

谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 等. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与 Cd 形态分布状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 53–60.

TAN Jian-bo, ZHAN Fang-dong, LIU Ning-ning, et al. Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 53–60.

续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征 与 Cd 形态分布状况研究

谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 李 元, 祖艳群*

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:通过田间试验,研究间作和单作两种种植模式下植物根际土壤 pH、有机质、碱解氮、速效钾、速效磷和不同形态 Cd 分布状况变化,考察综合因素对土壤重金属 Cd 形态分布状况与续断菊(*Sonchus asper* L.Hill)和蚕豆(*Vicia faba* L.)两种植物吸收 Cd 的影响。结果表明:随着植物的生长,单作蚕豆与单作续断菊土壤 pH 值没有显著变化,间作土壤 pH 值下降 0.11 个单位;间作土壤有机质比单作蚕豆和单作续断菊分别增加 12.64%和 20.13%;随着植物的生长,间作与单作蚕豆碱解氮含量分别显著增加 139.87%、155.15%;间作与单作续断菊土壤速效钾含量接近,变幅在 5%左右,单作蚕豆下降 10.60%;不同种植模式土壤速效磷含量均呈现下降趋势,间作显著下降 7%左右,单作蚕豆与续断菊下降量接近;各时期 Cd 各形态含量分布为可交换态>碳酸盐结合态>铁锰氧化物结合态>有机物结合态;成熟期间作 Cd 可交换态含量比单作蚕豆与单作续断菊分别下降 21.98%、22.13%,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态含量没有差异性;间作蚕豆生物量相比单作降低了 24.77%,间作续断菊生物量相比单作增加 15.29%;单作蚕豆根、叶、豆荚与籽粒 Cd 质量分数显著大于间作蚕豆,间作续断菊地上部 Cd 质量分数显著大于单作,根部无差异。总之,间作增强了续断菊对 Cd 的吸收,降低了蚕豆对 Cd 的吸收。

关键词:间作;根际土壤;速效养分;镉

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)01-0053-08 **doi:**10.11654/jaes.2016.01.007

Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system

TAN Jian-bo, ZHAN Fang-dong, LIU Ning-ning, LI Yuan, ZU Yan-qun*

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

Abstract: Intercropping food crops with plants with high metal-accumulating ability may reduce the accumulation of metals in the food crops. In this study, a field plot experiment was conducted to examine soil chemical properties (pH value, organic matter, available nitrogen, available potassium, and available phosphorus), soil Cd form distribution, and plant Cd accumulation in monoculture and intercropping systems of *Sonchus asper* L. Hill and *Vicia faba* L. Results indicated that: (1) During the experimental period, soil pH values in *V. faba* and *S. asper* monoculturing plots did not significantly change, but declined by 0.11 units in intercropping plot, compared with the initial soil. (2) Soil organic matter content in the intercropping plot was 12.64% and 20.13% higher than that in *V. Faba* monoculture and *S. asper* monoculture, respectively. (3) Compared with the initial soil, intercropping and monocropping *V. faba* increased soil available nitrogen by 139.87% and 155.15%, respectively; monocropping *V. faba* decreased available potassium by 10.6% while there was little difference in soil available potassium in other systems; soil available phosphorus content showed reduction in all systems. (4) Soil Cd forms were in order of exchangeable > carbonates bound > iron and manganese oxides bound > organic matter bound. Exchangeable Cd content was 21.98% and 22.13% higher in intercropping systems than in *V. faba* and *S. asper* monocultures at plant mature stage. However, no difference was observed in other Cd forms. (5) The biomass of *S. asper* increased by 15.29% in intercropping system, compared with its monoculture, whereas that of *V. faba* was 24.77% lower in intercropping than in monoculture system. (6) Content of Cd in roots, leaves, bean pods and beans was

收稿日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金—云南省联合基金(U1202236); 国家自然科学基金(41461093)

作者简介: 谭建波(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染与修复生态学研究。E-mail: 237958437@qq.com

* 通信作者: 祖艳群 E-mail: 649332092@qq.com

significantly lower in *V. faba* intercropping than in monoculturing systems. Cadmium content in shoot of *S. asper* was significantly higher in intercropping than in monoculture, but Cd content in *S. asper* roots was not different. In conclusion, intercropping *V. faba* with *S. asper* promotes Cd accumulation in *S. asper* but reduces Cd content in *V. faba*.

Keywords: intercropping; rhizosphere soil; available nutrients; cadmium

矿粮复合区,指该区域不仅归属于粮食主产区,同时归属于矿产资源主产区,是矿产和粮食复合主产区的简称^[1]。我国的矿粮复合区,矿产资源的开采导致农田土壤及其生产的农产品重金属污染日益严重,受重金属含量超标的农产品主要产自中、轻度重金属污染的矿粮复合区。会泽县是云南省大型的铅锌矿之一^[2-3],长期的土法冶炼对环境造成了严重的污染,尤其对农田土壤肥力造成影响^[4]。

间作是我国农业的重要耕作模式之一,合理间作在增加作物产量、提高土地利用率、有效利用光热资源、促进水分和养分吸收利用、增强作物抗病性等方面有着巨大优势,在提高农业资源利用率、增加产量等方面已有较深入的研究^[5-7],而在重金属中、轻度污染的矿粮复合区农田,通过将某种重金属的低累积作物与相应的重金属富集植物或其他非食用经济作物种植在一起,可以同时改变多种影响土壤重金属有效态含量的土壤理化因素,从而有可能实现在修复土壤重金属污染的同时,收获达到一定卫生标准的农产品,达到治理和生产同时进行的目的^[8-10]。针对当前我国农田污染特别是重金属污染日趋严重的背景,选择合适的植物,组成具有一定功能的农业复合体系,以实现污染农田的边生产边修复,是一条符合我国国情的农业生产新措施^[11-12]。

土壤中的重金属进入植物体内能对植物产生毒害作用,轻则植物体的代谢过程发生紊乱,生长发育受阻,重则导致植物死亡^[13]。土壤中能直接被植物吸收的重金属生物有效态含量决定重金属对植物的危害程度,土壤中有效态重金属含量越高,作物生长所受到的危害越大。决定土壤重金属生物有效性的因素主要包括土壤重金属全量水平、土壤酸碱度、有机质含量、土壤氧化还原水平、阳离子交换量、土壤矿物组成、土壤质地和类型以及土壤中各元素间的相互作用等,通常认为 pH 和有机质是主要的影响因素^[14-16]。

植物对 Cd 的吸收和累积受多种因素影响,包括植物种类、Cd 形态和根际土壤理化性质等方面。为了探究续断菊与蚕豆间作后根际理化性质改变及对 Cd 形态的影响,本文以 Cd 富集植物续断菊与蚕豆作为研究材料,通过田间试验,研究间作和单作两种种植

模式下植物根际土壤 pH、有机质、碱解氮、速效钾、速效磷和不同形态 Cd 分布状况变化,考察综合因素影响下对土壤重金属 Cd 形态分布状况与续断菊和蚕豆两种植物吸收 Cd 的影响,丰富间作对植物根际理化环境影响的相关信息,明确蚕豆与续断菊间作对 Cd 形态分布状况与续断菊和蚕豆两种植物吸收 Cd 的影响,进而为促进重金属污染农用地修复实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与方法

本试验选取蚕豆(尼加拉)、续断菊(当地重金属富集植物)为试验材料,于 2014 年 9 月至 2015 年 4 月进行试验。

试验地点位于云南省会泽县者海镇玛色卡村(103°38'12"E、26°34'21"N),平均海拔 2120 m,矿区气候温和,雨量充沛,属温带山地半潮湿气候,具有独特的高原季风气候和丰富的立体气候特点。土壤背景值为:全磷 15.8 g·kg⁻¹,速效磷 28.2 mg·kg⁻¹,速效钾 122 mg·kg⁻¹,碱解氮 59.98 mg·kg⁻¹,有机质 16.1 g·kg⁻¹,镉质量分数 25 mg·kg⁻¹,pH5.5。

试验设置续断菊||蚕豆间作(2 行续断菊,1 行蚕豆)、蚕豆单作、续断菊单作 3 种植模式,3 个重复。续断菊单作、蚕豆单作、间作株行距均是 10 cm。每个小区面积为 3 m×2 m,小区间筑埂,随机排列,共 9 个小区。蚕豆与续断菊株行距均为 10 cm,均为单株种植,行距和株距设置均为当地农民广泛采用模式,符合当地农业生产实际情况。续断菊使用烤烟型基质和漂盘育苗,待苗长到 5~6 cm,选择长势良好、大小均一的幼苗在蚕豆播种时(9 月 26 日)进行移栽。

施肥用量为磷肥(P₂O₅)75 kg·hm⁻²,钾肥(K₂O)75 kg·hm⁻²。蚕豆、续断菊全部磷钾肥基施,不追施磷钾肥,不施氮肥。按常规方法进行田间管理。

1.2 采样方法及预处理

分别在蚕豆幼苗期(10 月 31 日)、花蕾期(12 月 31 日)、成熟期(3 月 31 日)对单作和间作小区采样,每小区每次随机多点采样作为一个混合样品,采用抖土法收集根际土壤。土壤样品阴凉通风处自然风干,

剔除样品中植物根系、有机残渣以及可见侵入体,用木质工具碾碎并用玛瑙研钵研磨,充分搅拌均匀后过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用。

将续断菊分成地上和地下两部分,蚕豆分成根、茎、叶、豆荚、籽粒 5 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 ℃杀青 30 min,然后 70 ℃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。

1.3 土壤理化性质及 Cd 形态测定

土壤 pH 值、有机质、碱解氮、速效钾、速效磷的测定方法参照鲍士旦《土壤农化分析》和吕贻忠《土壤学实验》。不同形态(可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态)的 Cd 含量采用 Tessier 连续浸提-原子吸收分光光度法测定(4520-TF 原子吸收分光光度计,苏州)。

土壤样品和植物样品分别用浓硝酸-浓盐酸-高氯酸、硝酸-高氯酸消煮后采用石墨炉-原子吸收光谱法测定 Cd 含量。

1.4 数据处理方法

数据采用 Excel 2003 进行常规分析,土壤与植物之间、植物地上部与根之间重金属含量、各 Cd 形态之间的差异性、相关性采用 SPSS17.0 软件分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对土壤 pH 值、有机质影响

不同种植模式下,单作蚕豆与单作续断菊 pH 值在整个生育期没有出现差异性,间作土壤 pH 值呈下降趋势,成熟期相对于幼苗期下降 0.11 个单位(表 1)。成熟期,间作土壤有机质含量比单作蚕豆和单作续断菊分别增加 12.64%、20.13%(表 2)。

2.2 不同种植模式对土壤速效养分影响

2.2.1 土壤碱解氮含量

由图 1 可见,间作与单作蚕豆土壤碱解氮含量从幼苗期至成熟期均表现出递增趋势,成熟期碱解氮含量相对于幼苗期分别显著增加 139.87%、155.15%,间作与单作蚕豆土壤碱解氮含量在每个蚕豆生育期变化量接近;单作续断菊土壤碱解氮含量先下降(幼苗期至花蕾期)、后上升(花蕾期至成熟期),最终相对于幼苗期增加 13.01%。间作与单作蚕豆成熟期土壤碱解氮含量分别为 152.32、152.99 mg·kg⁻¹,均比单作续断菊增加 32.75%左右。

2.2.2 土壤速效钾含量

由图 2 可见,间作与单作续断菊土壤速效钾含量

表 1 不同种植模式土壤 pH 值
Table 1 Soil pH values in different cropping systems

种植模式	幼苗期 Seedling stage	花蕾期 Bud stage	成熟期 Maturity stage
单作蚕豆 <i>V. Faba</i> monocropping	5.81±0.06a	5.78±0.05a	5.76±0.04ab
单作续断菊 <i>S. asper</i> monocropping	5.79±0.03a	5.82±0.06a	5.80±0.02a
蚕豆 续断菊 intercropping	5.79±0.03a	5.71±0.03a	5.68±0.06b

注:表中的数据为平均值±标准差(n=3);同一时期的不同字母表示用 Duncan 法测试时 P<0.05 水平上的差异显著。下同。
Notes: Data are average ± standard deviation. Different letters within a growth period mean significant differences between cropping treatments at P<0.05 level. n=3. The same below.

表 2 不同种植模式土壤有机质含量(g·kg⁻¹)
Table 2 Soil organic matter content in different cropping systems(g·kg⁻¹)

种植模式	幼苗期 Seedling stage	花蕾期 Bud stage	成熟期 Maturity stage
单作蚕豆 <i>V. Faba</i> monocropping	33.04±6.12a	30.71±5.13b	37.35±0.28ab
单作续断菊 <i>S. asper</i> monocropping	37.08±5.42a	41.35±3.35a	35.02±3.27b
蚕豆 续断菊 intercropping	35.33±6.70a	34.53±3.09ab	42.07±2.60a

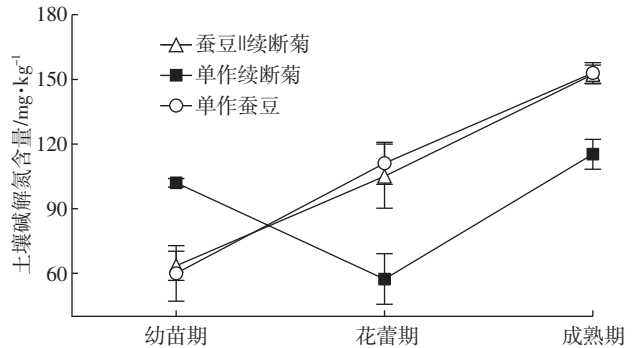


图 1 不同种植模式土壤碱解氮含量
Figure 1 Soil available N content in different cropping systems

接近,整个生育期速效钾含量变化没有差异性;成熟期单作蚕豆速效钾含量相对于幼苗期下降 10.60%。间作与单作续断菊成熟期土壤速效钾含量分别为 216.64、218.81 mg·kg⁻¹,显著大于单作蚕豆土壤速效钾含量 175.06 mg·kg⁻¹。

2.2.3 土壤速效磷含量

不同种植模式土壤速效磷含量从幼苗期至成熟期均呈现下降趋势,间作显著下降 7%左右,单作蚕豆与单作续断菊下降量接近,且每个生育期的间作速效磷含量均大于单作续断菊、单作蚕豆。由图 3 可知,在三个生育期内间作条件下根际速效磷的含量,与单作

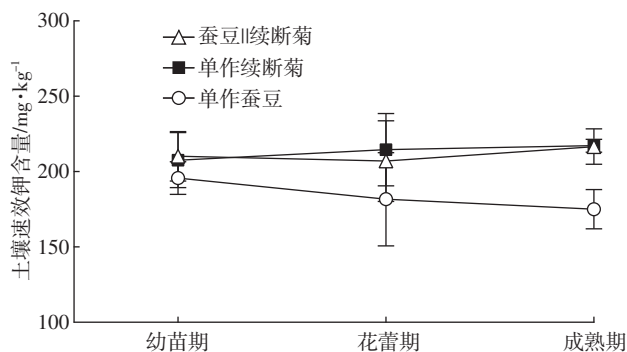


图2 不同种植模式土壤速效钾含量

Figure 2 Soil available K content in different cropping systems

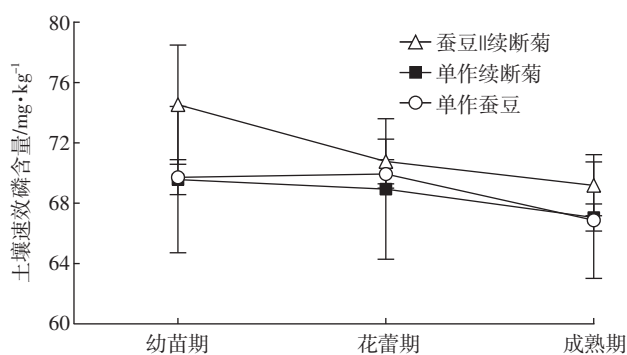


图3 不同种植模式土壤速效磷含量

Figure 3 Soil available P content in different cropping systems

蚕豆相比,其变化幅度分别为6.90%、1.19%、3.47%;与单作续断菊相比,其变化幅度分别为7.14%、2.65%、3.19%[计算式 $(P_i - P_s)/P_s$; P_i 为间作条件下的根际速效磷含量, P_s 为单作条件下根际速效磷含量]。

2.3 不同种植模式对Cd形态影响

图4显示三种植植模式Cd各形态含量分布状况在不同生育期均表现为可交换态>碳酸盐结合态>铁锰氧化物结合态>有机物结合态;三个生育期均是间作条件下可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态四种形态含量总和小于单作蚕豆与单作续断菊。

可交换态含量在间作种植模式下,成熟期相比幼苗期显著下降17.48%,单作续断菊没有显著变化,可交换态平均含量 $4.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单作蚕豆在幼苗期与花蕾期显著下降;整个生育期,间作、单作续断菊、单作蚕豆三种植植模式碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态含量均未出现差异性,碳酸盐结合态平均含量分别为 3.51 、 3.73 、 $3.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铁锰氧化物结合态平均含量分别为 2.52 、 2.68 、 $2.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机物结合态平均含量均在 $1.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。

成熟期可交换态含量间作比单作蚕豆与单作续

断菊分别下降21.98%、22.13%,碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态没有差异性。

2.4 不同种植模式对蚕豆与续断菊生物量、Cd含量影响

间作蚕豆的单株总生物量(根+茎+叶+豆荚+籽粒)小于单作蚕豆,单作蚕豆与间作蚕豆均是籽粒干质量(生物量)最大,且间作蚕豆籽粒干质量显著小于单作蚕豆籽粒干质量(图5),间作后相比单作降低了39.98%。总体来看,间作蚕豆单株生物量相比单作降低了24.77%。间作与单作续断菊单株生物量均表现为地上部>根部,间作续断菊地上部干质量显著大于单作续断菊地上部干质量(图5)。间作后,续断菊单

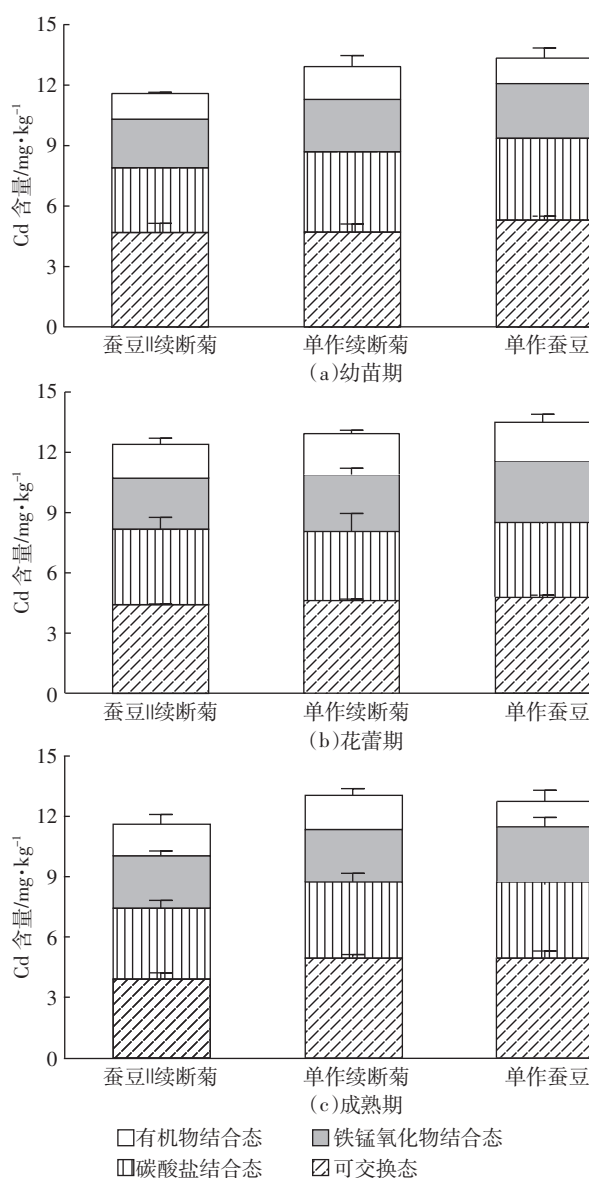


图4 不同生育期不同种植模式Cd形态分布状况

Figure 4 Distribution of Cd fractions in different cropping systems at different growth stages

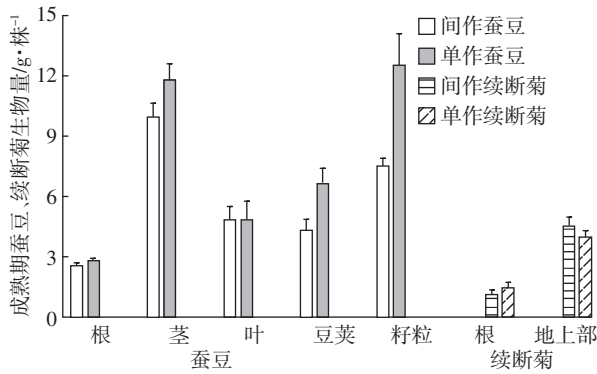


图5 不同种植模式蚕豆、续断菊植株生物量

Figure 5 Biomass of *V. faba* and *S. asper* in different cropping systems($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)

株生物量相比单作增加 15.29%。

成熟期,单作与间作蚕豆根、叶、豆荚与籽粒 Cd 质量分数差异显著,单作与间作均是根部 Cd 质量分数最大,籽粒 Cd 质量分数最小(图 6),且间作蚕豆根、茎、叶、豆荚与籽粒平均 Cd 质量分数($5.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)小于单作平均 Cd 质量分数($7.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

成熟期间作续断菊地上部 Cd 质量分数 $19.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 显著大于单作续断菊地上部 Cd 质量分数 $13.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,间作与单作续断菊根部 Cd 质量分数分别为 19.69 、 $18.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,没有差异性(图 7)。间作后续断菊的转运系数 0.98 大于单作续断菊转运系数 0.71,间作有效转运系数 3.13 大于单作 1.95 [续断菊转运系数=植物地上部含量/根部含量;有效转运系数=(植物地上部含量 $\times$ 地上部生物量)/(根部含量 $\times$ 根部生物量)]。

3 讨论

3.1 间作对 Cd 形态分布状况的影响

试验结果表明,幼苗期单作续断菊土壤碱解氮含量显著大于间作和单作蚕豆,随着时间的推移,间作

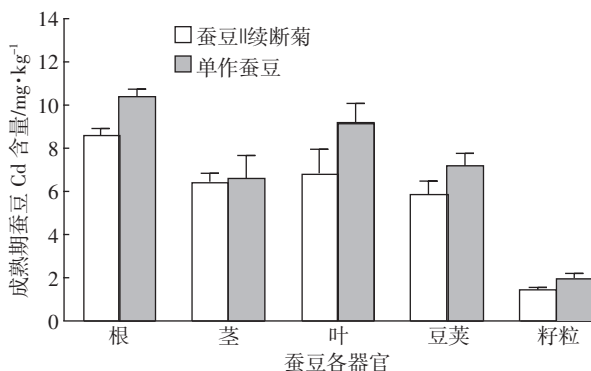


图6 不同种植模式蚕豆各器官 Cd 质量分数

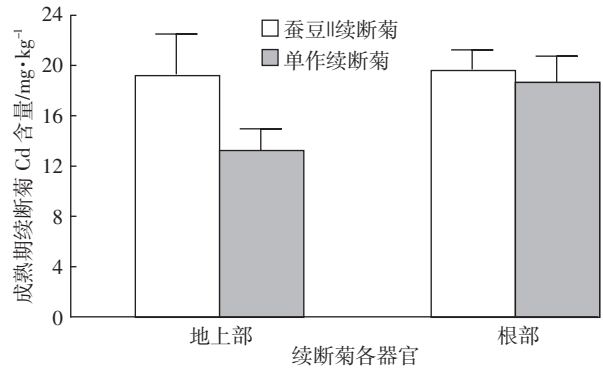
Figure 6 Content of Cd in different parts of *V. faba* in different cropping systems

图7 不同种植模式续断菊各器官 Cd 质量分数

Figure 7 Content of Cd in different parts of *S. asper* in different cropping systems

和单作蚕豆土壤碱解氮含量呈增长趋势,但间作土壤碱解氮含量变化率在花蕾期后大于单作蚕豆,成熟期时均比单作续断菊增加 32.75%左右。可能由于豆科植物生长初期,植株所需氮量多来源于土壤本身,其主要原因是作物根系尚未发育完善,结瘤和固氮过程尚未启动,随着植株根系的发达,固氮能力增强^[17]。此外,可能是豆科与非豆科作物间作,由于非豆科作物可以更多地利用土壤氮素,降低高氮条件下的“氮阻碍”作用,提高豆科作物的固氮比率^[18],豆科作物固定的氮素,可以部分通过根际转移到非豆科作物中,改善了非豆科作物的供氮条件,从而有利于非豆科作物生长^[19]。蚕豆||续断菊间作,间作续断菊生物量的增加主要源于可利用光能的增加以及大豆固氮对续断菊氮营养的贡献,而间作蚕豆生物量的减少则主要由于续断菊对蚕豆的遮光,减少了蚕豆可利用的光能^[20-21]。蚕豆、大豆通过生物固氮作用,将更多的土壤氮素留给与之间作的玉米使用,从而有利于玉米氮的吸收和积累^[22]。在成熟期的间作土壤碱解氮比单作续断菊增加 32.75%左右,间作 Cd 可交换态含量比单作续断菊下降 22.13%,氮素的硝化作用生成 HNO_2 、 HNO_3 ,促进土壤中重金属溶解而发生迁移转化^[23]。

试验结果表明根际速效磷含量随着时间的推移呈下降趋势,间作根际速效磷含量相对于单作蚕豆、续断菊模式提高 7%左右,表明间作促进了根际磷的活化。可能是由于间作条件下对根际磷养分的活化作用明显强于单作,使更多的闭蓄态磷转化为速效磷,提高了根际磷养分的含量^[24]。豆科作物固氮过程中释放出 H^+ ,酸化根际土壤,活化土壤中难溶性磷,供另一作物利用^[25]。单作蚕豆与单作续断菊条件下根际速效磷含量在整个蚕豆生育期无明显变化,间作根际速效磷明显下降 7.16%,可能是间作延缓了作物根系的衰

老,使蚕豆和续断菊根系在生育后期仍保持较强的根系活力,有一定的养分吸收能力所致^[26]。成熟期间作根际速效磷含量相对于单作蚕豆、续断菊模式提高7%左右,间作Cd可交换态含量比单作蚕豆与单作续断菊分别下降21.98%、22.13%,当土壤中速效磷的含量充足时,重金属元素会与之形成难溶性磷酸盐,降低重金属元素在根际土壤中的活动性和移动性^[27]。

成熟期间作根际速效钾含量显著大于单作蚕豆,间作Cd可交换态含量比单作蚕豆下降21.98%,可能是由于土壤颗粒对K⁺离子的解吸附作用,使K⁺离子很容易与重金属元素发生置换而降低重金属元素在根际土壤中的生物利用度^[23]。总之,速效氮、磷与重金属元素呈负相关,速效钾与重金属元素呈正相关^[27]。

试验结果表明Cd各形态中占绝对优势的是可交换态,铁锰氧化物结合态和有机物结合态含量很少,而碳酸盐结合态含量居中,与宋菲等^[28]对红壤、棕壤中重金属形态分布研究一致。间作种植模式下Cd可交换态含量在成熟期比幼苗期显著下降17.48%,而单作续断菊种植模式Cd可交换态含量没有显著差异,其原因可能是:①由于在大量有机质条件下,植物生长更快,生物量更大,对土壤中Cd的吸收更多,导致成熟期土壤中可交换态含量降低^[29]。②在间作体系中,根系分泌物对根际环境物理、化学性质,以及土壤酶活性、根际周围土壤中微生物种群分布等对土壤重金属的有效性以及植物对重金属的吸收产生重要影响^[30-32],所以导致间作后Cd可交换态含量下降可能原因是续断菊与蚕豆间作后,通过根系分泌有机酸与Cd进行螯合作用,提高土壤Cd的活化效率(土壤有效态镉/土壤全镉),而续断菊是Cd的超积累植物,对Cd具有强吸收作用^[33]。③pH值通过影响土壤表面电荷性质和镉离子的存在形态而影响镉离子的吸附,植物根系分泌物H₂CO₃及其他酸性物质可降低根际土壤的pH值,pH能够影响无机碳含量,影响碳酸盐的形成和溶解,促进植物碳酸盐结合态对重金属的吸收,因此使镉化学形态在交换态和碳酸盐结合态之间转移。间作种植模式下土壤pH值下降0.11个单位,形成较多的碳酸盐络合物而使镉有效性降低^[29]。④有机质是一种有效的吸附剂,有机质通过改变土壤表面负电荷数量以及与镉离子发生不同的化学反应而起作用,能极大地降低重金属离子的活度^[29]。蒋煜峰等^[34]在土壤中加入腐植酸后,使土壤溶液中的有机质含量增加,同时提高了土壤中铁锰氧化物的活性,使铁锰氧化物结合重金属的能力增强,随着腐植酸浓度的增

大,这种作用越强,使氧化物结合重金属离子的能力增强,土壤中氧化物结合态的重金属离子含量增加。有机肥的施用促使交换态Cd向铁锰氧化物结合态与有机物结合态Cd转化^[35],形成的络合物稳定性较高,导致镉有效性相对较低^[36]。范文宏等^[37]采用连续提取法分析沉积物添加胡敏酸后,重金属(Cd,Cu,Zn,Pb和Ni)的形态分布状况结果显示:随着胡敏酸的加入,重金属的可交换态含量都不同程度的降低,铁锰氧化物结合态含量不同程度的增加,有机结合态和残渣态含量有所提高。

成熟期,间作土壤有机质含量比单作蚕豆和单作续断菊分别增加12.64%、20.13%,间作可交换态含量比单作蚕豆与单作续断菊分别下降21.98%、22.13%。土壤中有机的增加改变土壤中重金属元素的化学形态分布^[29]。张亚丽等^[38]研究结果表明:施用有机肥后,土壤有效态镉含量显著降低,降幅约为40%。污染土壤中镉的形态与腐殖质较高性能的络合作用有关,腐殖质含量高,强力的吸附和络合作用造成Cd可交换态降低,而其他形态含量增加。因此,对重金属污染土壤进行治理和修复时可利用土壤有机质含量对重金属形态的影响。

3.2 间作对蚕豆和续断菊吸收Cd的影响

从本实验结果来看,成熟期间作续断菊转运系数大于单作,间作有效转运系数大于单作,说明间作后续断菊的转运能力强于单作,对Cd累积能力增强。卫泽斌等^[39]研究表明,间作方式可以提高植物对重金属的提取效率。成熟期间作蚕豆根、叶、豆荚Cd质量分数显著小于单作蚕豆,说明间作降低了根、叶、豆荚对重金属Cd的转运,使间作蚕豆籽粒Cd质量分数显著小于单作。玉米||续断菊间作成熟期,单作玉米根、茎、叶、籽粒Cd质量分数显著大于间作玉米,单作续断菊根部、地上部Cd质量分数差异显著小于间作续断菊^[40]。将富集植物和农作物间作用于污染土壤的植物修复,富集植物能抑制农作物对重金属的吸收量,同时能提高富集植物对重金属的提取效率。蚕豆与续断菊在间作体系下,既能增强富集植物续断菊对Cd的吸收,又能降低农作物蚕豆对Cd的吸收,是一种“双赢”模式。

4 结论

(1)间作模式下,土壤pH值下降0.11个单位,土壤有机质比单作增加12.64%~20.13%,碱解氮含量显著增加139.87%,速效磷含量显著下降7%,速效钾含

量无显著变化。

(2)间作Cd可交换态含量比单作显著下降,其余形态没有差异性。

(3)间作单株蚕豆生物量相比单作降低了24.77%,间作单株续断菊生物量相比单作增加15.29%。

(4)单作蚕豆根、叶、豆荚与籽粒Cd质量分数显著大于间作蚕豆,间作续断菊地上部Cd质量分数显著大于单作,根部无显著性差异。总之,间作后增强续断菊对Cd的吸收,降低蚕豆对Cd的吸收。

参考文献:

- [1] 李园园, 郭增长, 马守臣, 等. 矿粮复合区农田生态系统健康评价体系及可持续发展对策[J]. 湖南农业科学, 2011, 1(9): 64-67.
LI Yuan-yuan, GUO Zeng-zhang, MA Shou-chen, et al. The health evaluation system and the sustainable developmental strategies for farmland ecosystem in overlapped areas of mineral and crop production[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2011, 1(9): 64-67.
- [2] 房辉, 曹敏. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价[J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1277-1283.
FANG Hui, CAO Min. Assessment of heavy metals pollution in abandoned lead-zinc mine tailings in Huize of Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7): 1277-1283.
- [3] 雷冬梅, 段昌群, 王明. 云南不同矿区废弃地土壤肥力与重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 612-616.
LEI Dong-mei, DUAN Chang-quan, WANG Ming. Soil fertility and heavy metal contamination in abandoned of different mine tailings in Yunnan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 612-616.
- [4] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1832-1838.
LU Si-jin, WANG Ye-yao, HE Li-huan. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb-Zn mine in Huize County[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1832-1838.
- [5] 焦念元, 宁堂原, 杨萌珂, 等. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4324-4330.
JIAO Nian-yuan, NING Tang-yuan, YANG Meng-ke, et al. Effects of maize/peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4324-4330.
- [6] 苏本营, 陈圣宾, 李永庚, 等. 间套作种植提升农田生态系统服务功能[J]. 生态学报, 2013, 33(14): 4505-4514.
SU Ben-ying, CHEN Sheng-bin, LI Yong-gen, et al. Intercropping enhances the farmland ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(14): 4505-4514.
- [7] 吕越, 吴普特, 陈小莉, 等. 玉米-大豆间作系统的作物资源竞争[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 139-146.
LÜ Yue, WU Pu-te, CHEN Xiao-li, et al. Resource competition in maize/soybean intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(1): 139-146.
- [8] 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): 852-858.
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): 852-858.
- [9] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2): 301-310.
- [10] Wieshammer G. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Plant and Soil*, 2007, 298(1/2): 255-264.
- [11] 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 of *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9): 985-990.
- [12] 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(增刊): 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(Suppl): 267-272.
- [13] 王学东, 周红菊, 华洛. 植物对重金属的抗性机理及其植物修复研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(2): 43-46.
WANG Xue-dong, ZHOU Hong-ju, HUA Luo. Advances in research on resistance mechanism of plant to heavy metal & phytoremediation[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2006, 4(2): 43-46.
- [14] Moral R, Gilkes R J, Moreno-Caselles J. A comparison of extractants for heavy metals in contaminated soils from Spain[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33(15-18): 2781-2791.
- [15] 张增强, 张一平, 朱兆华. 镉在土壤中吸持的动力学特征研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 370-375.
ZHANG Zeng-qiang, ZHANG Yi-ping, ZHU Zhao-hua. Study on the characteristics of kinetic of cadmium retention on soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3): 370-375.
- [16] 焦文涛, 蒋新, 余贵芬, 等. 土壤有机质对镉在土壤中吸附-解吸行为的影响[J]. 环境化学, 2005, 24(5): 545-549.
JIAO Wen-tao, JIANG Xin, YU Gui-fen, et al. Effects of organic matter on cadmium adsorption-desorption in three soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(5): 545-549.
- [17] Karadag Y, Buyukbure U. Forage qualities, forage yields and seed yields of some legume-triticale mixtures under rainfed conditions[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science*, 2004, 54: 140-148.
- [18] Fan F L, Zhang F S, Song Y N, et al. Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume in two contrasting intercropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2006, 283: 275-286.
- [19] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. Effect of root contact on interspecific competition and N transfer between wheat and faba bean using direct and indirect ^{15}N techniques[J]. *Plant and Soil*, 2004, 262: 45-54.
- [20] 高阳, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 玉米和大豆条带间作模式下的光环境特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1248-1254.
GAO Yang, DUAN Ai-wang, LIU Zu-gui, et al. Light environment characteristics in maize-soybean strip intercropping system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1248-1254.
- [21] 高阳, 申孝军, 杨林林, 等. 不同水氮处理对玉米-大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 815-822.
GAO Yang, SHEN Xiao-jun, YANG Lin-lin, et al. Effect of water and

- nitrogen on interception, competition and utilization of radiation in a maize-soybean intercropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3):815-822.
- [22] 余常兵, 孙建好, 李 隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料科学, 2009, 15(1):1-8.
YU Chang-bing, SUN Jian-hao, LI Long. Effect of interspecific interaction on crop growth and nutrition accumulation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1):1-8.
- [23] 关共凑, 魏兴琰, 陈楠纬. 佛山市郊菜地土壤理化性质与重金属含量及其相关性[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(2):78-82.
GUAN Gong-cou, WEI Xing-hu, CHEN Nan-wei. Study on physical-chemical properties and contents of heavy metals and their correlation in vegetable fields of Foshan[J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(2):78-82.
- [24] 李勇杰, 陈远学, 汤 利, 等. 地下部分隔间作小麦养分吸收和白粉病发生的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5):929-934.
LI Yong-jie, CHEN Yuan-xue, TANG Li, et al. Effects of root separation on nutrient uptake of wheat and occurrence of powdery mildew under wheat-faba bean intercropping[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5):929-934.
- [25] Li L, Li S M, Sun J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(27):11192-11196.
- [26] 周照留, 赵 平, 汤 利, 等. 小麦蚕豆间作对作物根系活力, 蚕豆根瘤生长的影响[J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2007, 22(5):665-671.
ZHOU Zhao-liu, ZHAO Ping, TANG Li, et al. Effects of wheat and broad bean intercropping on the root activity and root nodulation of broad bean[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, 22(5):665-671.
- [27] 古一帆, 何 明, 李进玲, 等. 上海奉贤区土壤理化性质与重金属含量的关系[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2009, 28(6):601-605.
GU Yi-fan, HE Ming, LI Jin-ling, et al. Correlation between contents of heavy metals and physical-chemical properties of agricultural soils in Fengxian, Shanghai[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2009, 28(6):601-605.
- [28] 宋 菲, 郭玉文. 镉、锌、铅复合污染对菠菜的影响[J]. 农业环境保护, 1996, 15(1):9-14.
SONG Fei, GUO Yu-wen. Effect of compound pollution of cadmium, zinc and lead on spinach in brown earth[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(1):9-14.
- [29] 杜彩艳, 祖艳群, 李 元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4):539-543.
DU Cai-yan, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effect of pH and organic matter on the bioavailability Cd and Zn in soil[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2005, 20(4):539-543.
- [30] 陈英旭, 林 琦, 陆 芳, 等. 有机酸对铅、镉植株危害的解毒作用研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4):467-472.
CHEN Ying-xu, LIN Qi, LU Fang, et al. Study on detoxication of organic acid to raddish under the stress of Pb and Cd[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(4):467-472.
- [31] 梁开明, 傅 玲, 章家恩, 等. 水稻/再力花单、间作系统中作物对镉胁迫的叶绿素荧光响应及镉积累特征 [J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(4):35-41.
LIANG Kai-ming, FU Ling, ZHANG Jia-en, et al. Responses of PS II chlorophyll fluorescence under Cd stress and characteristics of Cd accumulation in *Thalia dealbata* and rice mono- and inter-cropping systems[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2014, 35(4):35-41.
- [32] 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.
- [33] 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 L. Hill.* and *Maize* in intercropping[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3):471-477.
- [34] 蒋煜峰, 袁建梅, 卢子扬, 等. 腐植酸对污灌土壤中 Cu、Cd、Pb、Zn 形态影响的研究 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2005, 41(6):42-46.
JIANG Yu-feng, YUAN Jian-mei, LU Zi-yang, et al. The effect of humic acid on species of Cu, Cd, Pb, Zn in sew age farm[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 2005, 41(6):42-46.
- [35] 孙 花, 谭长银, 黄道友, 等. 土壤有机质对土壤重金属积累、有效性及形态的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2011, 34(4):82-87.
SUN Hua, TAN Chang-yin, HUANG Dao-you, et al. Effects of soil organic matter on the accumulation, availability and chemical speciation of heavy metal[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2011, 34(4):82-87.
- [36] 华 璐, 陈世宝, 白玲玉, 等. 土壤腐植酸与 ^{109}Cd 、 ^{65}Zn 及其复合存在的络合物稳定性研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(2):187-191.
HUA Luo, CHEN Shi-bao, BAI Ling-yu, et al. Studies on stability of ^{109}Cd , ^{65}Zn complex with humus acids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(2):187-191.
- [37] 范文宏, 陈 俊, 王 琼. 胡敏酸对沉积物中重金属形态分布的影响[J]. 环境化学, 2007, 262:224-227.
FAN Wen-hong, CHEN Jun, WANG Qiong. Influence of humic acid on species of heavy metals in sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 262:224-227.
- [38] 张亚丽, 沈其荣, 谢学俭, 等. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1):1997-2000.
ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, XIE Xue-jian. Effect of pig manure and rice straw on biological activity of Cd-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1):1997-2000.
- [39] 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪, 等. 利用套种和混合添加剂修复重金属污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1262-1263.
WEI Ze-bin, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil with mixed chelators in Co-crop system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1262-1263.
- [40] 谭建波, 陈 兴, 郭先华, 等. 续断菊与玉米间作系统不同植物部位 Cd、Pb 分配特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4):700-707.
TAN Jian-bo, CHEN Xing, GUO Xian-hua, et al. Distribution characteristics of Pb and Cd in different parts of *Sonchus asper* and *Zea mays* in an intercropping system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 25(4):700-707.