 0.00
SJ+F	0.20 ± 0.04	0.01 ± 0.00

地上部分进行混合,测定地上部茎叶 Cd 浓度。丝瓜地上部 Cd 浓度及其对土壤中 Cd 去除能力见表 6。丝瓜地上部(包括茎叶)Cd 浓度与土壤中有有效态 Cd 浓度相关,在 T1 土壤中生长的丝瓜地上部 Cd 含量是 T2 土壤中丝瓜的近 4 倍。相对于表 4,丝瓜茎叶中 Cd 浓度高于其果实。本试验中,丝瓜地上部对土壤 T2 和 T1 中 Cd 去除量分别为 0.181 、 $0.528\text{ mg}\cdot\text{株}^{-1}$ 。

已有研究表明,植物中 Cd 含量与土壤中有有效态重金属相关^[20-21]。由于供试土壤取自污染点的土壤,其

表 6 丝瓜地上部 Cd 浓度及其对土壤中 Cd 的去除能力

Table 6 The Cd concentration in Luffa cylindrical shoot and its Cd decrease rate from soil

处理 Treatment	地上部 Cd 浓度 Cd concentration in shoot/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ DW}$	地上部生物量 Shoot dry biomass (in average)/ kg DW	对土壤 Cd 移除能力/ $\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$ Cd removal rate from soil/ $\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1}$
CK	0.13		
T1	1.93	0.27	0.53
T2	0.55	0.33	0.18

中 Cd 含量各异,为了便于比较,将“果实中 Cd 含量与土壤中 Cd 有效态含量的比例”定义为丝瓜果实对土壤中有有效态 Cd 的转移率,以此来比较各种处理对丝瓜果实中 Cd 吸收量的影响(图 4)。在土壤有效态 Cd 较低(T2)时,相对于丝瓜单作,间作、间作施加微生物或钙镁磷肥处理中丝瓜果实中的 Cd 转移率差别不大;但是在土壤有效态 Cd 含量较高(T1)时,丝瓜与景天间作大幅增加了丝瓜对 Cd 的转移率,转移率达到 40.5%。有研究表明土壤中活性态 Cd 含量越高,植物吸收量越大^[21-22],可见受污染土壤 Cd 的赋存形态与生物有效性密切相关。本研究表明丝瓜与伴矿景天间作存在增加丝瓜果实 Cd 含量的风险,说明在污染土壤中应用超富集植物和农作物间作的方法进行边修复边生产存在较高食品安全风险,必须在间作的同时,采取相应措施降低农作物中 Cd 浓度。

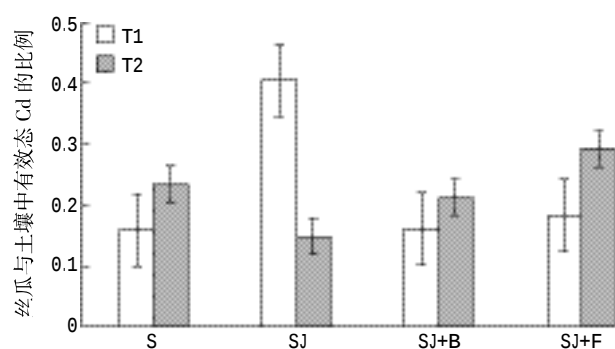


图 4 不同处理丝瓜果实吸收土壤中有有效态 Cd 的对比

Figure 4 Effect of available Cd in soil of different treatments on the absorption of *Luffa cylindrica*

2.4 不同处理对伴矿景天吸收 Cd 的影响

不同处理后伴矿景天地上部 Cd 含量列于表 7。伴矿景天地上部对 Cd 具有较强的吸收能力,T1 中 J 处理其地上部 Cd 含量最高,平均值达到 $64.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$,远超过丝瓜果实中含量最高值 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 和丝瓜地上部含量最高值 $1.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 。间作会减少伴矿景天地上部 Cd 含量,施加钙镁磷肥后伴矿景天地上部 Cd 含量最高减少了 $44.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤中有有效态 Cd 含量对伴矿景天地上部吸收 Cd 影响很大,如 T2 土壤中 Cd 有效态为 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,J 伴矿景天地上部 Cd 含量为 $8.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而当 T1 土壤中 Cd 有效态为 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,J 伴矿景天地上部 Cd 含量上升为 $64.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,两种土壤其他处理呈现相同的现象,表明伴矿景天对土壤中 Cd 具有主动富集的能力。

表 7 景天地上部 Cd 浓度及其对土壤中 Cd 的去除能力
Table 7 The Cd concentration in *Sedum plumbizincicola* shoot and its Cd removal rate from soil

处理 Treatment	土壤中有有效态 Cd 含量 Available content of Cd in soil/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	地上部 Cd 含量 Cd concentration in shoot/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$	地上部对土壤中 Cd 的移除量 Shoot Cd removal rate from soil/ mg
T1	J	64.4 ± 28.7	3.60 ± 1.84
	SJ	44.2 ± 20.8	0.85 ± 0.43
	SJ+B	45.8 ± 18.0	1.34 ± 1.19
	SJ+F	20.4 ± 1.6	0.50 ± 0.11
T2	J	8.08 ± 0.67	0.15 ± 0.02
	SJ	5.48 ± 0.41	0.23 ± 0.16
	SJ+B	7.88 ± 1.21	0.19 ± 0.11
	SJ+F	5.69 ± 1.87	0.07 ± 0.04

3 讨论

本研究表明,丝瓜-伴矿景天间作与单作相比明显增加了丝瓜对 Cd 的转移率,同时增大了丝瓜果实中 Cd 含量风险,虽然经测试所收获的丝瓜果实中 Cd 的含量均未超过国标的限定值,但是应引起重视。已有研究表明,超积累植物根系分泌的脂肪酸在根际环境中的积累,尤其是在还原条件下的积累会造成局部土壤酸性环境,可以将土壤中重金属从难溶态转化为有效态^[11-12]。因此,本项中丝瓜果实中 Cd 含量风险的增加,很有可能是因为超积累植物与作物间作时超积累植物根系分泌物造成的酸性环境形成的。

目前,重金属的修复方法主要有化学修复、生物修复和动物修复^[23]。微生物特别是细菌,数量众多、比表面积大、带电、代谢活动旺盛,耐 Cd 微生物在修复被重金属污染的土壤方面具有独特的作用,可以通过吸附和累积重金属降低土壤中重金属的毒性,并以此来净化有毒金属污染或回收有经济价值的金属^[24]。随着肥料在重金属污染土壤上的应用,钙镁磷肥已成为重要的土壤改良剂。陈晓婷等^[25]对重金属污染土壤上生长的小白菜研究发现,在重金属胁迫下,施用钙镁磷肥可降低重金属对小白菜的毒害作用,使小白菜生长发育增加,并且显著抑制了重金属 Cd 和 Pb 等元素向地上叶片部分的迁移。本研究中添加固镉菌的丝瓜和伴矿景天间作处理土壤有效态 Cd 降低率高达 80% 以上,说明本研究应用的工程菌对土壤有效态 Cd 进行了吸附并钝化,减少了土壤中有有效态 Cd 浓度;添加钙镁磷肥处理使土壤中有有效态 Cd 减少率增加了 50%,说明钙镁磷肥在一定程度上也降低了土壤中有有效态 Cd^[26-28]。虽然本研究发现伴矿景天间作可增

加丝瓜 Cd 含量风险,但却增加了丝瓜的结果数量,这可能是超积累植物根系分泌的氨基酸等有机物被土壤微生物利用后活性增加从而促进土壤养分转化、进而增加作物产量引起的。同时研究表明,菌剂和钙镁磷肥的添加进一步促进了丝瓜结果的数量^[29]。

以 GB 2762—2012《食品中污染物限量》的规定,新鲜蔬菜中 Cd 的限量为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$ 。根据试验测定,丝瓜果实的平均含水量为 93.2%,因此 T2 和 T1 的丝瓜果实中 Cd 平均含量分别为 $0.010 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$ 和 $0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$,所收获的丝瓜果实 Cd 浓度均未超过国标限定值。这一结论与所报道的丝瓜是一种 Cd 低积累蔬菜相吻合^[30],即使污染点的土壤已经超过国家土壤环境质量标准,但在丝瓜果实中所含有的 Cd 仍未超过国标食品中污染物限值。分析其中的原因,可能由于植物本能地尽可能少地将有毒物质运送到果实和种子,以保证繁殖,这种现象已有诸多报道^[31-32]。

4 结论

研究表明丝瓜与伴矿景天间作系统存在增加丝瓜果实 Cd 浓度的风险,但通过向丝瓜根际添加固镉菌或施加钙镁磷肥并进行间作可使土壤 Cd 有效态含量降低,而且添加固镉菌和施加钙镁磷肥可显著增加丝瓜结实数量,因此丝瓜与超积累植物伴矿景天间作可用于低污染土壤进行边修复边生产。但鉴于存在较高食品安全风险,在间作的同时可采取施固镉菌剂或钙镁磷肥等措施来降低果实部分 Cd 含量。

参考文献:

- [1] 杨期和, 赖万年, 杨和生, 等. 土壤 Cd 污染的生物修复[J]. 嘉应学院学报(自然科学), 2014, 32(5): 58-65.
YANG Qi-he, LAN Wai-nian, YANG He-sheng, et al. Bioremediation of Cd contaminated soil [J]. Journal of Jiaying University, 2014, 32(5): 58-65.
- [2] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. Cd 污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 205-209.
JIANG Xian-jun, LUO Yong-min, ZHAO Qi-guo, et al. The role of EDTA in Cd absorption and translocation by Indian Mustard[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 205-209.
- [3] 柳 絮, 范仲学, 张 斌, 等. 我国土壤镉污染及其修复研究[J]. 山东农业科学, 2007, 6: 94-97.
LIU Xu, FAN Zhong-xue, ZHANG Bin, et al. Study on soil cadmium pollution and its remediation in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2007, 6: 94-97.
- [4] 李 婧, 周艳文, 陈 森, 等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(24): 104-107.
LI Jin, ZHOU Yan-wen, CHEN Sen, et al. Actualities, damage and management of soil cadmium pollution in China[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(24): 104-107.
- [5] 徐冬寅, 张江华, 柯海玲, 等. 潼关金矿区农田土壤 Cd 污染分析[J]. 黄金, 2010, 31(5): 53-56.
XU Dong-yin, ZHANG Jiang-hua, KE Hai-ling, et al. Analysis on Cd contamination in farmland soil in Tongguan gold mining area[J]. Gold, 2010, 31(5): 53-56.
- [6] 马彩云, 蔡定建, 严 宏. 土壤镉污染及其治理技术研究进展[J]. 河南化工, 2013, 30: 17-21.
MA Cai-yun, CAI Ding-jian, YAN Hong. Soil Cd pollution and re-search progress of treatment techniques[J]. Henan Chemical Industry, 2013, 30: 17-21.
- [7] 吴龙华, 周守标, 毕 德, 等. 中国景天科植物一新种: 伴矿景天[J]. 土壤, 2006, 38(5): 632-633.
WU Long-hua, ZHOU Shou-biao, BI De, et al. Sedum plumbizincicola: A new species of the Crassulaceae from Zhejiang, China[J]. Soils, 2006, 38(5): 632-633.
- [8] 刘 玲, 吴龙华, 李 娜, 等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3422-3426.
LIU Ling, WU Long-hua, LI Na, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by Sedum plumbizincicola[J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3422-3426.
- [9] Jiang J P, Wu L H, Li N, et al. Effects of multiple heavy metal contamination and repeated phytoextraction by Sedum plumbizincicola on soil microbial properties[J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(1): 18-26.
- [10] 能凤娇, 吴龙华, 刘鸿雁, 等. 芹菜与伴矿景天间作对污泥农用锌镉污染土壤化学与微生物性质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1428-1434.
NENG Feng-jiao, WU Long-hua, LIU Hong-yan, et al. Effects of intercropping Sedum plumbizincicola and Apium graveolens on the soil chemical and microbiological properties under the contamination of zinc and cadmium from sewage sludge application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1428-1434.
- [11] 张淑香, 高子勤. 连作障碍与根际微生态研究 II. 根系分泌物与酚酸物质[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 152-156.
ZHANG Shu-xiang, GAO Zi-qin. Continuous cropping obstacle and rhizospheric microecology II. Root exudates and phenolic acids[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1): 152-156.
- [12] McGrath S P, Shen Z G, Zhao F J. Heavy metal uptake and chemical changes in the rhizosphere of Thlaspi caerulescens and Thlaspi ochroleucum grown in contaminated soils[J]. Plant and Soil, 1997, 188: 153-159.
- [13] 徐明飞, 郑纪慈, 阮美颖, 等. 不同类型蔬菜重金属(Pb, As, Cd, Hg)积累量的比较[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(1): 29-34.
XU Ming-fei, ZHENG Ji-chi, RUAN Mei-ying, et al. Comparison of the amounts of heavy metals accumulated by different groups of vegetables[J]. Acta Agriculture Zhejiangensis, 2008, 20(1): 29-34.
- [14] 王钢军, 张永志, 徐明飞, 等. 土壤重金属污染对蔬菜食用安全影响的研究[J]. 浙江农业科学, 2008(2): 134-137.

- WANG Gang-jun, ZHANG Yong-zhi, XU Ming-fei, et al. Study on the effect of heavy metal pollution on vegetable food safety[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2008(2):134-137.
- [15] 李志贤, 陈章, 陈国梁, 等. 镉富集植物油菜与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1):26-31.
- LI Zhi-xian, CHEN Zhang, CHEN Guo-liang, et al. Effects of maize-rapeseed intercropping on Cd uptake and accumulation by maize[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(1):26-31.
- [16] Xin J L, Huang B F, Yang Z Y, et al. Comparison of cadmium subcellular distribution in different organs of two water spinach(*Ipomoea aquatica* Forsk.) cultivars[J]. Plant and Soil, 2013, 372:431-444.
- [17] 王京文, 李丹, 柳俊, 等. 耐镉菌株对土壤镉形态及土壤微生物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9):1693-1699.
- WANG Jing-wen, LI Dan, LIU Jun, et al. Effects of cadmium tolerant bacteria on soil cadmium forms and microbial community structure[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(9):1693-1699.
- [18] 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, 2000:470-482.
- RU Ru-kun. Methods of soil agricultural chemistry analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:470-482.
- [19] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7):844-851.
- [20] 秦丽, 祖艳群, 湛方栋, 等. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):471-477.
- QIN Li, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill. and maize in intercropping systems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3):471-477.
- [21] 艾建超, 李宁, 王宁. 污灌区土壤—蔬菜系统中镉的生物有效性及迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):491-497.
- AI Jiang-chao, LI Ning, WANG Ning. The bioavailability and migration characteristics of cadmium in soil-vegetable system in sewage irrigation district[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3):491-497.
- [22] 张水勤, 王峰源, 姜慧敏, 等. 设施菜地土壤中速效磷是镉生物有效性的关键调控因子[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1721-1727.
- ZHANG Shui-qin, WANG Feng-yuan, JIANG Hui-min, et al. Available phosphorous is a key regulator of cadmium phytoavailability in greenhouse soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(9):1721-1727.
- [23] 梁家妮, 马友华, 周静. 土壤重金属污染现状与修复技术研究[J]. 农业环境与发展, 2009(4):45-49.
- LIANG Jiao-ni, MA You-hua, ZHOU Jing. Study on the status and remediation technology of heavy metal pollution in soil[J]. Agricultural Environment and Development, 2009(4):45-49.
- [24] 杨成德, 李振东, 陈秀蓉, 等. 高寒草地炭芽蓼内生拮抗固氮菌 Z19 的鉴定及其固氮功能[J]. 微生物学通报, 2014, 41(2):267-273.
- YANG Cheng-de, LI Zhen-dong, CHEN Xiu-rong, et al. Identification, pathogen inhibiting and nitrogen fixation of endophytic bacterium Z19 of *Polygonum viviparum*[J]. Microbiology China, 2014, 41(2):267-273.
- [25] 陈晓婷, 王果, 张亭旗, 等. 石灰与泥炭配施对重金属污染土壤上小白菜生长和营养吸收的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5):453-455.
- CHEN Xiao-ting, WANG Guo, ZHANG Ting-qi, et al. Incorporation of lime with peat on growth and nutrient elements uptake of pakchoi (*Brassica chinensis*) grown in heavy metal contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2002, 21(5):453-455.
- [26] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6):1585-1590.
- LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(6):1585-1590.
- [27] Changoh D P. Feasibility of phosphate fertilizer to immobilize cadmium in a field[J]. Chemosphere, 2008(70):2009-2015.
- [28] Hettiarach C, Pierzyn S R. In situ stabilization of soil lead using phosphorous[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(4):1214-1221.
- [29] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻镉吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11):2952-2958.
- SHEN Li-po, WU Long-hua, TAN Wei-na, et al. Effects of *Sedum plumbizincicola*-*Oryza sativa* rotation and phosphate amendment on Cd and Zn uptake by *O. sativa*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11):2952-2958.
- [30] 李博文, 谢建治, 郝晋珉. 不同蔬菜对潮褐土铅锌复合污染的吸收效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3):286-288.
- LI Bo-wen, XIE Jian-zhi, HAO Jin-min. The absorption effect of different vegetables on cinnamon soil cadmium zinc compound pollution [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(3):286-288.
- [31] 阮美颖, 徐明飞, 张永志, 等. 南瓜对重金属 As, Pb, Cd, Hg 的吸收及其积累规律[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(5):358-361.
- RUAN Mei-ying, XU Ming-fei, ZHANG Yong-zhi. Pumpkin's adaptability to As, Pb, Cd, Hg and the rule of heavy metals absorption and accumulation[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2008, 20(5):358-361.
- [32] 陈玉成, 赵中金, 孙彭寿, 等. 重庆市土壤—蔬菜系统中重金属的分布特征及其化学调控研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1):44-47.
- CHEN Yu-cheng, ZHAO Zhong-jin, SUN Peng-shou, et al. Distribution and control of heavy metals by additives in soil-vegetable system in Chongqing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(1):44-47.