土施超富集植物秸秆对荠菜生长及镉积累的影响

胡容平[1]，石 军[2]，黄廷友[2]，林立金[3]

(1. 四川省农业科学院 植物保护研究所/农业部西南作物有害生物综合治理重点实验室，四川 成都 610066；
2. 绵阳市农业科学研究院，四川 绵阳 621023；3. 四川农业大学 果蔬研究所，四川 成都 611130)

摘 要：[目的] 研究超富集植物秸秆对富集植物重金属积累的化感作用，为镉污染土壤的植物修复研究提供参考。[方法] 通过在镉污染土壤中施用镉超富集植物[(红果黄鹌菜 *Youngia erythrocarpa*)、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、少花龙葵(*Solanum americanum*)和豨莶(*Siegesbeckia orientalis*)]秸秆，研究了 4 种镉超富集植物秸秆施入土壤对镉富集植物荠菜生长及镉积累的影响。[结果] 4 种镉超富集植物秸秆施入土壤均提高了荠菜地上部分生物量、总生物量和抗性系数，同时提高了荠菜叶片 SPAD 值(绿色度)。土施红果黄鹌菜秸秆提高了荠菜根系、茎、叶片及地上部分的镉含量，分别比各自对照高 11.81%，102.07%，12.00%和 54.95%，同时也提高了土样有效态镉含量，其余 3 种处理均低于各自对照。土施红果黄鹌菜秸秆的荠菜地上部分和整株的镉积累量均高于对照，分别为 42.11 和 54.74 μg/株，比各自对照高 83.09%和 54.11%，而其余 3 种处理的镉积累量均低于对照。[结论] 土施红果黄鹌菜能够提高荠菜对土壤镉的积累，有利于提高荠菜对镉污染土壤的修复效果。

关键词：超富集植物秸秆；荠菜；镉；植物化感

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2015)05-0217-05 **中图分类号**：X53，S154

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.106

Effects of Applying Hyperaccumulator Straw in Soil on Growth and Cadmium Accumulation of *Capsella Bursa-pastoris*

HU Rongping[1], SHI Jun[2], HUANG Tingyou[2], LIN Lijin[3]

(1. *Institute of Plant Protection, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/MOA Key Laboratory of Integrated Management of Pests on Crops in Southwest China, Chengdu, Sichuan* 610066, *China*; 2. *Mianyang Academy of Agricultural Sciences, Mianyang, Sichuan* 621023, *China*; 3. *Institute of Pomology and Olericulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*)

Abstract: [Objective] The objective of this paper is to study the allelopathy effects of hyperaccumulator straw on heavy metal accumulation of accumulator in order to provide basis for the study of phytoremediation of cadmium-contaminated soil. [Methods] By applying different straws of hyperaccumulators (*Youngia erythrocarpa*, *Bidens pilosa*, *Solanum photeinocarpum* and *Siegesbeckia orientalis*) in cadmium contaminated soil, the effects of hyperaccumulator straw on growth and cadmium accumulation of *Capsella bursa-pastoris* were studied. [Results] The above-ground biomass, total biomass, resistance coefficient and leaf SPAD (soil and plant analyzer development) value of *C. bursa-pastoris* was increased by applying four Cd-hyperaccumulators straws in soil, compared with the control treatment. By applying straw of *Y. erythrocarpa* in soil, the cadmium contents in root, stem, leaf and above-ground part of *C. bursa-pastoris* were increased by 11.81%, 102.07%, 12.00% and 54.95%, respectively, compared with the control treatment. The available cadmium concentration in soil was also increased. By applying the straws of *B. pilosa*, *S. photeinocarpum* and *S. orientalis* in soil, cadmium content in *C. bursa-pastoris* was decreased. By applying straw of *Y. erythrocarpa* in soil, the cadmium accumulation in above-ground part and whole plant of *C. bursa-pastoris* was 42.11 and 54.74 μg/plant, which was 83.09% and 54.11% greater than that in the control treatment,

收稿日期：2014-05-29 **修回日期**：2014-06-17

资助项目：四川省科学技术厅应用基础项目“四川几种重要药用植物病害调查及川芎根腐病防治研究”(2014JY0046)；四川省农业科学院青年资助项目“四川猕猴桃储藏期病害主要种类、发生特点及防治技术研究”(2014CXSF-018)

第一作者：胡容平(1980—)，男(汉族)，四川省营山县人，硕士，助理研究员，主要从事植物病理及生物防治研究。E-mail:44573780@qq.com。

通信作者：林立金(1980—)，男(汉族)，四川省成都市人，博士，助理研究员，主要从事果树生理生态及栽培研究。E-mail:llj800924@163.com。

respectively. By applying the straws of *B. pilosa*, *S. photeinocarpum* and *S. orientalis* in soil, cadmium accumulation in *C. bursa-pastoris* was decreased. [Conclusion] Applying the straw of *Y. erythrocarpa* in soil can improve the cadmium accumulation of *C. bursa-pastoris*, which is beneficial to the remediation of soil contaminated by cadmium.
Keywords: **hyperaccumulator straw**; ***Capsella bursa-pastoris***; **cadmium**; **allelopathy**

植物修复技术是重金属污染土壤修复中的一种常用方法,能在不破坏土壤生态环境、保持土壤结构和微生物的状况下,通过植物的根系直接将重金属从土壤中吸收并转移到植物地上部分,从而达到修复被污染土壤的目的[1]。植物修复具有可在污染现场进行、成本相对低廉、适用范围广等优点[2]。植物修复的主要材料是重金属超富集植物,而已经筛选出的重金属超富集植物存在着生长缓慢、生物量小等缺点,这也就限制了植物修复技术的推广与应用[3]。为此,通过农艺措施提高超富集植物生物量及对重金属的吸收,从而提高植物修复的效率,对重金属污染土壤的修复有极大的实践意义。

植物化感作用是植物生长过程或植物腐烂过程中产生的化学物质对周围植物(包括微生物)产生直接或间接的、有害或有利的作用[4]。植物化感作用广泛存在于自然界中,与植物间的光、水分、养分和空间的竞争一起构成了植物之间的相互作用[4]。植物化感作用的媒介是化感物质,化感作用的大小主要取决于物种产生化感物质的潜在能力和化感物质释放的时间与频率两个方面[5]。植物化感作用会影响土壤养分有效性、土壤酶活性、微生物种群结构和植物生长[6]。目前,植物化感作用已成为森林保护、有害生物控制、增加作物产量和促进环境可持续性发展的重要途径之一[7]。研究表明,作物秸秆还田不仅能提高土壤养分含量,还能促进作物生长,提高产量,改善品质[8]。这说明植物秸秆中的化感物质改变了作物的生理代谢,能够促进作物对养分元素的吸收。但有关植物秸秆分解所产生的化感作用与重金属植物修复技术相关性的研究却尚未见报道。作为夏季生长的镉超富集植物红果黄鹌菜(*Youngia erythrocarpa*)[9]、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)[10]、少花龙葵(*Solanum photeinocarpum*)[11]、豨莶(*Siegesbeckia orientalis*)[12]对镉具有很强的耐性。为此,本研究将这 4 种镉超富集植物的地上部分施入镉污染土壤并种植冬季生长的镉富集植物荠菜(*Capsella bursa-pastoris*)[13],研究 4 种镉超富集植物秸秆施入土壤对荠菜生长及镉积累的影响,以期筛选出促进荠菜生长和镉积累的镉超富集植物,为提高荠菜对镉污染土壤的植物修复能力提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤为紫色土,取自四川农业大学雅安校区农场农田(29°59′N,102°59′E),其基本理化性质详见参考文献[14]。

镉超富集植物红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶于 2013 年 8 月采自四川农业大学雅安校区农场农田,采集区土壤未被重金属污染。将采集到的四种镉超富集植物地上部分于 110 ℃杀青 15 min,75 ℃烘干至衡重,粉碎,过 5 mm 筛,备用。

荠菜幼苗于 2013 年 9 月直接采自四川农业大学雅安校区农场农田(未被重金属污染区)。

1.2 试验方法

试验于 2013 年 8—10 月在四川农业大学雅安校区农场进行。2013 年 8 月,将土壤风干、压碎、过 5 mm筛后,分别称取 3.0 kg 装于 15 cm×18 cm(高×直径)的塑料盆内,加入分析纯 $CdCl_2 \cdot 2.5\ H_2O$ 溶液,使其镉浓度为 50 mg/kg,并与土壤充分混匀,保持淹水状态,自然放置平衡 4 周后再次混合备用。2013 年 9 月,处理好的 4 种镉超富集植物秸秆分别施入制备好的镉污染土壤中,施入量为每盆 6 g,即每千克土 2 g,混匀,浇水保持湿润,平衡 1 周后种植荠菜幼苗。将选择长势一致,2 片真叶展开的荠菜幼苗移栽至盆中,每盆种植 4 株,每个处理重复 3 次,每天浇水以保持盆中土壤的田间持水量约为 80%。试验共计 5 个处理:未施用(CK)、施用红果黄鹌菜、施用三叶鬼针草、施用少花龙葵、施用豨莶。35 d 后荠菜处于盛花期,用叶绿素仪(SPAD-502 PLUS,日本产)测定叶片 SPAD 值(绿色度,相对于叶绿素含量的读数),每株测定完全展开的成熟新叶 2 片,测定位置为叶片的中心。之后,整株收获,将植物地上部分、地下部分和土壤分别封装。荠菜根系和地上部分分别用自来水洗净,再用去离子水冲洗 3 次后,于110 ℃杀青 15 min,75 ℃烘干至恒重,称重,粉碎,过 100 目筛。称取 0.500 g 植物样品,加入硝酸—高氯酸(体积比为 4∶1)放置 12 h 后消化至溶液透明,过滤,定容至 50 ml,用 iCAP 6 300 型 ICP 光谱仪测定(Thermo Scientific,USA)镉含量[15]。土壤样品风干后,过 1 mm 筛,称取 5.000 g 用 0.005 mol/L DTPA—TEA 浸提(土液比 1∶2.5),25 ℃震荡 2 h,用 iCAP 6 300 型 ICP 光谱仪测定土壤有效镉含量[15]。

1.3　数据处理方法

数据采用 DPS 系统进行方差分析(Duncan 新复极差法进行多重比较)。抗性系数=处理组总生物量/对照组总生物量[16],富集系数(BCF)=根系镉含量(地上部分镉含量)/土壤镉含量[17],转运系数(TF)=植物地上部分镉含量/根系镉含量[17],转运量系数(TAF)=(地上部镉含量×地上部分生物量)/(根系镉含量×根系生物量)[18]。

2　结果与分析

2.1　土施超富集植物秸秆对荠菜生物量的影响

从表 1 可以看出,土施超富集植物秸秆后,只有施用少花龙葵秸秆的荠菜根系生物量高于未施用(对照),其余 3 种处理均低于对照。4 种处理的荠菜茎生物量均高于对照,而土施红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵秸秆的荠菜叶片生物量高于对照,土施豨莶秸秆的荠菜叶片生物量低于对照。与对照相比,4 种处理的荠菜地上部分生物量和总生物量均高于对照,其中,土施红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵秸秆的荠菜地上部分生物量和总生物量与对照的差异均达显著水平,而土施豨莶秸秆的荠菜地上部分生物量和总生物量与对照的差异均不显著。荠菜地上部分生物量和总生物量的大小顺序均为:土施少花龙葵秸秆>土施红果黄鹌菜秸秆>土施三叶鬼针草秸秆>土施豨莶秸秆>对照,这说明土施超富集植物能够促进荠菜的生长。4 种处理的荠菜抗性系数均大于对照,且大小顺序与荠菜地上生物量一致,说明土施超富集植物秸秆能够提高荠菜的抗性。

表 1　荠菜植株的生物量

超富集植物	植株生物量(g/株)					根冠比	抗性系数
	根系	茎	叶片	地上部分	总生物量		
未施用	0.051±0.003^{b}	0.187±0.006^{d}	0.117±0.001^{c}	0.304±0.007^{c}	0.355±0.010^{c}	0.168	1.00
红果黄鹌菜	0.046±0.002^{c}	0.238±0.010^{b}	0.121±0.002^{b}	0.359±0.012^{b}	0.405±0.014^{b}	0.128	1.14
三叶鬼针草	0.049±0.001^{b}	0.230±0.011^{b}	0.125±0.003^{ab}	0.355±0.014^{b}	0.404±0.013^{b}	0.135	1.13
少花龙葵	0.066±0.003^{a}	0.263±0.006^{a}	0.126±0.002^{a}	0.389±0.007^{a}	0.455±0.010^{a}	0.170	1.28
豨 莶	0.048±0.002^{bc}	0.211±0.014^{c}	0.104±0.006^{d}	0.315±0.020^{c}	0.363±0.022^{c}	0.152	1.02

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2　土施超富集植物秸秆对荠菜镉含量的影响

从表 2 可知,土施超富集植物秸秆后,只有施用红果黄鹌菜秸秆的荠菜根系、茎、叶片及地上部分的镉含量均高于各自对照,分别比各自对照高 11.81%,102.07%,12.00%和 54.95%,其余 3 种处理均低于各自对照。

荠菜地上部分镉含量的大小顺序为:土施红果黄鹌菜秸秆>对照>土施豨莶秸秆>土施少花龙葵秸秆>土施三叶鬼针草秸秆,这说明提高荠菜植株的镉含量与超富集植物的种类有关。土施红果黄鹌菜秸秆的荠菜根系富集系数(BCF)和地上部分富集系数(BCF)均高于对照,其余 3 种处理均低于对照,这与镉含量一致。就转运系数(TF)而言,土施超富集植物秸秆的荠菜 TF 均高于对照,这说明土施超富集植物秸秆在一定程度上促进了镉从荠菜根系向地上部分的转运。

表 2　荠菜植株的镉含量

超富集植物	植株镉含量/(mg·kg^{-1})				根系富集系数	地上部分富集系数	转运系数
	根系	茎	叶片	地上部分			
未施用	245.50±6.65^{b}	58.47±7.14^{b}	103.20±4.67^{b}	75.69±5.99^{b}	4.91	1.51	0.308
红果黄鹌菜	274.49±6.97^{a}	118.15±3.11^{a}	115.58±6.05^{a}	117.28±4.12^{a}	5.49	2.35	0.427
三叶鬼针草	169.76±3.88^{c}	39.11±2.19^{c}	80.31±2.97^{d}	53.62±2.17^{d}	3.40	1.07	0.316
少花龙葵	113.90±6.72^{e}	38.06±3.69^{c}	96.97±2.52^{c}	57.14±1.80^{cd}	2.28	1.14	0.502
豨 莶	158.21±9.45^{d}	40.37±2.09^{c}	95.90±2.81^{c}	58.70±0.63^{c}	3.16	1.17	0.371

2.3　土施超富集植物秸秆对荠菜镉积累量的影响

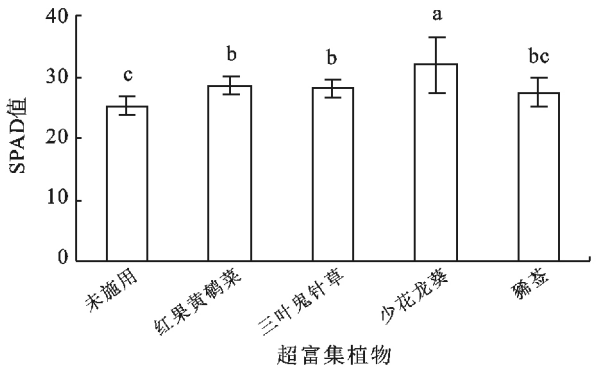
植物修复效果的好坏与植物体内的重金属积累量有直接关系,而植物体内的重金属积累量与植物的重金属含量和生物量有关。从表 3 可得,土施红果黄鹌菜秸秆的荠菜根系、茎、地上部分和整株的镉积累量均高于对照,而其余 3 种处理的镉积累量均低于对照。就荠菜叶片镉积累量而言,土施红果黄鹌菜和少花龙葵秸秆的荠菜叶片镉积累量均高于各自对照,而其余两种处理的镉积累量均低于各自对照。荠菜地上部分及整株镉积累量的大小顺序为:土施红果黄鹌菜秸秆>对照>土施少花龙葵秸秆>土施三叶鬼针草秸秆>土施豨莶秸秆。与对照相比,4 种处理的荠菜地上部分及整株镉积累量的差异均达显著水平。4 种处理的荠菜转运量吸收(TAF)均大于对照。

表 3 荠菜植株的镉积累量

超富集植物	镉积累量(μg/株)					转运量系数
	根 系	茎	叶 片	地上部分	整株	
未施用	12.52±0.96[a]	10.93±0.66[b]	12.07±0.69[b]	23.00±1.35[b]	35.52±2.31[b]	1.84
红果黄鹌菜	12.63±0.18[a]	28.12±0.92[a]	13.99±0.98[a]	42.11±1.80[a]	54.74±1.98[a]	3.33
三叶鬼针草	8.15±0.07[b]	9.00±0.06[c]	10.04±0.16[c]	19.04±0.22[c]	27.19±0.29[cd]	2.34
少花龙葵	7.52±0.73[b]	10.01±0.75[bd]	12.22±0.47[b]	22.23±1.22[b]	29.75±1.95[c]	2.96
豨 莶	7.59±0.78[b]	8.52±0.13[c]	9.97±0.83[c]	18.49±0.96[c]	26.08±1.74[d]	2.44

2.4 土施超富集植物秸秆对荠菜叶片 SPAD 值的影响

SPAD 值是相对于叶绿素含量的读数，反映叶绿素含量的大小。从图 1 可以看出，4 种处理的荠菜叶片 SPAD 值均高于对照，其大小顺序为：土施少花龙葵秸秆＞土施红果黄鹌菜秸秆＞土施三叶鬼针草秸秆＞土施豨莶秸秆＞对照，这与荠菜地上部分生物量一致。与对照相比，土施红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶的荠菜叶片 SPAD 值分别比对照高 12.65%，11.07%，26.48%，和 8.70%。



注：不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1 荠菜叶片的 SPAD 值

2.5 土施超富集植物秸秆对土壤有效态镉含量的影响

从图 2 可知，土施红果黄鹌菜秸秆的土壤有效态镉含量高于对照，比对照高 4.12%。土施三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶秸秆的土壤有效态镉含量均低于对照，分别比对照低 10.54%，9.24%和 7.99%。土壤有效态镉含量的大小顺序为：土施红果黄鹌菜秸秆＞对照＞土施豨莶秸秆＞土施少花龙葵秸秆＞土施三叶鬼针草秸秆。

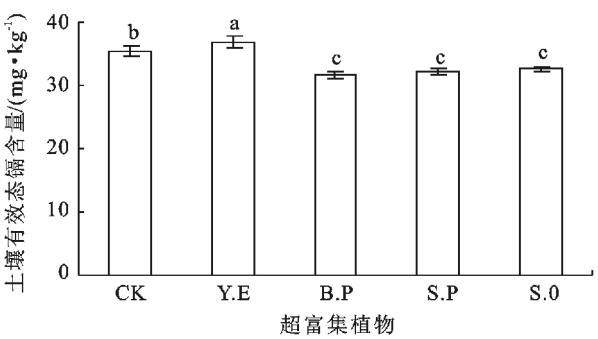


图 2 土壤有效态镉含量

3 讨 论

植物秸秆进入土壤后，在微生物作用下逐渐腐烂、分解，其体内的化感物质也逐渐释放出来[4]。植物秸秆腐烂、分解过程中会释放一部分的养分，这些养分能促进其他植物的生长[8]。本试验研究表明，土施红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶秸秆后，荠菜地上部分生物量及总生物量均高于未施用的对照，提高了荠菜的抗性系数，这与 4 种超富集植物秸秆腐烂、分解释放的养分有直接关系。同时，土施超富集植物秸秆后，只有施用少花龙葵秸秆的荠菜根系生物量高于未施用的对照，施用红果黄鹌菜、三叶鬼针草和豨莶秸秆的荠菜根系生物量均低于对照，这说明红果黄鹌菜、三叶鬼针草和豨莶秸秆能够在一定程度上抑制荠菜根系的生长，降低其根冠比；而少花龙葵秸秆则能够促进荠菜根系生长，增加了根冠比，这与不同超富集植物秸秆分泌的化感物质不同有关。

叶片是绿色植物进行光合作用的重要器官，而叶绿素则是光合作用最重要的色素，其含量的高低直接影响光合产物合成的产量[19]。刘义国等[8]研究表明，秸秆还田能够显著提高小麦生长后期叶片中叶绿素的含量，提高光合作用，这说明秸秆还田能够延长小麦的后期生长。本试验研究表明，土施红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶秸秆均能提高荠菜叶片的 SPAD 值，这有利于荠菜光合作用的提高，促进光合产物的生成，从而促进其生长。

土壤重金属的生物有效性直接影响植物对重金属的吸收，而影响土壤重金属生物有效性的物质与植物根系分泌的有机酸有关[3-4]。本试验研究表明，土施红果黄鹌菜秸秆的土壤有效态镉含量高于对照，土施三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶秸秆的土壤有效态镉含量均低于对照。从荠菜植株的镉含量来看，土施超富集植物秸秆后，只有施用红果黄鹌菜秸秆的荠菜根系、茎、叶片及地上部分的镉含量均高于各自对照，而施用三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶秸秆的均低于各自对照。说明红果黄鹌菜秸秆与荠菜根系共同作用后提高了土壤镉的生物有效性，可能是红果黄鹌菜秸秆的化感物质促进了荠菜根系分泌有机酸，也可能是红

果黄鹌菜秸秆在腐烂、分解过程中能够产生更多的有机酸,这有待进一步研究。此外,本试验研究还表明,土施红果黄鹌菜秸秆的荠菜根系、茎、地上部分和整株的镉积累量均高于对照,而其余 3 种处理的镉积累量均低于各自对照。因此,利用红果黄鹌菜秸秆施入土壤能够提高荠菜对土壤镉污染的修复能力,在植物修复中可加以应用。

4　结 论

土施红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶秸秆后,能够提高荠菜地上部分生物量、总生物量和叶片的 SPAD 值,同时提高了荠菜的抗性系数,这说明 4 种超富集植物秸秆能够促进荠菜的生长。土施红果黄鹌菜、三叶鬼针草、少花龙葵和豨莶秸秆后,只有红果黄鹌菜秸秆提高了土壤有效态镉含量,也提高了荠菜根系、茎、叶片及地上部分的镉含量,这与几种超富集植物的化感作用有关。从荠菜对镉的积累量来看,土施红果黄鹌菜秸秆的荠菜根系、茎、地上部分和整株的镉积累量高于对照,而其余 3 种处理的镉积累量均低于各自对照。

[参 考 文 献]

[1] Marques A P G C, Rangel A O S S, Castro P M L. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean-up technology [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2009,39(8):622-654.

[2] 罗于洋,王树森,闫洁,等. 土壤铅污染对密毛白莲蒿茎叶解剖结构影响的研究[J]. 水土保持通报,2010,30(3):182-185.

[3] Maestri E, Marmiroli M, Visioli G, et al. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010,68(1):1-13.

[4] 李秋玲,肖辉林. 土壤性质及生物化学因素与植物化感作用的相互影响[J]. 生态环境学报,2012,21(12):2031-2036.

[5] 王玲,郑荣周,李贤伟,等. 巨桉叶、凋落物、根的水浸液对莴笋的化感效应[J]. 四川林业科技,2009,30(3):55-60.

[6] 侯玉平,柳林,王信,等. 外来植物火炬树水浸液对土壤微生态系统的化感作用[J]. 生态学报,2013,33(13):4041-4049.

[7] 秦俊豪,贺鸿志,黎华寿,等. 芝麻、花生和田菁秸秆还田的化感效应研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(10):1941-1947.

[8] 刘义国,林琪,房清龙. 旱地秸秆还田对小麦花后光合特性及产量的影响[J]. 华北农学报,2013,28(4):110-114.

[9] 宁博. 红果黄鹌菜(*Youngia erythrocarpa*)对 Cd 的超富集机理研究[D]. 四川 雅安:四川农业大学,2014.

[10] Sun Yuebing, Zhou Qixing, Wang Lin, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyper accumulator[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,161(2/3):808-814.

[11] Zhang Xingfeng, Xia Hanping, Li Zhi'an, et al. Identification of a new potential Cd-hyper accumulator *Solanum photeinocarpum* by soil seed bank-metal concentration gradient method[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,189(1/2):414-419.

[12] Zhang Shirong, Lin Haichuan, Deng Liangji, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Siegesbeckia orentalis* L[J]. Ecological Engineering, 2013,51:133-139.

[13] 刘英杰. 荠菜对 Cd, Pb 胁迫的生理响应与富集特性研究[D]. 四川 雅安:四川农业大学,2014.

[14] 林立金,廖明安,梅洛银,等. 不同生态型小飞蓬对镉胁迫砧木樱桃植株磷钾吸收的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(12):1565-1568.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[16] 赵杨迪,潘远智,刘碧英,等. Cd, Pb 单一及复合污染对花叶冷水花生长的影响及其积累特性研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(1):48-53.

[17] Lin Lijin, Shi Jun, Liu Qihua, et al. Cadmium accumulation characteristics of the winter farmland weeds *Cardamine hirsuta* Linn. and *Gnaphalium affine* D. Don[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014,186(7):4051-4056.

[18] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境,2005,14(1):136-138.

[19] 黄翔,洪娟,张利红,等. 西瓜叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的多元回归和通径分析[J]. 湖北农业科学,2013,52(20):4953-4955.