

续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响

秦 丽, 祖艳群, 湛方栋, 李 元*, 王吉秀, 唐艳芬, 李鹏程

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:通过盆栽试验,研究了不同镉浓度(0、50、100、200 mg·kg⁻¹)对续断菊(*Sonchus asper* L. Hill)和玉米间作条件下两种植物镉吸收积累的影响。结果表明:与单作续断菊和玉米相比,间作使续断菊生物量提高了4.8%~64.9%,玉米生物量提高了4%~33%,间作续断菊体内镉含量较单作提高了31.4%~79.7%(100 mg·kg⁻¹镉处理除外)。与单作相比,在土壤镉含量为50~200 mg·kg⁻¹内,间作使玉米体内镉含量降低了18.9%~49.6%。单作时,续断菊地上部和根部镉含量都与土壤可溶态镉含量显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.962和0.976;间作条件下,玉米根、茎、叶中镉含量均与土壤可溶态镉含量显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.991、0.959和0.977。除对照外,间作使玉米镉有效转运系数降低,三个镉浓度下分别比单作降低了21%、71%和25%。不论是单作还是间作,续断菊镉转运系数都高于玉米。研究结果表明,续断菊和玉米间作促进了续断菊对土壤中镉的吸收和积累,同时抑制了玉米体内镉的积累量。

关键词:续断菊;玉米;间作;Cd;植物修复

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)03-0471-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.03.009

Absorption and Accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill. and Maize in Intercropping Systems

QIN Li, ZU Yuan-qun, ZHAN Fang-dong, LI Yuan*, WANG Ji-xiu, TANG Yan-fen, LI Peng-cheng

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to study the effects of cadmium levels (0, 50, 100 and 200 mg·kg⁻¹) on the Cd absorption and accumulation of *Sonchus asper* L. Hill and maize (*Zea mays* L.) under intercropping system. The results showed that biomass of *S. asper* and maize increased by 4.8%~64.9% and 4%~33% under intercropping system comparing with monoculture system, respectively. Cd contents of *S. asper* increased by 31.4%~79.7% under intercropping, except for decreased by 5.6% when soil Cd content was 100 mg·kg⁻¹. Cd content in maize decreased by 18.9%~49.6% under intercropping system when Cd content in the soil ranged from 50 to 200 mg·kg⁻¹. Significantly positive correlations between Cd contents in shoot and root and soil available Cd content were observed with correlation coefficients 0.962 ($P<0.05$) and 0.976 ($P<0.05$) under monoculture system, respectively. Significantly positive correlations between Cd contents in root, stem and leaf and soil available Cd were observed with correlation coefficients 0.991 ($P<0.01$), 0.959 ($P<0.05$) and 0.977 ($P<0.05$) under intercropping system, respectively. The effective transfer coefficient of Cd in maize was reduced by 21%~71% under intercropping system when soil Cd content ranging from 50 to 200 mg·kg⁻¹. Under both monoculture and intercropping systems, Cd effective transfer coefficient of *S. asper* was higher than that of maize. The results indicate that uptake and accumulation of Cd in *S. asper* under intercropping system could be promoted and content of Cd in maize could be reduced.

Keywords: *Sonchus asper* L. Hill.; maize; intercropping; cadmium; phytoremediation

我国农田土壤重金属污染日益严重,极大地影响着土壤环境质量、作物生长、产量、品质 and 安全性,严

重地限制着农业持续发展,威胁着人类健康^[1]。镉污染是农田重金属污染中最为严重的^[2]。Cd是生物毒性最强的重金属元素之一,其迁移性很强,且极易被植物吸收并积累^[3]。我国Cd污染土地面积约113万hm²,区域性的土壤镉污染严重,直接导致农作物减产和高镉积累^[4]。植物修复是土壤镉污染修复的最佳方法,但是由于常用于植物修复的超积累植物,往往生物量

收稿日期:2013-01-10

基金项目:国家自然科学基金云南联合项目 U1202236;云南省教育厅基金(2010Y340)

作者简介:秦 丽(1979—),女,讲师,博士研究生,主要从事土壤重金属污染与修复生态学研究。E-mail:qinli29752001@yahoo.com.cn

* 通信作者:李 元 E-mail:liyuan03@yahoo.com.cn

小、生长缓慢,修复效果并不理想^[5]。在重金属污染土壤的植物修复技术中应用间作模式,具有显著的经济、生态与环境效益^[6-7]。超累积植物与作物间作的植物修复技术,不需要停止种植土地进行植物修复,实现对重金属污染土壤边修复边治理,具有较强可行性与开发潜力^[8-10]。间作技术用于修复 Cd 污染土壤的效果较好。玉米和东南景天间作^[11-12]、印度芥菜和苜蓿间作^[13]、龙葵和大叶井口边草间作^[13]等研究结果都表明,间作能促进超富集植物对重金属的吸收。同时,间作比单作更适合于重金属复合污染土壤的植物修复,对重金属污染土壤修复具有较大意义。重金属富集植物和作物间作,既促进富集植物对重金属的吸收,又减少作物对重金属的积累,在提高修复效率的同时,降低农作物重金属含量。但是,富集植物和作物间作的模式还很少,富集植物和作物间作体系的研究仍不深入,富集植物和作物间作体系修复重金属污染土壤的作用机理仍不清楚。

续断菊(*Sonchus asper* L.Hill)是一种云南本土的 Cd 富集植物,具有生长快、生物量大等特点,对土壤 Cd 有较强的吸收和转运能力^[15-16]。在 Cd 污染土壤上将续断菊与玉米间作,有可能在修复 Cd 污染土壤的同时降低玉米 Cd 含量,是一种可持续利用耕地的农业生产方式。本文模拟 Cd 胁迫条件下,研究续断菊与玉米间作后对 Cd 吸收积累的影响,为续断菊应用于修复镉污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

续断菊种子采自会泽 Pb/Zn 矿区,播种前种子用 10% 的 H_2O_2 消毒 30 min,使用烤烟基质和漂盘育苗,待苗长到 6~7 cm 高时,选择长势良好,大小均一的幼苗进行盆栽试验。玉米品种为海禾 28 号,购自昆明市某种子分公司,播种前 10% 的 H_2O_2 消毒 10 min,然后在培养皿中促芽,发芽后播种到烤烟基质土中,待苗长到 10~15 cm 高时,选择长势良好,大小均一的幼苗移栽到镉处理土壤中进行盆栽试验。

供试土壤:云南农业大学校园甘蔗研究所内 0~20 cm 表层土,土壤类型为山地红壤,土壤的理化性质为 pH 值 7.69,有机质 $56.12 g \cdot kg^{-1}$,全 N $7.28 g \cdot kg^{-1}$,全 P $6.92 g \cdot kg^{-1}$,全 K $25.47 g \cdot kg^{-1}$,速效 P $27.6 mg \cdot kg^{-1}$,速效 K $460.7 mg \cdot kg^{-1}$,碱解氮 $160.9 mg \cdot kg^{-1}$,总 Cd $0.91 mg \cdot kg^{-1}$ 。

1.2 试验设计

采用盆栽试验 Cd 单因素 4 水平设计,向供试土

壤(风干土)中依次添加浓度为 0、50、100、200 $mg \cdot kg^{-1}$ Cd,每个浓度三次重复。每个浓度水平下分别设续断菊单作、玉米单作和续断菊/玉米间作 3 个处理,其中 0 $mg \cdot kg^{-1}$ 浓度为空白对照,共 36 盆。

盆栽试验在云南农业大学东校区大棚中进行。试验用盆栽泡沫箱长、宽、高分别为 50、30、30 cm,每盆装风干后过 2 mm 筛的土壤 15 kg,以 $CdCl_2 \cdot 2.5 H_2O$ 的水溶液浇到土壤中,混匀后在 60%田间持水量下平衡 10 d。单作续断菊留苗 8 株,行距和株距都为 10 cm;单作玉米留苗 2 株,行距为 20 cm;续断菊/玉米间作模式为 1 行玉米,2 行续断菊,玉米和续断菊行距为 20 cm,续断菊留苗 4 株,玉米留苗 1 株,保证与单作续断菊和玉米具有相同的密度。每两天浇一次水,用水量根据实际需求确定。90 d 后收获,并将每盆土壤混合均匀各取适量土样带回实验室分析。

1.3 测定指标与方法

收获时,将续断菊分成地上和地下两部分,玉米分成根、茎、叶三部分,分别用自来水冲洗后,再用去离子水冲洗干净,晾干后于 105 °C 杀青 30 min,然后 70 °C 烘干至恒重,分别测定干物质量。烘干样品用粉碎机全部粉碎、混匀,过 0.25 mm 筛后装袋备用。植物 Cd 含量的测定采用 HNO_3-HClO_4 消化,原子吸收分光光度法测定。土壤有效态 Cd 含量用 DTPA 提取($W:W = 1:2$),原子吸收分光光度法测定。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 进行常规分析,并利用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性测验。相关性分析采用 SPSS 软件分析。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对续断菊、玉米生物量的影响

续断菊单作时地上部生物量随镉处理浓度不同差异显著(表 1),随着镉处理浓度的增加,地上部生物量表现为先增加后降低。100 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉处理时地上部、根部生物量最大,分别比对照增加了 71.2% 和 33.3%。续断菊与玉米间作后,地上部生物量随镉处理浓度增加显著增加,200 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉处理时最大,与单作相比显著增加了 77.3% ($P < 0.05$);根部生物量则随镉处理浓度增加而降低,与对照相比,200 $mg \cdot kg^{-1}$ 镉处理时降低了 53.5%。同一镉浓度处理下,续断菊地上部、地下部生物量均为间作 > 单作。间作后地上部生物量增加了 3.3%~77.3%,地下部生物量分别增加了 118%、112%、10.6% 和 9.7%。

两种种植模式下,玉米根、茎、叶的生物量均随着镉处理浓度的增加而降低(表1)。从玉米各器官来看,不论是间作还是单作,在同一镉浓度处理下,玉米各器官的生物量均为茎>叶>根;同一镉浓度处理下,玉米根、茎器官的生物量均为间作>单作。200 mg·kg⁻¹镉处理时,不论是间作还是单作,玉米各器官的生物量均比对照显著降低。各个镉浓度处理下,间作后玉米总生物量(根+茎+叶)都高于单作,比单作增加了4%~33%。

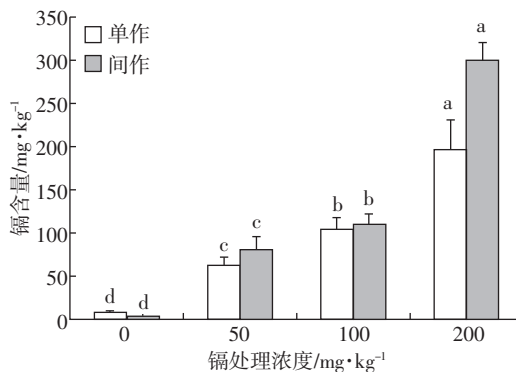
2.2 镉胁迫对续断菊和玉米镉含量的影响

2.2.1 镉胁迫对续断菊镉吸收累积的影响

无论是续断菊单作还是与玉米间作,续断菊地上部、地下部镉含量均随镉处理浓度的增加显著增加(图1、图2)。与单作相比,间作使续断菊地上部镉含量增加(对照除外),3个浓度处理下分别增加了29.8%、4.3%和52.0%($P<0.05$)。续断菊地下部镉含量除了100 mg·kg⁻¹镉处理时单作比间作增加了14.6%($P<0.05$)外,0、50、200 mg·kg⁻¹的镉胁迫均使间作续断菊地下部镉含量增加,分别比单作增加了289%($P<0.05$)、40.1%($P<0.05$)和12.0%。单作时续断菊体内镉含量为地上部>地下部,间作时为地下部>地上部。

2.2.2 镉胁迫对玉米各器官镉含量的影响

不同的镉处理浓度对玉米各器官镉积累量影响较大(图3、4、5)。无论是单作还是间作,与对照相比,50、100、200 mg·kg⁻¹的镉处理下,玉米的根、茎、叶中的镉含量都显著提高。单作时对照组中玉米茎、叶片均未检测出镉,而与续断菊间作后玉米茎、叶片镉含量分别为0.96 mg·kg⁻¹和1.24 mg·kg⁻¹。同一镉浓度处理下(对照除外),间作各器官镉含量都比单作降低,叶片中分别减少了17.0%($P<0.05$)、14.9%($P<0.05$)和30.1%,茎中镉含量分别比单作减少了49.3%($P<0.05$)、33.2%($P<0.05$)和34.8%($P<0.05$),根中镉



图中不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Values with different letter indicate a significant difference($P<0.05$), the same below

图1 镉胁迫对续断菊地上部镉含量的影响

Figure 1 Shoot Cd contents of *Sonchus asper*(L.) Hill under Cd stress

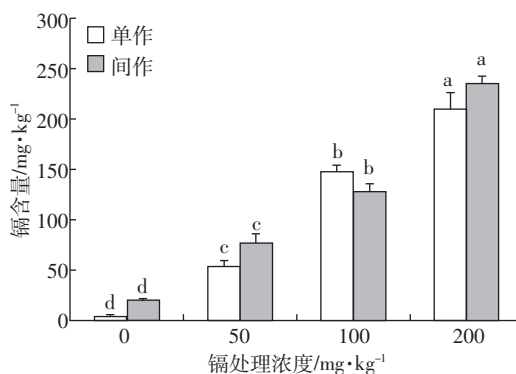


图2 镉胁迫对续断菊地下部镉含量的影响

Figure 2 Root Cd contents of *Sonchus asper*(L.) Hill under Cd stress

含量分别比单作减少了2.8%、18.2%、28.6%和55.9%($P<0.05$)。

从玉米各器官对镉的吸收情况来看,不论是间作还是单作,在同一镉浓度处理下,玉米各器官的镉含

表1 镉胁迫对续断菊和玉米生物量的影响(g·株⁻¹)

Table 1 Effects of different soil Cd concentration on the biomass of *Sonchus asper*(L.)Hill and Maize(g·plant⁻¹)

镉浓度/ mg·kg ⁻¹	续断菊单作		续断菊间作		玉米单作			玉米间作		
	地上部	根部	地上部	根部	根部	茎	叶	根部	茎	叶
0	1.21 d(0.05)	0.40 b(0.03)	1.44 d(0.05)	0.85 a(0.05)	2.31 a(0.18)	10.17 a(0.15)	10.14 a(0.72)	3.78 a(0.11)	11.01 a(0.51)	8.71 a(0.20)
50	1.30 c(0.03)	0.36 b(0.04)	1.98 c(0.04)	0.76a(0.05)	1.98 b(0.12)	8.40 b(0.35)	5.99 b(0.52)	2.93 b(0.19)	10.32 b(0.27)	8.60 a(0.43)
100	2.07 a(0.06)	0.52 a(0.07)	2.14 b(0.08)	0.58b(0.06)	1.45 c(0.15)	7.44 c(0.24)	4.73 c(0.75)	2.70 b(0.25)	9.26 c(0.16)	6.18 b(0.24)
200	1.46 b(0.04)	0.40 b(0.04)	2.60 a(0.10)	0.40 c(0.04)	0.98 d(0.10)	3.04 d(0.17)	2.95 d(0.10)	2.06 c(0.14)	4.17 d(0.21)	3.00 c(0.15)

注:表中的结果为平均值,括号内为标准差。同一列的不同字母表示用 Duncan 法测试时 5%水平上的差异性显著。下同。

Notes: Results are means and SE. The different letter in the same column meant significant differences between the treatments at 0.05 leve1. The same be-low.

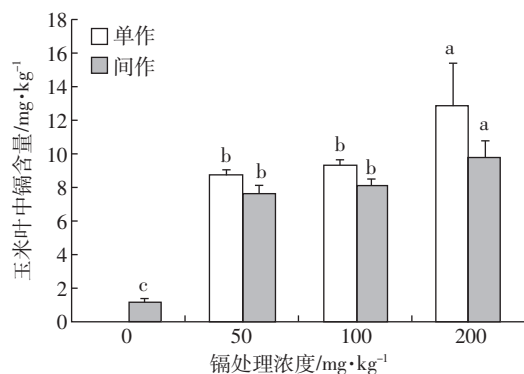


图3 镉胁迫对玉米叶中镉含量的影响

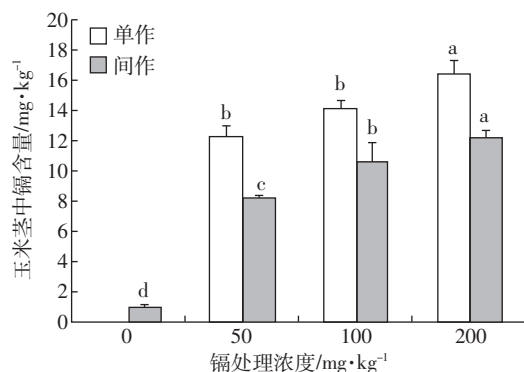
Figure 3 Leaf Cd contents of *Zea mays* L. under Cd stress

图4 镉胁迫对玉米茎中镉含量的影响

Figure 4 Stem Cd contents of *Zea mays* L. under Cd stress

量均为根>茎>叶。200 mg·kg⁻¹的镉处理下,单作根部的镉含量是茎部的7.1倍,是叶部镉含量的9.1倍;间作时根部的镉含量分别是茎、叶部镉含量的4.2倍和5.2倍。

2.3 镉胁迫对土壤可溶态镉含量的影响

随着土壤镉处理浓度的增加,续断菊单作、玉米单作、续断菊和玉米间作三种种植方式下,土壤可溶态镉含量都显著增加(图6)。且在土壤镉浓度为50~200 mg·kg⁻¹的范围内,土壤镉活化率(土壤有效态镉/土壤全镉)都在74%以上,100、200 mg·kg⁻¹镉处理时,间作土壤活化率显著高于单作。

同一镉浓度处理下(50 mg·kg⁻¹除外),续断菊与玉米间作后土壤可溶态镉含量显著增加($P<0.05$),各浓度镉处理后,间作土壤可溶态镉含量比续断菊单作时分别增加了220%、3%、25%和12%;比玉米单作时分别增加了480%、9%、32%和26%。

单作时,续断菊地上部和根部镉含量都与土壤可溶态镉含量显著正相关,其相关系数分别为0.962和0.976,玉米叶中镉含量与土壤可溶态镉含量显著正相关($r=0.958, P<0.05$);间作条件下,玉米根、茎、叶中镉

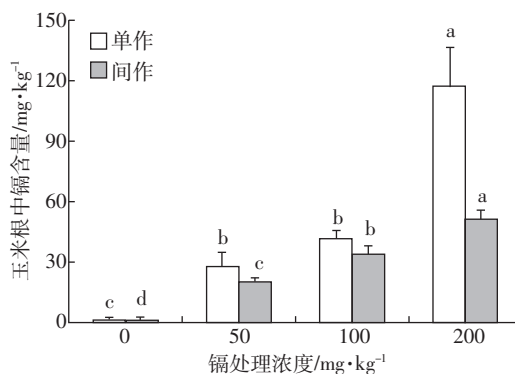


图5 镉胁迫对玉米根中镉含量的影响

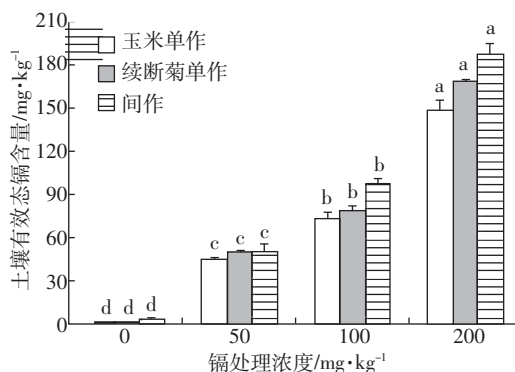
Figure 5 Root Cd contents of *Zea mays* L. under Cd stress

图6 镉胁迫对土壤有效态镉含量的影响

Figure 6 Available Cd contents in soil under Cd stress

含量均与土壤可溶态镉含量显著正相关,相关系数分别为0.991($P<0.01$)、0.959($P<0.05$)、0.977($P<0.05$)。

2.4 镉胁迫对续断菊和玉米镉转运系数的影响

由表2可见,在土壤镉浓度为100 mg·kg⁻¹时,间作续断菊镉转运系数比单作提高了14%,其余浓度下则降低了43%~54%。在土壤镉浓度为200 mg·kg⁻¹时,间作玉米镉转运系数比单作提高了33%,50、100 mg·kg⁻¹镉处理时则降低了45%和43%。不论是单作还是间作,续断菊镉转运系数都高于玉米。

随着镉处理浓度的增加,间作续断菊的转运系数显著增加($P<0.05$)。在土壤镉浓度为100、200 mg·kg⁻¹时,间作续断菊转运系数比单作提高了3.3%和13.2%,其他浓度下则降低了77%和62%。除对照外,间作玉米镉有效转运系数都低于单作,三个镉浓度下分别降低了21%、71%和25%(表3)。

3 讨论

重金属富集植物和作物种植在一起,富集植物能减少作物对重金属的吸收量,同时富集植物提取重金属的效率比单种超富集植物明显提高。Zn富集植物

表 2 续断菊与玉米各器官镉含量与土壤可溶态镉含量相关性(n=3)

Table 2 The correlations between the soil available Cd and Cd concentrations of different organs in maize and <i>Sonchus asper</i> L. Hill(n=3)										
土壤可溶态镉	续断菊单作		续断菊间作		玉米单作			玉米间作		
	地上部	根部	地上部	根部	根	茎	叶	根	茎	叶
续断菊单作	0.962*	0.976*								
玉米单作					0.920	0.941	0.958*			
间作			0.896	0.956*				0.991**	0.959*	0.977*

注:* 显著水平 $P<0.05$, ** 极显著水平 $P<0.01$ 。

表 3 镉胁迫下续断菊和玉米的镉转运系数

Table 3 Cd transport coefficients of *Sonchus asper* L. Hill and maize under Cd stress

镉浓度/mg·kg ⁻¹	续断菊单作		续断菊间作		玉米单作		玉米间作	
	转运系数	有效转运系数	转运系数	有效转运系数	转运系数	有效转运系数	转运系数	有效转运系数
0	1.1	3.5	0.5	0.8	0	0	1.3	3.4
50	1.5	5.5	0.8	2.1	1.1	3.3	0.6	2.6
100	0.7	3.0	0.8	3.1	0.7	3.8	0.4	1.1
200	1.4	5.3	0.8	6.0	0.3	0.8	0.4	0.6

注:转运系数=植物地上部 Cd 含量/地下部 Cd 含量;有效转运系数=(植物地上部 Cd 含量×植物地上部生物量)/(地下部 Cd 含量×植物地下部生物量)

遏蓝菜(*T.caerulescens*)与大麦种植在一起,减少了大麦对 Zn 的吸收^[17]。玉米和东南景天间作,显著提高了富集植物东南景天的生物量^[9,12]。本试验中,间作后续断菊和玉米生物量都提高,间作后续断菊生物量提高了 4.8%~64.9%,玉米生物量提高了 4%~33%。原因可能是间作体系增加了植物地上部和根部的生物有效性,改善了生态功能,改变了根际环境和根系分泌物的种类和数量,而根系分泌物不仅直接影响养分的生物有效性,还对作物根系形态、生理、根际微生物产生一定影响,根际微生物对植物营养元素的吸收起着调节作用^[18-19]。同时,间作使续断菊体内镉含量提高,与黑亮^[9]等的研究结果相似。这说明间作提高了富集植物续断菊的生物量和镉吸收积累量,虽然间作后续断菊转运系数有所降低,但是间作后续断菊生物量提高,使有效转运系数在 100、200 mg·kg⁻¹ 镉处理时比单作增加,提高了续断菊对镉污染土壤的修复效率。玉米与续断菊间作后,玉米的总生物量增加,但间作后玉米根、茎、叶中镉含量显著降低,说明镉胁迫对玉米造成了一定的影响。无论是单作还是间作,各个镉处理浓度下,玉米吸收的镉主要积累在根部,转运系数都较低,虽然间作提高了玉米各器官的生物量,但由于间作使玉米各器官镉吸收积累量减少,间作后的有效转运系数都比单作低(对照除外)。

重金属富集植物和作物间作时,间作体系中种间相互作用影响了作物对重金属的吸收。间作的富集植物与作物的交互作用有 3 种类型:(1) 富集植物在自

身大量吸收镉的同时抑制了作物对镉的吸收;(2)间作富集植物在自身大量吸收镉的同时促进了作物对镉的吸收;(3)富集植物自身积累很低的镉,却促进了作物对镉的吸收。李凝玉等^[20]研究了不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响,结果表明间作植物与玉米对 Cd 的吸收具有不同的交互作用特征,籽粒苋在自身大量累积 Cd 的同时,一定程度上抑制了与其间作的玉米的 Cd 积累量;黑亮^[9]等用 Zn 超富集植物东南景天与玉米套作,东南景天提取重金属的效率明显提高,玉米对 Cd 和 Zn 的吸收显著减少,原因可能在于玉米根系降低溶液 pH 和提高水溶性有机物(DOC),从而可向超富集东南景天一侧输送更多的水溶态 Zn 和 Cd,同时东南景天对 Cd/Zn 的强吸收作用。吴华杰等^[21]研究表明,水稻和小麦间作种间根系相互作用降低了两作物地上部对 Cd 的吸收和累积,也降低了小麦籽粒 Cd 浓度。两种生态型东南景天套种时,根系的交互作用使非超积累生态型东南景天的地上部和根系的生物量、根系 Zn 含量显著增加^[22]。

本试验中,除对照外,续断菊与玉米间作后,续断菊在大量吸收镉的同时,抑制了玉米对镉的吸收。原因可能是种间根系的相互作用降低了玉米对 Cd 的吸收。对于这一结果,有待于从间作之后的根际环境变化来解释其机理。目前的研究显示,土壤 pH 值是影响镉活性的最重要的因素,而镉对植物分泌 H⁺ 存在抑制作用^[123],所以对此试验结果可能的机理解释是:续断菊与玉米间作时,由于养分竞争等原因,续断

菊和玉米分泌更多的根系分泌物来活化土壤中的养分,而低分子有机酸是根系分泌物的主要成分,有机酸与镉形成螯合物,并降低根际 pH,从而提高镉的生物有效性,而续断菊对 Cd 有强吸收作用,吸收的镉能进入续断菊的根系并转移到续断菊的根部和地上部。间作的续断菊和玉米对镉的吸收存在协同与竞争作用。有关间作体系中续断菊抑制玉米镉吸收的机理则有待进一步查清。

4 结论

(1)间作使续断菊地上部、根部生物量都提高,间作后地上部生物量增加了 3.3%~77.3%,地下部生物量增加了 9.7%~118%。在同一镉浓度处理下,续断菊地上部、地下部生物量都为间作 > 单作。各个镉浓度处理下,间作后玉米总生物量(根+茎+叶)都高于单作,分别比单作增加了 4%~33%。不论是间作还是单作,在同一镉浓度处理下,玉米根、茎、叶各器官的生物量均为茎>叶>根。

(2)除土壤镉含量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,间作续断菊体内镉含量较单作降低了 5.6%,其他三个镉浓度下,间作续断菊体内(地上部+根部)镉含量较单作提高了 31.4%~79.7%。除对照外,间作后玉米各器官镉含量都降低,在土壤镉含量为 $50 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 内,间作使玉米体内镉含量降低了 18.9%~49.6%。无论是单作还是间作,玉米吸收的镉主要积累在根部。

(3)续断菊和玉米间作后,土壤可溶态镉含量都比续断菊单作增加了 3%~220%,比玉米单作增加 9%~480%。不论是单作还是间作,续断菊镉转运系数都高于玉米。

参考文献:

- [1] 丁竹红,尹大强,胡忻,等.矿区附近农田土壤中重金属和矿质元素浸提研究[J].农业环境科学学报,2008,27(5):1774-1778.
DING Zhu-hong, YIN Da-qiang, HU Xin, et al. Extraction of heavy metals and mineral elements in agricultural soils around mine area using biodegradable and non-biodegradable Chelators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1774-1778.
- [2] 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.
LIU Hai-jun, CHEN Yuan-quan, SUI Peng, et al. The uptake and accumulation effect of Cd in the Maize-crabgrass intercropping system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(15): 206-210.
- [3] 茹淑华,苏德纯,王激清.土壤镉污染特征及污染土壤的植物修复技术机理[J].中国生态农业学报,2006,14(4):29-33.
RU Shu-hua, SU De-chun, WANG Ji-qing. Characteristics of Cd pollution in soil and the mechanisms of phytoremediation for soil contamination[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(4): 29-33.
- [4] ZU Yan-qun, LI Yuan, CHEN Jian-jun, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5): 755-762.
- [5] HAO Han-zhou, ZHONG Ru-gang, MIAO Yu-ran, et al. The intercropping influence on heavy metal uptake for hyperaccumulators[C]. 2012 International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology: 1826-1828.
- [6] Nie S W, Gao W S, Chen Y Q, et al. Use of life cycle assessment methodology for determining phytoremediation potentials of maize-based cropping systems in fields with nitrogen fertilizer over-dose[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(15): 1530-1534.
- [7] Knorzer H, Graeff-Honninger S, Guo B Q, et al. The rediscovery of intercropping in China: A traditional cropping system for future Chinese agriculture: A review[J]. *Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms*, 2009, 2: 13-44.
- [8] Wu Q, Wei Z, Ouyang Y. Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum alfredii* H: Effects of chelator and co-planting[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2007a, 180(1): 131-139.
- [9] 黑亮,吴启堂,龙新宪,等.东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应[J].环境科学,2007,28(4):4852-4858.
HEI Liang, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Effect of co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 4852-4858.
- [10] 卫泽斌,郭晓方,丘锦荣,等.间套作体系在污染土壤修复中的应用研究进展[J].农业环境科学学报,2010,29(B03):267-272.
WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, QIU Jin-rong, et al. Innovative technologies for soil remediation: Intercropping or co-cropping [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(B03): 267-272.
- [11] Li N Y, Li Z A, Zhuang P, et al. Cadmium uptake from soil by maize with intercrops[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2009a, 199(1): 45-56.
- [12] 蒋成爱,吴启堂,吴顺辉,等.东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J].中国环境科学,2009,29(9):985-990.
JIANG Cheng-ai, WU Qi-tang, WU Shun-hui, et al. Effect of Co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9): 985-990.
- [13] 李新博,谢建治,李博文,等.印度芥菜-苜蓿间作对镉胁迫的生态响应[J].应用生态学报,2009,20(7):1711-1715.
LI Xin-bo, XIE Jian-zhi, LI Bo-wen, et al. Ecological responses of *Brassica juncea*-alfalfa intercropping to cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1711-1715.
- [14] 熊国煥,高建陪,王宏镔,等.间作条件下螯合剂对龙葵和大叶井口边草吸收重金属的影响[J].农环境科学学报,2011,30(4):666-676.
XIONG Guo-huan, GAO Jian-pe, WANG Hong-bin, et al. Effects of chelators on the uptake of heavy metals by *Solanum nigrum* and *Pteris cretica* var. *Nervosa* growing in an intercropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 666-676.
- [15] 李元,方其仙,祖艳群.两种生态型续断菊对镉累积特征研究[J].西北植物学报,2008,28(6):1150-1154.
LI Yuan, FANG Qi-xian, ZU Yan-qun. Accumulation characteristics

- of two ecotypes *Sonchus asper*(L.) Hill.to Cd[J]. *Acta Bot Boreal Occident Sin*, 2008, 28(6):1150-1154.
- [16] 秦 丽,祖艳群,李 元. Cd 对超累积植物续断菊生长生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(B10):53-57.
- QIN Li, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effects of Cd on the physiological characteristics and growth of the *Sonchus asper*(L.)Hill.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(B10):53-57.
- [17] Gove B, Hutchinson J J, Young S D. Uptake of metals by plants sharing a rhizosphere with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2002, 4(4):267-281.
- [18] 郝艳茹, 劳秀荣, 孙伟红, 等. 小麦/玉米间作作物根系与根际微环境的交互作用[J]. 农村生态环境, 2003, 19(4):18-22.
- HAO Yan-ru, LAO Xiu-rong, SUN Wei-hong, et al. Interaction of roots and rhizosphere in the wheat-maize intercropping system[J]. *Rural Eco Environment*, 2003, 19(4):18-22.
- [19] 王吉秀, 祖艳群, 李 元, 等. 玉米和蔬菜不同间套模式对重金属 Pb、Cu、Cd 累积的影响研究 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2168-2173.
- WANG Ji-xiu, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Effects of maize and vegetable intercropping system on accumulation of Pb, Cu and Cd in plants [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2168-2173.
- [20] 李凝玉, 李志安, 丁永祯, 等. 不同作物与玉米间作对玉米吸收积累镉的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6):1369-1373.
- LI Ning-yu, LI Zhi-an, DING Yong-zhen, et al. Effects of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6):1369-1373.
- [21] 吴华杰, 李 隆, 张福锁. 水稻/小麦间作中种间相互作用对镉吸收的影响[J]. 中国农业科技导报, 2003(5):43-47.
- WU Hua-jie, LI Long, ZHANG Fu-suo. The Influence of interspecific interactions on Cd uptake by rice and wheat intercropping[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2003(5):43-47.
- [22] 王艳红, 龙新宪, 刘洪彦, 等. 两种生态型东南景天套种对其生长和吸收土壤中 Zn 的影响[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(3):6-10.
- WANG Yan-hong, LONG Xin-xian, LIU Hong-yan, et al. Effects of intercropping of two ecotypes of *Sedum alfredii* on their plant growth and zinc uptake from soils[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2007, 28(3):6-10.
- [23] 常学秀, 段昌群, 王焕校. 根分泌作用与植物对金属毒害的抗性[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2):315-320.
- CHANG Xue-xiu, DUAN Chang-qun, WANG Huan-xiao. Root excretion and plant resistance to metal toxicity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2):315-320.