doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.11.017

应用于碱性土壤上重金属污染的超积累植物种植研究

王小平,马延龙,姚一铭,刘晶晶

(甘肃省地质矿产勘查开发局 第三地质矿产勘查院,兰州 730050)

摘要:以调查区的严格管控区土壤为研究对象,挑选了酸模、龙葵、月季、金盏菊、万寿菊、油牡丹、凤仙花 7 种植物进行了大田试验,考察超积累植物对土壤中 Cd、Pb 富集的影响。结果表明,不同植物体内或同种植物体内各部位重金属的含量存在较大差异;酸模、金盏菊、龙葵、月季地上部分重金属含量明显高于地下部分,说明重金属在这几种植物的茎叶里积累较多。金盏菊、凤仙花、万寿菊、龙葵对 Cd 的富集较强,有利于修复 Cd 污染的土壤。除凤仙花外,其他 6 种植物对 Cd 的转运系数均大于 1,对 Cd 的转移能力由强到弱的顺序依次为酸模、金盏菊,龙葵、油牡丹、月季、万寿菊。就单株而言,积累生物量从大到小依次是酸模、金盏菊、万寿菊、月季;就每亩而言,积累生物量从大到小依次是金盏菊、酸模、月季、万寿菊。综合植物对重金属的富集系数、植物自身的转运系数、整株生物量以及植物的经济价值等考量,万寿菊、金盏菊、月季在修复土壤重金属污染的同时还可兼顾提升经济效益,酸模作为有效降低 Cd、Pb 含量的重金属修复植物,可推广应用于碱性耕地的重金属污染修复。

关键词:碱性土壤;重金属污染;超积累植物;酸模;月季;金盏菊;万寿菊

中图分类号:X52　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1007-7545(2021)11-0107-06

Hyperaccumulator Planting Applied for Heavy Metal Pollution in Alkaline Soil

WANG Xiao-ping, MA Yan-long, YAO Yi-ming, LIU Jing-jing

(The Third Institute of Geology and Mineral Resources, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking soils in strict control area of survey area as research object, seven plants, i. e., rumex, solanum nigrum, rose, calendula, marigold, oil peony, and impatiens, were selected for field experiments to investigate effects of hyperaccumulator plants on accumulation of Cd and Pb in soil were investigated. The results show that there are great differences in contents of heavy metals in different plants or different parts of the same plants. Contents of heavy metals in aboveground part of rumex, calendula, solanum nigrum and rose are significantly higher than that in underground part, indicating that heavy metals accumulate more in stems and leaves of these plants. Calendula, impatiens, marigold and solanum nigrum have strong enrichment of Cd, which is beneficial to restoration of Cd contaminated soil. Except impatiens, transport coefficient of other six plants to Cd is greater than one, and sequence of

收稿日期:2021-08-05

基金项目:国家土壤污染治理专项资金资助项目(A9920190301000002001)

作者简介:王小平(1991-),女,甘肃定西人,硕士研究生

Cd transfer ability from strong to weak is rumex, calendula, solanum nigrum, oil peony, rose and marigold. For a single plant, the sequence of accumulated biomass from large to small is rumex, calendula, marigold and rose; and for one Mu (666.7 m^2), the sequence of accumulated biomass from large to small is marigold, rumex, rose and marigold. Comprehensive considering enrichment coefficient of plants for heavy metals, transport coefficient of plants, biomass of whole plant, and economic value of plants, using of marigold, calendula and rose as heavy metal remediation plants can not only restore heavy metal pollution in soils, but also improve economic benefits. As a heavy metal remediation plant, rumex can effectively reduce contents of Cd and Pb, sorbum can be promoted and applied in heavy metal pollution remediation of alkaline arable land, it can be popularized and applied to remediation of heavy metals pollution in alkaline cultivated land.

Key words: alkaline soil; heavy metal pollution; hyperaccumulation; rumex; rose; calendula; marigold

近年来,由于矿产资源的大力开发,造成矿区周围耕地十分严峻的土壤环境污染问题[1],主要污染类型为重金属污染[2-3],土壤积累了大量的重金属,作物可食用部分大量超标,周边居民健康风险较大[4]。农产品安全问题成为目前备受关注的焦点,而耕地重金属的修复问题存在治理难度大、容易造成二次污染的特点。因此,为了在修复污染土壤的同时又能保证耕地与农产品安全,植物—农艺相结合的修复措施成为重金属生物修复技术中主要的技术备选[3],该技术具有修复效果好、可操作性强、无二次污染等特点,但目前该技术属于起步阶段,没有形成明确的技术模式,尤其是徽县地区还未找到适合当地土壤重金属污染的超富集植物。

目前,国内外通过检测发现的超富集植物超过了500种[4],遍布了菊科、豆科、十字花科、禾本科、廖科、蔷薇科等各个科属[5-8],本文根据大量文献阅读以及前期实地检测结果,选取菊科植物金盏菊、万寿菊,凤仙花科植物凤仙花,芍药科植物油牡丹,蔷薇科植物月季以及目前在植物修复重金属领域使用广泛的茄科植物龙葵、廖科植物酸模作为试验对象,通过大面积的种植试验,以确定最适合碱性土壤的超积累植物。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

徽县位于甘肃省陇南市东北部,属于大陆性季风气候,县内多年平均气温12.6 ℃,属于长江流域嘉陵江水系,区内多年平均降水量750.9 mm,调查区域土壤pH为8.32,呈碱性,由于铅锌矿开采选矿造成周边耕地土壤中Cd、Pb、As等重金属不同程度的污染,耕地内的农作物多有超标情况发生,农产品存在较大的安全隐患,周边居民存在一定的健康风险。试验区位于选矿厂周边耕地,主要重金属污染物为Cd、Pb、As。

1.2 样品采集

共设计点位36个(图1),待植物生长期完成后,按照每亩3个点位采集样品,将植物的根、茎叶、籽粒、花朵及该植物对应的土壤分别采样,放入自封袋,再将装有各样品的自封袋放入布袋并编号,采集样品时为防止污染,应在采样全程中保持工具干净,本文共采集了植物根茎叶样品117件,根系协同土壤样品40件。

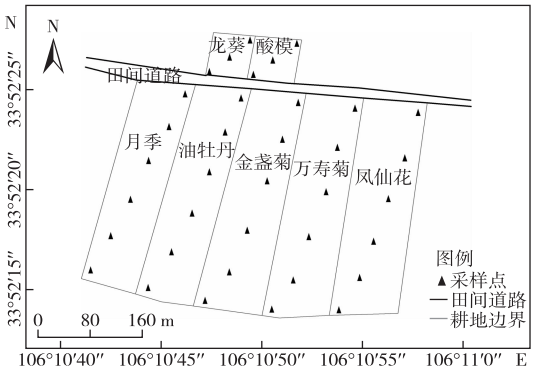

图1 超积累植物采样点位分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points of hyperaccumulation plants

1.3 土壤样品测试方法

土壤样品检测方法如下:Pb、Cd采用《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997);As《土壤质量 总砷的测定 二乙基二硫代氨基甲酸银分光光度法》(GB/T 17134—1997);Cr采用《土壤 总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2009);Hg采用《土壤质量 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法》(GB/T 17136—1997)。

植物样品检测方法：As、Cd、Cr、Hg、Pb 采用《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016)

2 结果与分析

2.1 超积累植物重金属含量积累差异分析

由表 1 可知，7 种植物体内 Pb、Cd 的含量普遍较高，其次是 Cr、As，而 Hg 含量最低，表明重金属在植物的根、茎叶、花各部位均有积累。其中，龙葵地下部分的 Pb 含量最高，为 18.150 mg/kg，万寿菊地上部分的 Cd 值最高，为 8.160 mg/kg，酸模地上部分的 As、Hg 含量最高，分别为 1.955、0.114 mg/kg，Cr 含量最高的是凤仙花地下部分，为 3.083 mg/kg。

表 1　超积累植物中重金属含量平均值

Table 1　Average contents of heavy metals in hyperaccumulators　/(mg · kg^{-1})

植物名称	部位	As	Cd	Cr	Hg	Pb
酸模	地上部分	1.955	1.985	1.605	0.114	15.950
	地下部分	0.480	0.530	0.810	0.051	5.770
龙葵	地上部分	0.805	6.440	0.795	0.072	5.910
	地下部分	1.230	3.680	1.340	0.080	18.150
	种子	0.710	2.625	0.930	0.045	5.630
月季	地上部分	0.687	0.913	0.753	0.048	5.073
	地下部分	0.403	0.780	1.087	0.028	4.473
	花	0.790	0.783	0.770	0.056	3.997
金盏菊	地上部分	0.680	1.573	1.097	0.052	4.513
	地下部分	0.807	0.800	1.057	0.060	2.767
	花	1.243	1.497	1.120	0.041	6.953
万寿菊	地上部分	0.207	8.160	0.501	0.069	2.039
	地下部分	0.569	6.384	0.993	0.052	15.771
	花	0.115	1.548	0.385	0.022	0.953
油牡丹	地上部分	0.405	0.407	0.803	0.110	2.420
	地下部分	0.533	0.227	1.550	0.037	2.467
	籽粒	0.137	0.230	0.327	0.032	0.250
凤仙花	地上部分	0.533	1.070	1.128	0.051	2.270
	地下部分	1.313	1.390	3.083	0.081	7.170
	花	0.028	0.181	<0.070	0.003	0.127

植物体内各部位 As 含量规律：酸模、月季地上部分重金属含量明显高于地下部分，说明 As 主要积累在这几种植物的茎叶里；龙葵、金盏菊、万寿菊、油牡丹、凤仙花地下部分重金属含量高于地下部分，表明 As 主要积累在这几种植物的根里。

植物体内各部位 Cd 含量规律：除凤仙花外，其他 6 种植物 Cd 含量明显高于地下部分，说明 Cd 主要积累在这几种植物的茎叶里。

植物体内各部位 Cr 含量规律：酸模、金盏菊地上部分 Cr 含量明显高于地下部分，说明 Cr 主要积累在这几种植物的茎叶里；龙葵、月季、万寿菊、油牡丹、凤仙花地下部分 Cr 含量高于地上部分，表明 Cr 主要积累在这几种植物的根里。

植物体内各部位 Hg 含量规律：酸模、月季、万寿菊、油牡丹地上部分 Hg 含量明显高于地下部分，说明 Hg 主要积累在这几种植物的茎叶里；龙葵、金盏菊、凤仙花地下部分 Hg 含量高于地下部分，表明 Hg 主要积累在这几种植物的根里。

植物体内各部位 Pb 含量规律：酸模、月季、金盏菊地上部分 Hg 含量明显高于地下部分，说明 Pb 主要积累在这几种植物的茎叶里；龙葵、万寿菊、油牡丹、凤仙花地下部分 Pb 含量高于地下部分，表明 Pb 主要积累在这几种植物的根里。

2.2 超积累植物对重金属的富集分析

富集系数是指植物体内重金属含量与土壤中重金属含量的比例[9]。富集系数是用来衡量盖植物积累能力大小的重要指标，富集系数越大，植物的富集能力越强，越利于重金属污染的修复。由表 2 可知，超积累植物各个部位对 Cd 的富集系数普遍较高，金盏菊地上部分、花，万寿菊地上、地下部分，凤仙花地上、地下部分大于 1，龙葵地上、地下部分均大于 0.5，表明金盏菊、凤仙花、金盏菊、龙葵对 Cd 的富集较强，有利于修复 Cd 污染的土壤；其次是 Hg、As、Pb，Cr 最低，均低于 0.5，由于植物协同土壤中 Cr 含量较低，因此几种植物对 Cr 的富集较弱。其中凤仙花地下部分对 As 的富集系数最高为 0.098，凤仙花地下部分对 Cd 的富集系数最高为 1.552，酸模地上部分对 Cr 的富集系数最高为 0.026，油牡丹地上部分对 Hg 的富集系数最高为 0.413，金盏菊花对 Pb 的富集系数最高为 0.201。表明上述植物是选择性富集重金属的，不同重金属在同种植物体内的不同部位的富集特征不同，同种重金属在相同植物体内富集能力也不相同。

2.3 超积累植物对重金属的转运分析

转运系数是植物地上部分重金属含量与植物根部重金属含量的比例[10]。转运系数主要反映植物根系向地上部分迁移转运重金属的能力，转运系数越大，植物根系向地上部分转移重金属的能力就越强。如表 3 所示，除凤仙花外，其他 6 种超积累植物对 Cd 的转运系数均大于 1，酸模甚至达到 3.745，6 种植物对 Cd 的转移能力由强到弱的顺序依次为酸模、金盏菊，龙葵、油牡丹、月季、万寿菊。酸模体

内对5种重金属的转运系数均最高,分别为As 4.156、Cd 3.745、Cr 1.975、Hg 2.678、Pb 2.768;龙葵对Cd的转运能力最强,转运系数为1.805,对Pb最弱,转运系数为0.353;月季对As的转运能力最强,转运系数为1.748,对Cr最弱,转运系数为0.744;金盏菊对Cd的转运能力最强,转运系数为2.456,对Hg最弱,转运系数为0.887;万寿菊对Hg的转运能力最强,转运系数为1.536,对Pb最弱,转运系数为0.150;油牡丹对Pb的转运能力最强,转运系数为2.837,对Cr最弱,转运系数为1.234;凤仙花对Hg的转运能力最强,转运系数为0.745,对Pb最弱,转运系数为0.315。上述结果表明,不同重金属元素在同一种植物体内不同部位的转移特征有差异,同种重金属元素在相同植物体内转移能力也有差异。本项目种植的7种超积累植物对5种重金属的转运系数大多数大于1,表明酸模、龙葵、月季、金盏菊转移重金属的能力较强,大面积种植修复效果较好。

表2 植物体内5种重金属元素的富集系数

Table 2 Enrichment factors of five heavy metals in plants

植物名称	部位	As	Cd	Cr	Hg	Pb
酸模	地上部分	0.083	0.415	0.026	0.049	0.031
	地下部分	0.020	0.111	0.013	0.027	0.011
龙葵	地上部分	0.032	0.697	0.016	0.035	0.015
	地下部分	0.044	0.575	0.022	0.037	0.029
	种子	0.026	0.410	0.016	0.021	0.009
月季	地上部分	0.032	0.431	0.011	0.083	0.036
	地下部分	0.019	0.326	0.016	0.042	0.029
	花	0.035	0.356	0.012	0.088	0.027
金盏菊	地上部分	0.044	1.539	0.017	0.166	0.062
	地下部分	0.050	0.625	0.017	0.170	0.028
	花	0.077	1.236	0.018	0.132	0.201
万寿菊	地上部分	0.012	1.318	0.021	0.067	0.005
	地下部分	0.032	1.108	0.012	0.043	0.037
	花	0.006	0.254	0.015	0.023	0.002
油牡丹	地上部分	0.033	0.422	0.020	0.413	0.035
	地下部分	0.043	0.234	0.022	0.125	0.032
	籽粒	0.010	0.204	0.016	0.077	0.002
凤仙花	地上部分	0.040	1.123	0.013	0.163	0.032
	地下部分	0.098	1.552	0.013	0.278	0.095
	花	0.002	0.110	0.002	0.012	0.001

表3 植物体内重金属元素的转运系数

Table 3 Transport coefficients of heavy metals in plants

植物名称	As	Cd	Cr	Hg	Pb
酸模	4.156	3.745	1.975	2.678	2.768
龙葵	0.660	1.805	0.624	1.035	0.353
月季	1.748	1.314	0.744	1.679	1.248
金盏菊	0.940	2.456	1.040	0.887	2.190
万寿菊	0.445	1.190	0.610	1.536	0.150
油牡丹	1.893	1.768	1.234	2.566	2.837
凤仙花	0.435	0.735	0.417	0.745	0.315

2.4 超积累植物生物量及以生物量为基准计算该植物吸收各项重金属的含量对比

一种植物要满足超积累植物的条件主要有3个方面[11]:一是重金属含量是普通植物的100倍以上;二是富集系数与转运系数均大于1;三是生物量较大。因此,引入生物量指标,以生物量为基准,计算该植物每亩吸收各项重金属含量(1亩=666.7 m^2),结果如表4所示。从表4可以看出,地上部分生物量从大到小依次为酸模、月季、油牡丹、万寿菊、金盏菊、凤仙花、龙葵,其中生物量最大的是酸模,为46.1 g/株,最小的是龙葵,为0.9 g/株,地下部分生物量从大到小依次为酸模,月季,万寿菊、油牡丹、金盏菊、凤仙花、龙葵,其中生物量最大的是酸模,为17.8 g/株,最小的是龙葵,为0.2 g/株。

如表5所示,以整株生物量计算,每亩超积累植物吸收As的量由高到低的顺序为:金盏菊>酸模>凤仙花>月季>油牡丹>万寿菊>龙葵;每亩超积累植物吸收Cd的量由高到低的顺序为:万寿菊>金盏菊>月季>凤仙花>酸模>龙葵>油牡丹;每亩超积累植物吸收Cr的量由高到低的顺序为:金盏菊>凤仙花>月季>酸模>油牡丹>万寿菊>龙葵;每亩超积累植物吸收Hg的量由高到低的顺序为:金盏菊>酸模>油牡丹>凤仙花>月季>万寿菊>龙葵;每亩超积累植物吸收Pb的量由高到低的顺序为:酸模>金盏菊>月季>万寿菊>凤仙花>油牡丹>龙葵。上述分析表明,以植物吸收重金属的生物量计算,万寿菊、金盏菊、酸模、月季可作为有效降低Cd、Pb等重金属含量的超积累植物。

表 4　超积累植物生物量对比

Table 4　Comparison of biomass of hyperaccumulators

植物名称	部位	个体生物量/(g·株$^{-1}$)	每亩数量/株	吸收重金属量/mg				
				As	Cd	Cr	Hg	Pb
酸模	地上部分	46.1	800	72.100	73.207	59.192	4.204	588.236
	地下部分	17.8	800	6.835	7.547	11.534	0.726	82.165
龙葵	地上部分	3.9	800	2.512	20.093	2.480	0.225	18.439
	地下部分	2.2	800	2.165	6.477	2.358	0.141	31.944
	种子	0.01	800	0.011	0.042	0.015	0.001	0.090
月季	地上部分	23.0	2 500	39.503	52.498	43.298	2.760	291.698
	地下部分	13.7	2 500	13.803	26.715	37.230	0.959	153.200
	花	4.2	2 500	8.295	8.222	8.085	0.588	41.969
金盏菊	地上部分	9.7	8 000	52.768	122.065	85.127	4.035	350.209
	地下部分	6.3	8 000	40.673	40.320	53.273	3.024	139.457
	花	1.5	8 000	14.916	17.964	13.440	0.492	83.436
万寿菊	地上部分	13.2	2 500	6.831	269.280	16.533	2.277	67.287
	地下部分	8.8	2 500	12.518	140.448	21.846	1.144	346.962
	花	3.1	2 500	0.891	11.997	2.984	0.171	7.386
油牡丹	地上部分	17.2	2 000	14.001	14.001	27.623	3.784	83.248
	地下部分	7.8	2 000	8.315	3.541	24.180	0.577	38.485
	籽粒	8.6	2 000	2.356	3.956	5.624	0.550	4.300
凤仙花	地上部分	6.2	6 000	19.828	39.804	41.962	1.897	84.444
	地下部分	5.5	6 000	43.329	45.870	101.739	2.673	236.610
	花	0.01	6 000	0.002	0.011	0	0.000 2	0.008

表 5　每亩超积累植物整株吸收重金属量对比

Table 5　Comparison of heavy metal uptake by whole plant of hyperaccumulators in one Mu (666.7 m^2)　/mg

植物名称	As	Cd	Cr	Hg	Pb
酸模	78.94	80.75	70.73	4.93	670.40
龙葵	4.69	26.61	4.85	0.37	50.47
月季	61.60	87.44	88.61	4.31	486.87
金盏菊	108.36	180.35	151.84	7.55	573.10
万寿菊	20.24	421.73	41.36	3.59	421.64
油牡丹	24.67	21.50	57.43	4.91	126.03
凤仙花	63.16	85.68	143.70	4.57	321.06

3　结果与讨论

通过对植物对重金属富集量、转运重金属的能力、植物吸收重金属的生物量以及植物在当地的经济价值等方面分析后，7 种超积累植物中万寿菊、金盏菊、月季 3 种植物在修复重金属污染土壤的同时可兼顾提升为经济植物，酸模可作为有效降低 Cd、Pb 含量的重金属修复植物，推广应用于碱性重金属污染的耕地。

发现只有酸模是对碱性土壤上 Cd、Pb 复合污染较为理想的修复植物，而万寿菊、金盏菊、月季主要是在修复 Cd 单因子污染耕地比较突出，因此，应当发掘更多理想的修复植物来针对试验区的复合因子污染问题，另外，超积累植物的后续处理问题是目前的一个难点[12-14]，还需相应技术支撑以及政策支持，促使碱性土壤重金属污染修复模式愈加完善。

4　结论

1)不同植物体内或同种植物体内各部位重金属的含量存在较大差异，重金属在酸模、金盏菊、龙葵、月季这几种植物的茎叶里积累较多。金盏菊、凤仙花、万寿菊、龙葵对 Cd 的富集较强，有利于修复 Cd 污染的土壤。除凤仙花外，其他 6 种植物对 Cd 的转运系数均大于 1。就单株而言，积累生物量从大到小依次是酸模、金盏菊、万寿菊、月季；就每亩而言，积累生物量从大到小依次是金盏菊、酸模、月季、万寿菊。

2)综合植物对重金属的富集、转运能力、吸收重金属的生物量以及植物所产生的经济价值等方面，万寿菊、金盏菊、月季不仅能修复土壤重金属污染，还可提升经济效益。酸模是可推广应用于碱性土壤上 Cd、Pb 复合污染较为理想的修复植物。

3)超积累植物的后续处理问题还需进一步研究。

参考文献

[1]　张永康，冯乃琦，张耀，等. 某铅锌矿区土壤重金属污染

分析[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):102-108.
ZHANG Y K,FENG N Q,ZHANG Y,et al. Analysis of heavy metal pollution in soil of a lead-zinc mining area[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2021(3):102-108.

[2] 田文钢,姚佳斌,蒋尚,等.生物修复技术处理重金属污染土壤的研究进展[J].环境与发展,2020,32(12):34-35.
TIAN W G, YAO J B, JIANG S, et al. Research progress of bioremediation technology in the treatment of heavy metal contaminated soil[J]. Environment and Development,2020,32(12):34-35.

[3] 王兴利,王晨野,吴晓晨,等.重金属污染土壤修复技术研究进展[J].化学与生物工程,2019(2):1-5.
WANG X L,WANG C Y,WU X C,et al. Research progress on remediation technology of heavy metal contaminated soil[J]. Chemistry and Bioengineering,2019(2):1-5.

[4] 武晶芳,江帆,韦唯,等.某镍钼矿区周边土壤重金属风险评价及种植蔬菜健康风险评估[J].有色金属(冶炼部分),2019(7):84-90.
WU J F,JIANG F,WEI W,et al. Risk assessment of heavy metals in soil and health risk assessment of vegetable growing around nickel-molybdenum mine area[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2019(7):84-90.

[5] 胡鹏杰,李柱,钟道旭,等.我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J].植物生理学报,2014,50(5):577-584.
HU P J,LI Z ZHONG D X,et al. Research progress on plant uptake and remediation of soil heavy metal pollution in China[J] Journal of Plant Physiology,2014,50(5):577-584.

[6] 杨启良,武振中,陈金陵,等.植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J].生态环境学报,2015,24(6):1075-1084.
YANG Q L, WU Z Z, CHEN J L, et al. Research status of phytoremediation of heavy metal contaminated soil and prospect of water and fertilizer regulation technology[J]. Ecology and Environment Sciences,2015,24(6):1075-1084.

[7] 骆永明,吴龙华,胡鹏杰,等.镉锌污染土壤的超积累植物修复研究[M].北京:科学出版社,2015:1406-1412.
LUO Y M, WU L H, HU P J, et al. Study on Hyperaccumulation Phytoremediation of Cadmium and Zinc Contaminated Soil[M]. Beijing: Science Press,2015:1406-1412.

[8] 黑泽文,向慧敏,章家恩,等.豆科植物修复土壤重金属污染研究进展[J].生态科学,2019,38(3):218-224.
HEI Z W,XIANG H M,ZHANG J E,et al. Research progress of legume phytoremediation of soil heavy metal pollution[J]. Ecological Science,2019,38(3):218-224.

[9] 刘文琳,刘国.菊科植物修复土壤重金属污染的研究综述[J].资源节约与环保,2017(4):85,88.
LIU W L,LIU G. Review on remediation of soil heavy metal pollution by compositae plants[J]. Resources Economization & Environmental Protection,2017(4):85,88.

[10] 杨小琴.凤仙花和万寿菊对铅胁迫的生理响应及其对铅污染土壤的修复[D].长沙:湖南农业大学,2008.
YANG X Q. Physiological response of impatiens and marigold to lead stress and their remediation of lead contaminated soil[D]. Changsha: Hunan Agricultural University,2008.

[11] 韦小了,牟力,付天岭,等.不同钝化剂组合对水稻各部位吸收积累Cd及产量的影响[J].土壤学报,2019,56(4):883-894.
WEI X L,MOU L,FU T L,et al. Effects of passivator on Cd absorption and accumulation and yield of rice as affected by its combination[J]. Acta Pedologica Sinica,2019,56(4):883-894.

[12] BINI C,WAHSHA M,FONTANA S,et al. Effects of heavy metals on morphological characteristics of Taraxacum officinale Web growing on mine soils in NE Italy[J]. Journal of Geochemical Exploration,2012,123:101-108.

[13] 周启星,魏树和,刁春燕.污染土壤生态修复基本原理及研究进展[J].农业环境科学学报,2007,26(2):419-424.
ZHOU Q X,WEI S H,DIAO C Y. Basic principles and research progress of ecological remediation of polluted soil[J]. Journal of Agro-environment Sciences,2007,26(2):419-424.

[14] ZHANG J, LIANG P. Comparison of ashing and pyrolysis treatment on cadmium/zinc hyperaccumulator plant:Effects on bioavailability and metal speciation in solid residues and risk assessment[J]. Environmental Pollution, 2020, 272(5): 116039. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116039.