

DOI: 10.5846/stxb201812242790

张云霞,周浪,肖乃川,庞瑞,宋波.鬼针草(*Bidens pilosa* L.)对镉污染农田的修复潜力.生态学报,2020,40(16):5805-5813.

Zhang Y X, Zhou L, Xiao N C, Pang R, Song B. Remediation Potential of *B. pilosa* L. in Cadmium-Contaminated Farmland. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16):5805-5813.

## 鬼针草(*Bidens pilosa* L.)对镉污染农田的修复潜力

张云霞<sup>1</sup>,周浪<sup>1</sup>,肖乃川<sup>1</sup>,庞瑞<sup>1</sup>,宋波<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004

<sup>2</sup> 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004

**摘要:**为探究富集植物鬼针草对镉(Cd)污染农田土壤的修复潜力,通过野外调查,原土盆栽试验和田间试验,测定鬼针草及其根系土壤Cd含量,计算鬼针草的富集系数和去除率。结果表明,野外调查中不同铅锌矿区生长的鬼针草叶片中Cd含量最大值为53.3 mg/kg。盆栽试验中,低浓度Cd土壤处理(T1),鬼针草地上部Cd的富集系数为4.70,转运系数1.59,大于1。高浓度Cd土壤处理(T2 13.4 mg/kg),其地上部Cd积累量达到43.1 mg/kg,其地上部Cd富集系数为3.51。鬼针草对Cd表现出稳定的积累特性。田间试验小区中,土壤Cd含量均值为2.66 mg/kg,鬼针草中地上部Cd含量均值为10.9 mg/kg,富集系数为4.16。使用鬼针草修复Cd污染土壤每公顷地种植一茬鬼针草的去除率为4.3%—6.2%。使用富集植物鬼针草修复农田Cd污染具有较好的工程应用前景。

**关键词:**鬼针草;Cd;植物修复;农田修复

## Remediation Potential of *B. pilosa* L. in Cadmium-Contaminated Farmland

ZHANG Yunxia<sup>1</sup>, ZHOU Lang<sup>1</sup>, XIAO Naichuan<sup>1</sup>, PANG Rui<sup>1</sup>, SONG Bo<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

<sup>2</sup> Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin 541004, China

**Abstract:** The potential of remediation of cadmium (Cd)-contaminated farmland soil by enrichment of the plant *B. pilosa* L. was explored by determination of Cd content in the soil and at the root-soil interface through field investigation, soil pot experiments, and field experiments, and the bioaccumulation factor and removal rate of vetiver were calculated. Field investigation of the growth of the *B. pilosa* L. in mines sites of four provinces revealed a maximum Cd content of 53.3 mg/kg. In the pot experiments with a low concentration of Cd in soil treatment (T1), the *B. pilosa* L. Cd bioaccumulation factor was 4.70 and the translocation factor was 1.59 (greater than 1); with a high concentration of Cd in soil treatment (T2 13.4 mg/kg), the aboveground Cd accumulation reached 43.1 mg/kg, and the aboveground Cd bioaccumulation factor was 3.51. *B. pilosa* L. showed stable accumulation of Cd. In the field test plot, the average content of Cd in soil was 2.66 mg/kg, the average content of Cd in the upper part of the field was 10.9 mg/kg, and the enrichment coefficient was 4.16. The removal rate by *B. pilosa* L. was between 4.3% and 6.2%. Thus, *B. pilosa* has good potential for use in engineering applications to resolve Cd pollution in farmland.

**Key Words:** *B. pilosa* L.; Cd; phytoremediation; farmland restoration

基金项目:广西科技成果转化与推广计划(桂科转1599001-1);广西科技重大专项;广西农田重金属污染防治关键技术研究及应用示范(桂科AA17204047)

收稿日期:2018-12-24; 网络出版日期:2020-06-08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songbo@glut.edu.cn

近年,由于工业“三废”和含 Cd 肥料大量施用,大量的重金属 Cd 进入土壤后导致土壤中 Cd 污染日趋严重,Cd 作为重金属中毒性和迁移性最强的一种,通过食物链在人体内累积并造成危害<sup>[1-3]</sup>。因此,对 Cd 污染农田土壤的修复变得十分重要。与传统重金属污染修复方法相比,重金属污染的植物修复技术以其无二次污染、低成本等优点成为各国重金属污染治理领域的热点,而修复植物的选择是植物修复最重要的内容<sup>[4-7]</sup>。目前,已有文献报道的超富集植物有东南景天<sup>[8-9]</sup>,宝山堇菜<sup>[10]</sup>,印度芥菜<sup>[11]</sup>等,但因其生物量小,或因抵抗恶劣环境的能力较差等因素,没有被大面积的推广和应用。

鬼针草(*B. pilosa* L.)<sup>[12]</sup>,一年生草本,分布于中国的大部分地区,喜温暖湿润气候,路边,房屋旁和荒野均能生长,为民间常用草药。魏树和等<sup>[13]</sup>最早报道三叶鬼针草为镉超富集植物,也有学者<sup>[14]</sup>研究了农田生态型与矿山生态型两种三叶鬼针草的不同株数混种比例对其镉累积的影响,也有学者<sup>[15]</sup>研究了以不同 Cd 污染程度的实际土壤为对象,采用盆栽试验,对比三叶鬼针草、黑麦和印度芥菜对 Cd 的耐受、富集、转移能力及修复效率,学者<sup>[16]</sup>通过土培盆栽试验研究了白花鬼针草对重金属 Cd 的耐性和富集迁移特性,有学者<sup>[17]</sup>选取玉米为研究对象,配合超富集植物三叶鬼针草间作,发现玉米套种三叶鬼针草同时施用螯合剂乙二胺二琥珀酸(EDDS),污染地块土壤中 Cd、Pb 提取率最优。但对野外调查、盆栽试验和田间试验系统比较鬼针草的富集特性的研究较少,研究选择广西,广东,贵州和福建典型的铅锌矿区内,采集鬼针草及其根际土壤;并设计室内盆栽和田间试验,探讨鬼针草对 Cd 的富集特性和对 Cd 污染农田土壤修复的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 野外调查

2017 年 5—8 月实地调查了 10 个铅锌矿区(表 1),以上矿区在调查时已经停止采矿活动均有 5 年以上的时间,矿区内杂草丛生,在矿区中选择长势好的鬼针草,共采集了 19 组鬼针草及其根系土壤样品。

表 1 采样的矿区

Table 1 Sampled mining area

地区 Region	铅锌矿 Lead-zinc mine	经度/E Longitude	纬度/N Latitude
广西壮族自治区扶绥县	淩井铅锌矿	110°43'27"	22°53'59"
广西壮族自治区岑溪县	河三铅锌矿	111°10'19"	23°2'38"
广西壮族自治区大新县	大新铅锌矿	107°16'33"	22°57'16"
广西壮族自治区融安县	泗顶铅锌矿	109°31'10"	25°3'30"
贵州省都匀市	牛角塘铅锌矿	107°39'38"	26°14'01"
福建省连城县	连城铅锌矿	116°43'20"	25°21'11"
广东省韶关市	凡口铅锌矿	113°37'31"	25°05'58"
广东省清远市	铁屎坪铅锌矿	112°56'17"	24°29'48"
广东省连南县	鸡麻坑铅锌矿	112°17'03"	24°27'29"
广东省连南县	坪头岭铅锌矿	112°17'29"	24°28'43"

### 1.2 盆栽试验

#### 1.2.1 试验时间地点

2018 年 4—7 月,盆栽试验地点设在桂林理工大学雁山校区水站内(站内加盖了挡雨塑料棚,棚内高度为 4 m),地理位置为东经 110°17',北纬 25°05',海拔约 194 m,该试验站周围没有污染源。

#### 1.2.2 供试材料

供试土壤采自桂林某受矿业活动及矿业排放污水污染的不同 Cd 污染程度的耕地表层土(低浓度 T1 组和高浓度 T2 组)<sup>[18]</sup>和对照组(CK),土壤类型为旱地土壤,2018 年 3 月 5 日采集带回实验室,供试土壤自然风干后,全部过 4 mm 筛,充分混匀后,称取 3.5 kg 土壤于花盆中备用,设置高浓度和低浓度分布为处理 1 和处

理 2, 每个处理设置 4 个平行。供试土壤性质见表 2。鬼针草种子购买自江苏宿迁绿地工程有限公司。

表 2 供试土壤基本性质

Table 2 Basic properties of the tested soil

组别 Group	酸碱度 pH	总 Cd Total Cd/ (mg/kg)	有效态 Cd Available form Cd/(mg/kg)	有机质 Organic matter/ (g/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	速效钾 Available kalium/ (mg/kg)
CK	7.20	0.45	0.25	21.2	22.5	141
T1 Treatment 1	6.78	3.53	1.99	24.5	21.5	131
T2 Treatment 2	6.54	13.4	10.5	22.7	21.3	133

CK 表示对照组, T1, T2 为处理组; 有效态 Cd 是使用 DTPA (二乙烯三胺五乙酸) (0.005 mol/L) 浸提的有效态 Cd 含量

### 1.2.3 试验设计

于 2018 年 5 月 15 日播种, 播种后 25d 间苗, 每盆留长势相近的 3 株苗。为了使其在自然状况下生长, 不施底肥且露天栽培, 根据盆中土壤缺水情况, 不定期浇水(水中未检出 Cd), 使土壤含水量经常保持在田间持水量的 80% 左右。为防止污染物淋溶渗漏损失, 在盆下放置塑料托盘并将渗漏液倒回盆中, 植物生长 60d 后(2018 年 8 月 10 日)收获分析。

## 1.3 田间试验

### 1.3.1 试验方案

研究区域位于广西壮族自治区东北面, 桂林市区南面, 隶属桂林市管辖, 县城距离桂林市区 65 km, 地处东经 110°13'—110°40', 北纬 24°38'—25°04'。区域上游铅锌矿开采活动导致下游农田被 Cd 污染<sup>[16]</sup>。除了鬼针草之外, 还在大田种植了青葙、籽粒苋和八宝景天用于对比。2018 年 7—10 月, 各选择 0.0667、0.0333、0.0066 hm<sup>2</sup> 左右 Cd 污染农田进行田间试验小区, 分别种植鬼针草(小区 1), 籽粒苋(小区 2) 和八宝景天(小区 3)。考虑到试验地在田间试验过程中的重要性, 选择阳光充足、四周空旷、便于管理, 相对平坦的地进行试验。2018 年 7 月 15 日, 深耕土壤, 均匀施加复合肥作为基肥, 混施后旋耕, 定期浇水, 保持田间持水量为 80% 左右。播种鬼针草, 采用条播方式(22.5 kg/hm<sup>2</sup>) 鬼针草和籽粒苋播种时采用种子和沙子 1:1 混匀后再播, 行距为 20 cm, 按行距拉线踩印, 开沟播种, 播种时应尽量保证播种均匀, 深浅一致, 避免漏种, 覆土 0.5—1 cm。八宝景天则为扦插的方式, 植物定苗后约 15d, 适当间苗, 保持每公顷约 90000 株植株。生长过程中, 适当施用基肥, 每公顷追加尿素 105—120 kg, 保持植物正常的营养需求, 并适当除草, 生长 60d 后(2018 年 10 月 20 日), 根据小区的面积大小, 采集鬼针草地上部样品及其根系土壤共 10 组, 籽粒苋 2 组, 八宝景天 1 组, 并于取样后进行测产。

## 1.4 样品采集与分析

植物样品与根系土壤同步采集, 野外调查时和田间试验采集完整一株鬼针草植株, 盆栽试验室采集花盆中所有鬼针草, 将其置于牛皮档案袋中, 并带回实验室。根据试验目的, 将植物分成根、茎、叶, 或者地上部和地下部, 将其用自来水清洗干净, 再用流动的超纯水润洗 3—5 次, 自然晾干后称鲜重, 并于干燥箱中(80℃左右)烘干至恒重, 此时称干重用于计算植物含水率, 取出样品用不锈钢打磨机粉碎后装入聚乙烯瓶中编号待分析。田间试验时取样后, 在植物鬼针草种植区随机划定 4 m<sup>2</sup> 小区 3 个, 收获全部地上部植物后, 称重, 记录, 以计算鬼针草大田生物量。采用类似方法对籽粒苋和八宝景天进行测产。

采集植物根际周边土壤, 将植物轻轻拔起后, 抖动根部, 将根部散落土壤收集于布袋中, 或根部黏着的土壤量较少时, 在植物根部生长处采集土壤, 即为根际周边土壤。考虑到耕作层土壤有效部分为 0—10 cm, 采集田间试验土壤时采集鬼针草根际 0—10 cm 的土壤, 记录并编号后带回试验室, 在实验室除去石块和植物根系并且使其自然风干, 之后磨碎, 每个土壤样品分别过 0.841 mm 和 0.149 mm 尼龙筛网, 之后将样品装进牛皮信封袋保存。样品的采集、混合和研磨等处理均使用木头、塑料或玛瑙等非金属工具, 以避免样品被污染, 每

制备完成一个土壤样品,必须用清水将工具完全清洗干净,以避免土壤样品间的交叉污染。

土壤 pH 采用土水比为 1: 2.5 的 pH 电位法测定<sup>[19]</sup>,土壤消解采用美国国家环保局<sup>[20-21]</sup>(US EPA)推荐的 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>体系,植物样品采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>方法消解,有效态 Cd、Pb 采用 DTPA 浸提法<sup>[22-23]</sup>,用石墨炉原子吸收分光光度计(AA-700,美国珀金埃尔默 PE)测定 Cd、Pb 含量,使用 ICP-OES 测定 Cu、Zn、Ni 含量。同时,为保证试验方法的可靠性和所用试剂的可靠性,并尽量减少由于环境和实验员操作所产生的误差,在分析样品时加入 10%—15%的重复数。分析过程分别加入国家标准土壤样品(GSS-4、GSF-4)、国家标准植物样品(GSV-1)进行质量控制,分析中 Cd 的回收率为 82.2%—109%,符合分析质量控制要求。

### 1.5 统计分析

富集系数(BCF)反映植物从土壤中吸收重金属能力,计算方法如(1)所示;转运系数(TF)可作为植物将重金属从地下向地上部分运输能力的评价系数,计算方法如(2)所示<sup>[9, 24]</sup>。此外,大田试验中,可通过植物干重与地上部分含量乘积计算每公顷植物的 Cd 吸收量,结合土壤中 Cd 含量计算去除效率。(1)富集系数 BCF = 地上部中重金属含量/土壤中重金属含量;(2)转运系数 TF = 地上部重金属含量/根部重金属含量。土壤重金属污染评价采用单因子污染指数法<sup>[25]</sup>。

试验结果使用 Excel 2013 进行整理,应用 SPSS 23.0 进行统计分析。数据符合正态分布,平均值使用算术均值,符合对数正态分布,使用几何均值。土壤环境质量采用《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)为标准评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 野外调查中鬼针草对重金属的富集特征

调查的 4 个省份的铅锌矿土壤中重金属含量见表 3。其中,广东省,广西壮族自治区,贵州省和福建省铅锌矿区土壤 Cd 含量分别为 52.3、43.9、157、71.3 mg/kg。相关性分析结果发现,有效态 Cd 与全量 Cd 在 0.05 水平上显著相关,全量 Pb 与有效态 Pb 在 0.01 水平上有显著的相关性。

调查的矿区中鬼针草中根,茎,叶含量见表 4。叶片中 Cd 含量最大值为 53.3 mg/kg,均值为 24.8 mg/kg。四个省份中,根、茎、叶中 Cd 含量差异不显著,不同部分 Cd 含量表现为:叶片>茎>根。对 Cd 表现出稳定的积累特性,其他重金属含量在鬼针草植株中表现在正常范围。矿区鬼针草植物富集系数(BCF)和地上部转运系数(TF)见表 5 和表 6,可以看出:鬼针草 Cd 的富集系数最大值为 2.08,均值为 0.60,转运系数为 1.99。不同省的 Cd 的富集系数均值为:贵州<广东<福建<广西<1。其转运系数均大于 1,运输 Cd 的能力较强。对于其余重金属,鬼针草的富集系数均<1。

所调查的根系土壤中 Pb 和 Zn 的含量较高,在不同矿区所采集的鬼针草植株均长势较好,没有发现毒害现象。经相关性分析发现在 0.05 水平下,鬼针草对 Cd 的富集系数与有效态 Cd 表现显著的相关性。需要在盆栽和田间试验中验证鬼针草对 Cd 污染农田的修复效率和可行性。

表 3 调查的不同省份铅锌矿鬼针草根系土壤重金属含量

Table 3 Statistics of heavy metals in lead-zinc mines soil in different provinces

省份 Provinces	样本数 Samples	平均值±标准差 Mean±Standard deviation/(mg/kg)						
		Cd	DTPA-Cd	Cu	Ni	Pb	DTPA-Pb	Zn
广东	6	52.3±38.7	19.1±18.5	461.0±284	15.2±5.3	4512.0±3673	878.4±348.6	3058.0±2453
广西壮族自治区	7	43.0±30.9	14.8±9.3	112.0±72	22.2±14.0	3132.0±2863	1082.0±796	6646.0±8187
贵州	5	157.0±151	30.5±24.3	38.0±33.3	12.5±6.6	198.0±107	35.9±11.3	8661.0±10333
福建	1	71.3	21.4	214.0	25.5	10488.0	3146.0	8284.0
总计 Total	19	77.5±90.8	20.6±17.2	208.0±240	17.6±10.2	3183.0±3537	851.0±862	6129.0±7282

DTPA-Cd/Pb 表示用 DTPA 浸提的有效态 Cd/Pb 含量, n 表示样品数

表 4 调查矿区中鬼针草中重金属含量/(mg/kg)

Table 4 Concentration of heavy metal in *Bidens pilosa* L.

省份 Provinces	N Sample	部位 Part	Cd		Cu		Ni		Pb		Zn	
			平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
广东	6	叶	23.5	45.6	23.4	42.4	1.02	2.20	56.8	160	306	457
		茎	21.5	56.0	9.09	14.1	0.35	0.51	34.1	68.0	147	229
		根	12.7	35.8	45.1	155	1.17	2.19	237	511	301	677
广西	7	叶	24.5	41.9	17.3	24.4	1.50	3.28	40.3	127	454	761
		茎	19.3	35.4	9.67	13.0	0.74	1.41	46.4	158	243	547
		根	14.9	24.1	16.6	38.4	2.79	6.12	319	910	677	2625
贵州	5	叶	23.1	53.3	20.2	34.9	0.93	1.63	6.28	9.17	243	581
		茎	15.6	33.2	5.39	7.76	0.48	0.61	5.99	8.55	128	342
		根	17.4	37.2	13.5	26.6	2.44	4.25	17.2	36.6	521	1482
福建	1	叶	42.4	42.4	26.2	26.2	19.4	19.4	11.1	11.1	447	447
		茎	39.2	39.2	14.9	14.9	0.29	0.29	47.5	47.5	135	135
		根	20.1	20.1	17.4	17.4	3.75	3.75	292	292	732	732
总计 Total	19	叶	24.8	53.3	20.5	42.4	2.14	19.4	35.0	160	351	761
		茎	20.2	56.0	8.51	14.9	0.50	1.41	30.3	158	169	547
		根	15.1	37.2	24.8	155	2.24	6.12	212	910	520	2625

鬼针草中 Cd 含量均为干物质中 Cd 的含量

表 5 鬼针草的不同重金属富集系数(BCF)

Table 5 Enrichment factor (BCF) of *Bidens pilosa* L.

省份 Provinces	Cd		Cu		Ni		Pb		Zn	
	均值	最大值								
广东	0.58±0.49	1.50	0.08±0.06	0.16	0.07±0.04	0.13	0.02±0.03	0.09	0.16±0.12	0.39
广西	0.85±0.65	2.08	0.19±0.09	0.31	0.08±0.03	0.13	0.02±0.02	0.04	0.22±0.25	0.69
贵州	0.27±0.19	0.48	0.97±0.98	2.66	0.11±0.09	0.23	0.05±0.04	0.12	0.09±0.11	0.28
福建	0.59	0.59	0.12	0.12	0.76	0.76	0.00	0.00	0.05	0.05
总计 Total	0.60±0.50	2.08	0.36±0.60	2.66	0.12±0.16	0.76	0.03±0.03	0.12	0.16±0.17	0.69

表 6 鬼针草的转运系数(TF)

Table 6 Transport coefficient (TF) of *Bidens pilosa* L.

省份 Province	Cd		Cu		Ni		Pb		Zn	
	均值	最大值								
广东	2.84±2.36	7.49	1.17±0.87	2.54	1.19±0.94	2.76	0.42±0.48	1.25	1.68±1.03	3.18
广西	1.67±0.68	2.61	1.41±0.83	2.37	0.96±0.73	2.31	0.19±0.19	0.59	1.54±1.06	2.98
贵州	1.39±0.41	2.10	1.95±1.19	3.77	0.70±0.81	2.06	0.89±0.83	2.02	0.99±0.99	2.65
福建	2.11	2.11	1.50	1.50	5.17	5.17	0.04	0.04	0.61	0.61
总计 Total	1.99±1.46	7.49	1.48±0.92	3.77	1.19±1.24	5.17	0.44±0.57	2.02	1.39±1.00	3.18

## 2.2 盆栽试验中鬼针草对 Cd 的耐性及富集潜力

利用 Cd 污染原土进行盆栽试验,鬼针草成熟后采集土壤和鬼针草样品,对照组(CK),T1,T2 根际土壤 Cd 全量均值分别为 0.37,2.57,12.4 mg/kg, DTPA 浸提 Cd 含量分别为 0.21,1.94,10.50 mg/kg。处理组 pH 均表现弱酸性(表 7)。经相关性检验发现土壤 Cd 全量与有效态 Cd 在 0.01 水平上显著正相关,而 pH 与有效态 Cd 和全量 Cd 在 0.01 水平上显著负相关。

表 7 盆栽试验根际土壤 pH 和 Cd 含量

Table 7 Concentration of cadmium and pH in root soil of pot experiment

组别 Group	酸碱度 pH	平均值±标准差 Mean±Standard deviation/(mg/kg)	
		Cd	DTPA-Cd
CK	7.20	0.37±0.17	0.21±0.14
T1 Treatment1	6.78	2.57±0.33	1.94±0.10
T2 Treatment 2	6.55	12.4±0.8	10.5±0.5

采集盆栽中鬼针草地上部和地下部测定 Cd 含量,同时测得鬼针草株高和地上部干重(表 8),结果表明,不同处理组间其叶色均未发生明显变化,独立样本 *T* 检验表明,株高之间差异不显著,地上部干物质质量与对照组也没有显著差异,表现出较强的耐性。从富集特性(表 8)可以看出,低浓度 Cd 土壤处理(T1),鬼针草地上部 Cd 的富集系数为 4.70,转运系数 1.59,大于 1,高浓度 Cd 土壤处理(T2),其地上部 Cd 含量达到 43.1 mg/kg,但其地上部 Cd 富集系数为 3.51。差异性检验发现,试验组(T1,T2)地上部 Cd 含量是显著高于对照组(CK),T1,T2 组中鬼针草地上部富集系数显著高于 CK,转运系数差异不显著。相关性检验显示,鬼针草地上部 Cd 含量与土壤 Cd 全量和有效态 Cd 含量在 0.01 水平上有显著的相关性,3 个处理地上部的 Cd 富集系数都>1,且在 T1,CK 组中转运系数均>1,表明鬼针草转运重金属的能力较强。由此可见,鬼针草对 Cd 的富集特性符合超积累植物所具有的地上部重金属含量大于其根部重金属含量的基本特征,而且其地上部 Cd 富集系数也大于 1。因此,可以认为鬼针草对 Cd 具有一定的积累特性,可以将土壤中的 Cd 转移到植株体内。

表 8 盆栽试验中不同浓度下鬼针草的生长状况和对 Cd 的富集情况

Table 8 Height and aboveground biomass and Cd enrichment characteristics of *Bidens pilosa* L. under different concentration in pot experiment

组别 Group	地上部 Aboveground part/ (mg/kg)	地下部 Underground part/ (mg/kg)	富集系数 Bioaccumulation factor	转运系数 Translocation factor	株高 Plant height/m	干重 Dry weight/g
CK	0.60±0.29c	0.51±0.13c	1.66±0.75b	1.31±0.67a	1.1±0.12	9.45±0.13
T1 Treatment1	11.9±1.4b	7.76±1.49b	4.70±0.86a	1.59±0.40a	1.2±0.08	10.5±0.20
T2 Treatment 2	43.1±6.3a	65.3±25.8a	3.51±0.63a	0.73±0.29a	1.1±0.13	9.35±0.13

## 2.3 田间试验鬼针草对 Cd 污染土壤的去除率

### 2.3.1 试验田土壤 Cd 含量特征

田间试验小区土壤 Cd 含量特征见表 9。可以看出,试验小区土壤 pH 呈弱酸性,不同试验小区种植的修复植物不同,小区 1,2,3 的土壤 Cd 含量分别为 2.66,4.54,4.04 mg/kg。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)规定的筛选值,各小区单因子污染指数分别 8.43,15.1 和 13.5,污染区超筛选值比例为 100%,管制值为 3 mg/kg,小区 1 超管制值的比例为 10%。相关性检验显示,有效态和全量 Cd 在 0.01 水平上显著性相关。

表 9 田间试验区土壤 Cd 含量特征

Table 9 Concentration of Cd in soil in field test area

试验区 Test site	植物种类 Species	样本数 Sample	酸碱度 pH	Cd	有效态 Cd Available form Cd/(mg/kg)	筛选值 Filter values/ (mg/kg)	单因子污染指数 Single factor index method
小区 1 Test 1	鬼针草	10	6.45	2.66±0.48	1.74±0.47a	0.3	8.43±2.13
小区 2 Test 2	籽粒苋	2	6.46	4.54±1.02	3.34±0.87a	0.3	15.1±3.4
小区 3 Test 3	八宝景天	1	6.61	4.04	2.47a	0.3	13.48

### 2.3.2 试验田鬼针草地上部对污染农田 Cd 去除率

对 4 个小区种植的修复植物进采集,测定地上部 Cd 含量见表 10。鬼针草地上部 Cd 含量均值为 10.9 mg/kg,最大值为 14.3 mg/kg,籽粒菟为 8.48 mg/kg,八宝景天为 10.5 mg/kg,鬼针草地上部富集系数为 4.16,与籽粒菟和八宝景天没有显著的差异。

采集植物时,通过随机划定的数个 4 m<sup>2</sup>小区,收获全部植物后,称重,得出 4 m<sup>2</sup>小区的鬼针草生物量均值为 18.0 kg,最大值为 19.5 kg,测定得出鬼针草的含水率为 72.0%(表 11)。由此算得每公顷地鬼针草的地上部生物量(鲜重)大约为 45000 kg(18.0 kg÷4 m<sup>2</sup>×10000 m<sup>2</sup>=45000 kg),每公顷最大生物量(鲜重)约为 48750 kg,由此可以得出一公顷地每种一茬鬼针草,通过鬼针草可以带走土壤中重金属 Cd 的量约为 137.3 g(45000 kg×0.28×10.9 mg/kg×1000≈137.3 g),最大值为 195.1g,故每公顷种植一茬带走土壤中 Cd 约为 137.3—195.1 g。利用相同方法,种植籽粒菟和八宝景天种植一茬可以带走土壤中的 Cd 分别为 82.5—194.0 g 和 70.2—123.3 g。而小区 1 土壤 Cd 为 2.66 mg/kg,又考虑到农田中耕作层最有效的部分为 0—10 cm,,那么每公顷农田表层土壤(0—10 cm)所含的重金属 Cd 约为 3192 g(10000 m<sup>2</sup>×10 cm×1.2 g/cm<sup>-3</sup>×2.66 mg/kg≈3192 g)。每公顷地每种一茬鬼针草可以带走污染区土壤中的 4.3%—6.2%的 Cd,即去除率为 4.3%—6.2%(137.34 g÷3192 g≈4.3%)。

表 10 田间试验区植物地上部 Cd 含量和富集系数

Table 10 Enrichment characteristics and Cd content of the aboveground part of *Bidens pilosa* L. in the field test area

植物类型 Species	地上部 Cd 含量/(mg/kg) Cd content of aboveground part			富集系数 Bioaccumulation factor	
	<i>n</i>	均值	最大值	均值	最大值
	鬼针草 <i>B. pilosa</i> L.	10	10.9±2.7a	14.3	4.16±1.06b
籽粒菟 <i>A. hybridus</i> L.	2	8.48±0.74a	9.01	1.90±0.26b	2.08
八宝景天 <i>H. erythrostictum</i> (Miq.) H. Ohba	1	10.5a	10.5	2.60b	2.60

表 11 田间试验植物生物量

Table 11 Dry matter quality of the aboveground part of *Bidens pilosa* L. in the field test area

植物类型 Species	含水量/% Water content	项目 Item	平均值 Mean	极大值 Maximum
鬼针草 <i>B. pilosa</i> L.	72.0	地上部生物量(kg/hm <sup>2</sup> )	45000	48750
		1 茬 Cd 去除量(g/hm <sup>2</sup> )	137.3	195.1
籽粒菟 <i>A. hybridus</i> L.	70.1	地上部生物量(kg/hm <sup>2</sup> )	32443	71784
		1 茬 Cd 去除量(g/hm <sup>2</sup> )	82.5	194.0
八宝景天 <i>H. erythrostictum</i> (Miq.) H. Ohba	75.1	地上部生物量(kg/hm <sup>2</sup> )	26776	46971
		1 茬 Cd 去除量(g/hm <sup>2</sup> )	70.2	123.3

产量为鲜重时重量

### 3 讨论

农田 Cd 污染修复技术中植物修复因其无二次污染、修复彻底的特点成为研究的热点用<sup>[26-27]</sup>。其中最关键和重要的是修复植物的选择<sup>[24]</sup>,尽管目前已有 Cd 的超富集植物被发现,但植物修复仍然不够成熟,大多植物仍停留在实验室的阶段<sup>[24, 28-29]</sup>。农田重金属污染的修复效率还与地域,气候,土壤等因素有关,因此在田间试验结果可以对实际的工程修复措施提供较好的科学依据。对于不同地区的 Cd 污染农田的修复,找到合适的修复植物较为关键。目前已经发现的景天属(东南景天、八宝景天)植物抵抗恶劣天气的能力较弱,本研究中在田间试验种植的八宝景天地上部 Cd 含量没有表现明显的优势,田间管理较为复杂。印度芥菜<sup>[11]</sup>、宝山莴菜<sup>[10]</sup>等具有很好的 Cd 富集能力,但其生物量较小,故在实际的工程应用中也无法推广。商陆,龙葵,青葙等都还在实验室阶段,距离推广还有一段距离。杂草特别是农田杂草是一类人与自然选择双重压力下产生

的高度进化的植物类群,与作物相比,杂草的抗逆境能力较强,经过长期的自然进化和人工选择,具有广泛的适应性和顽强的生命力,同时杂草也具有较强的争光,争水,争肥能力<sup>[13]</sup>。鬼针草作为一种田间杂草<sup>[30]</sup>,在较多的报道中<sup>[31-35]</sup>,鬼针草对 Cd 具有较好的富集能力。盆栽试验中土壤 Cd 含量显著低于野外调查中 Cd 的含量,且野外调查中不同生态型不同的土壤和生长环境都会影响鬼针草对 Cd 的富集。故在野外调查中富集系数可能会低于 1。研究区域为中亚热带季风区,热量高,雨量大,日照时间长,符合鬼针草的生长需求,因此理论上每年可以种 3 茬鬼针草,在不添加活化剂的情况下,每公顷种植 3 茬鬼针草的去除率为 12.9%—18.6%,估算出在污染区连续种植鬼针草约 5—7 年时间可以使得该片农田土壤恢复安全健康水平(农田土壤 Cd 含量小于筛选值(0.3 mg/kg),故使用鬼针草修复农田 Cd 污染具有较好的应用前景,故可以进一步的研究和推广,后期可以对鬼针草在不同 Cd 含量的污染农田中的修复潜力,添加活化剂来促进鬼针草对 Cd 的吸收<sup>[25]</sup>以及在田间管理部分(如研究不同时期收割)来提高修复效率,缩短修复年限。

#### 4 结论

(1)不同铅锌矿区生长的鬼针草叶片中 Cd 含量最大值为 53.3 mg/kg,不同矿区叶片中的 Cd 含量差异不显著,不同部位 Cd 含量表现为:叶片>茎>根。对 Cd 表现出稳定的积累特性,而对其他重金属没有表现出较强的富集能力。

(2)盆栽试验中,在低浓度 Cd 土壤处理(T1)中,鬼针草地上部 Cd 的富集系数为 4.70,转运系数 1.59,大于 1,在高浓度 Cd 土壤处理(T2)中,其地上部 Cd 积累量达到 43.1 mg/kg,但其地上部 Cd 富集系数为 3.51。各处理中鬼针草地上部的 Cd 富集系数均>1,对 Cd 具有较强的富集能力。

(3)污染区鬼针草中地上部 Cd 含量均值为 10.9 mg/kg,富集系数为 4.16,而每公顷地鬼针草的地上部生物量均值(鲜重)为 45000 kg,每公顷最大生物量(鲜重)为 48750 kg,使用鬼针草修复 Cd 污染土壤每公顷地种植三茬鬼针草的去除率为 12.9%—18.6%。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Chen H P, Yang X P, Wang P, Wang Z X, Li M, Zhao F J. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: A case study in Xiangtan, southern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 271-277.
- [ 2 ] Philipp R A, Hughes A. Health risks from exposure to cadmium in soil. *Occupational & Environmental Medicine*, 2000, 57(9): 647-648.
- [ 3 ] 仲灿,葛晓敏,倪云,唐罗忠.植物对土壤 Cd、Pb 污染的修复与抗性机理研究进展. *世界林业研究*, 2017, 30(1): 37-43.
- [ 4 ] 仇荣亮,汤涛涛,方晓航,Chaney R L, Li Y M, Angle S, 刘雯,曾晓雯.重金属污染土壤的植物修复及其机理研究(英文). *中山大学学报:自然科学版*, 2004, 43(6): 144-149.
- [ 5 ] 姜理英,杨肖娥,石伟勇,叶正钱.植物修复技术中有关土壤重金属活化机制的研究进展. *土壤通报*, 2003, 34(2): 154-157.
- [ 6 ] 骆永明.金属污染土壤的植物修复. *土壤*, 1999, (5): 261-265, 280-280.
- [ 7 ] 王庆仁,崔岩山,董艺婷.植物修复——重金属污染土壤整治有效途径. *生态学报*, 2001, 21(2): 326-331.
- [ 8 ] 龙新究,王艳红,刘洪彦.不同生态型东南景天对土壤中 Cd 的生长反应及吸收积累的差异性. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 168-175.
- [ 9 ] 张杰.超积累植物东南景天 Cd 耐性和积累的分子机制[D].杭州:浙江大学,2015.
- [ 10 ] 刘威,束文圣,蓝崇钰.宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物. *科学通报*, 2003, 48(19): 2046-2049.
- [ 11 ] 俞雅君,何琳燕.印度芥菜在重金属污染土壤植物修复中的作用及其机理. *安徽农业科学*, 2010, 38(24): 13337-13339, 13377-13377.
- [ 12 ] 孟祥颖,李向高,罗维莹,李晶.鬼针草的研究概况. *中药材*, 2001, 24(6): 452-454.
- [ 13 ] 魏树和,杨传杰,周启星.三叶鬼针草等 7 种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征. *环境科学*, 2008, 29(10): 2912-2918.
- [ 14 ] 黄科文,廖明安,林立金.2 种生态型三叶鬼针草的不同株数混种比例对其镉累积的影响. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(5): 753-759.
- [ 15 ] 刘沙沙,李兵,冯翔,冯园,李志娟,郭林,杨坡,张婷婷.3 种植物对镉污染土壤修复的试验研究. *中国农学通报*, 2018, 34(22): 103-108.
- [ 16 ] 邹春萍,陈金峰,孙映波,张佩霞,李妙汉,梅瑜.白花鬼针草对镉的富集与迁移特性试验研究. *南方农业*, 2015, 9(7): 23-26, 42-42.
- [ 17 ] 张元培,吴颖,石仲.湖北襄阳土壤 Cd、Pb 污染植物修复技术研究. *资源环境与工程*, 2017, 31(6): 713-716.
- [ 18 ] 张云霞,宋波,杨子杰,王佛鹏,周浪,周子阳,宾娟.广西某铅锌矿影响区农田土壤重金属污染特征及修复策略. *农业环境科学学报*, 2018, 37(2): 239-249.

- [19] 李强, 文唤成, 胡彩荣. 土壤 pH 值的测定国际国内方法差异研究. 土壤, 2007, 39(3): 488-491.
- [20] Lorentzen E M L, Kingston S. Comparison of microwave-assisted and conventional leaching using EPA method 3050B. Analytical Chemistry, 1996, 68(24): 4316-4320.
- [21] Church C, Spargo J, Fishel S. Strong acid extraction methods for "total phosphorus" in soils: EPA method 3050B and EPA method 3051. Agricultural & Environmental Letters, 2017, 2(1): 160037.
- [22] 贺建群, 许嘉琳, 杨居荣, 刘虹. 土壤中有效态 Cd、Cu、Zn、Pb 提取剂的选择. 农业环境保护, 1994, 13(6): 246-251.
- [23] 靳霞, 王莉. M3 法测定土壤有效态 Cd、Cr、Pb 和 Ni. 中国环境监测, 2013, 29(4): 116-124.
- [24] 杨姝, 贾乐, 毕玉芬, 湛方栋, 陈建军, 李博, 祖艳群, 李元. 7 种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 222-228.
- [25] 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹. 广东西江流域土壤铅空间分布与污染评价. 环境科学, 2018, 39(5): 2446-245.
- [26] 韩存亮, 黄泽宏, 肖荣波, 邓一荣, 余晓华. 粤北某矿区周边镉锌污染稻田土壤田间植物修复研究. 生态环境学报, 2018, 27(1): 158-165.
- [27] Alaboudi K A, Ahmed B, Brodie G. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. Annals of Agricultural Sciences, 2018, 63(1): 123-127.
- [28] 邓玉兰. 镉富集植物绿穗苋(*Amaranthus hybridus* L.)根际特征及根系耐性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- [29] 贾永霞, 李弦, 罗弦, 蒲玉琳, 李云, 张世熔. 细叶美女樱(*Verbena Tenera* Spreng)对镉的耐性和富集特征研究. 生态环境学报, 2016, 25(6): 1054-1060.
- [30] 闫静, 张晓亚, 陈雪, 王月, 张凤娟, 万方浩. 三叶鬼针草与不同本地植物竞争对土壤微生物和土壤养分的影响. 生物多样性, 2016, 24(12): 1381-1389.
- [31] 湛金吾. 三叶鬼针草(*Bidens pilosa* L.)对重金属 Cd、Pb 胁迫的响应与修复潜能研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [32] 韩少华, 黄沈发, 唐浩, 王敏, 吴健. 3 种植物对 Cd 污染农田土壤的修复效果比较试验研究. 环境污染与防治, 2012, 34(12): 22-25, 30-30.
- [33] 赖彩秀. 三种有机酸对两种植物修复 Cd/Zn 污染土壤的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [34] 孙约兵, 周启星, 王林, 刘维涛, 刘睿. 三叶鬼针草幼苗对镉污染的耐性及其吸收积累特征研究. 环境科学, 2009, 30(10): 3028-3035.
- [35] 王素娟. 龙葵、鬼针草对 Cd、Pb 污染土壤的响应[D]. 南宁: 广西大学, 2009.