

## 3种植物对Cd污染农田土壤的修复效果比较试验研究\*

韩少华<sup>1</sup> 黄沈发<sup>1,2#</sup> 唐浩<sup>2</sup> 王敏<sup>2</sup> 吴健<sup>2</sup>

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘要** 通过盆栽试验研究了3种植物三叶鬼针草(*Bidens pilosa* L.)、紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)、中华景天(*Sedum polytrichoides*)对上海地区2种质量浓度(1.2、12.0 mg/kg)Cd污染农田土壤的修复效果,以探索其在上海地区Cd污染农田土壤修复中应用的可行性。结果表明:2种浓度下,三叶鬼针草对土壤Cd去除效果均最佳,1.2 mg/kg处理下盆中土壤Cd质量浓度由原来的1.249 9 mg/kg下降到0.861 7 mg/kg,降低0.388 2 mg/kg,Cd去除率为31.06%;12.0 mg/kg处理下三叶鬼针草盆中土壤Cd质量浓度由原来的12.033 2 mg/kg下降到10.020 6 mg/kg,降低2.012 6 mg/kg,Cd去除率为16.73%;紫茉莉和中华景天相比较而言,修复效果均较差。在2种浓度下,3种植物地上部分生物量排序均为三叶鬼针草>中华景天>紫茉莉。因此,建议将三叶鬼针草作为上海地区Cd污染农田土壤修复的优选植物。

**关键词** Cd 植物修复 三叶鬼针草 紫茉莉 中华景天

**A comparative study on the performance of 3 plants for remediation of cadmium contaminated farmland soil** HAN Shaohua<sup>1</sup>, HUANG Shenfa<sup>1,2</sup>, TANG Hao<sup>2</sup>, WANG Min<sup>2</sup>, WU Jian<sup>2</sup>. (1. School of Environmental Sciences and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233)

**Abstract:** Series of pot experiments were conducted to remediate cadmium contaminated farmland soil by 3 species of plants (*Bidens pilosa* L., *Mirabilis jalapa* and *Sedum polytrichoides*). Two levels cadmium stress of 1.2 mg/kg and 12.0 mg/kg were set in experiments. The feasibility of 3 plants for remediation the cadmium contaminated soil in Shanghai area was discussed. Results showed that *Bidens pilosa* L. presented best performance of cadmium removal under both level of cadmium stress. Under low cadmium stress, the cadmium concentration in pot of *Bidens pilosa* L. fell from 1.249 9 mg/kg to 0.861 7 mg/kg, average cadmium removal was 0.388 2 mg/kg given the Cd removal rate of 31.06%. Under high cadmium stress, the cadmium concentration in soil fell from 12.033 2 mg/kg to 10.020 6 mg/kg, the average cadmium removal was 2.012 6 mg/kg given the Cd removal rate of 16.73%. Compared with *Bidens pilosa* L., the performance of *Mirabilis jalapa* and *Sedum polytrichoides* for remediation of cadmium contaminated soil was relative poor. The aboveground biomass of 3 plants followed the order of *Bidens pilosa* L. > *Sedum polytrichoides* > *Mirabilis jalapa*. So, *Bidens pilosa* L. was recommended as optimized plant for repairing the cadmium contaminated farmland soils in Shanghai area.

**Keywords:** Cd; phytoremediation; *Bidens pilosa* L.; *Mirabilis jalapa*; *Sedum polytrichoides*

随着经济社会的高速发展和城市化进程的不断加快,我国土壤环境重金属污染态势日益严峻<sup>[1]</sup>。在所有污染土壤的重金属元素中,Cd以移动性大、毒性高、污染面积大被称为“五毒之首”。有研究表明,全国蔬菜土壤重金属Cd含量超标的问题最为突出<sup>[2]</sup>,长江流域、珠江流域、沿海经济带、松花江流域、辽河流域出现贯穿全流域的以Cd为主的区域性异常。相对其他重金属而言,Cd更易于被植物根系吸收而迁移,然后通过食物链进入

人体,从而对人类生命健康构成威胁,所以Cd污染农田土壤的修复问题引起了全世界的高度重视和深入研究。

植物修复最早由美国科学家CHANEY等<sup>[3]</sup>于1983年提出,其核心是利用超富集植物吸收、富集、降解或固定土壤中重金属,以实现降低或消除污染的生物技术。由于这一技术普遍被认为具有物理、化学修复方法所无法比拟的费用低廉、不破坏土壤结构、不造成地下水二次污染等优势,已成为世界环

第一作者:韩少华,男,1986年生,硕士研究生,研究方向为土壤污染防治。#通讯作者。

\* 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(No. 200903056)。

境修复技术与工程科学的热点和前沿领域之一。植物修复的关键是选育出对污染元素有较强吸收能力的超富集植物。

超富集植物应具有 4 个基本标准:(1)临界含量标准,即植物茎或叶中重金属含量要大于一定的临界值,目前广泛采用的参考值是 Zn、Mn 均为 10 000 mg/kg, Pb、As、Cu、Ni 均为 1 000 mg/kg, Cd 为 100 mg/kg, Hg 为 10 mg/kg;(2)富集系数标准,即植物地上部富集系数大于 1.0;(3)转移系数标准,即植物地上部(主要是指茎或叶)重金属含量大于其根部重金属含量;(4)耐性标准,即植物对重金属具有较强的耐性。

迄今为止, Cd 的超富集植物已发现有 15 种, 国外物种有天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)<sup>[4-5]</sup>、圆叶遏蓝菜(*Thlaspi rotundifolium*)<sup>[6]</sup>、巴丽芥菜(*Cardaminosishalleri*)<sup>[7]</sup>、*Thlaspi praecox*<sup>[8-9]</sup>。而在我国, Cd 超富集植物的筛选和确认研究也取得显著成就, 如宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)<sup>[10]</sup>、东南景天(*Sedum alfredii* H.)<sup>[11]</sup>、圆锥南芥(*Arabis paniculata* L.)<sup>[12]</sup>、龙葵(*Solanum nigrum* L.)<sup>[13-14]</sup>、球果薺菜(*Rorippa globosa*)<sup>[15]</sup>、商陆(*Phytolacca acinosa* Roxb)<sup>[16]</sup>、紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)<sup>[17]</sup>、水葱(*Scirpus tabernaemontani* G.)<sup>[18]</sup>、红苋菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)<sup>[19]</sup>、三叶鬼针草(*Bidens pilosa* L.)<sup>[20]</sup>、籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)<sup>[21]</sup>。

本研究针对上海地区农田土壤特性, 初步筛选出 3 种 Cd 超富集植物(或超富集植物同科同属本地物种)开展室内盆栽试验, 比较它们在重金属 Cd 胁迫下对土壤 Cd 的去除效果和生长情况, 探索其在上海地区 Cd 污染农田土壤修复中的可行性。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

土壤: 采自崇明岛未受污染农田表层土(0~20 cm), 土壤类型为轻中砂壤土, 土壤理化性质见表 1。

试剂: CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O(分析纯), 土壤人工暴露染毒用。

植物: 三叶鬼针草、紫茉莉、中华景天(*Sedum*

*polytrichoides*)。植物选择的理由: 三叶鬼针草是菊科, 属 1 年生草本植物, 是我国东北、华北、华东、西南等地主要农田杂草之一, 具有较强的争光、争水和争肥能力。紫茉莉是紫茉莉科, 属多年生草本花卉, 具有很好的观赏性, 并且在全国各地均有分布。三叶鬼针草和紫茉莉都是已经报道的对 Cd 有超富集效应的植物种类。中华景天是景天科, 属多年生草本植物, 是 Cd 超富集植物东南景天同科同属的本地物种。

塑料盆: 盆栽试验用, 直径 20 cm、高 25 cm, 并带有托盘, 每盆供试土壤 3.5 kg。

### 1.2 试验方法

本研究采用人工暴露染毒的试验方法, 染毒前先将自然土壤去除杂质。

染毒过程: 将自然土壤在温室中平摊, CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O 用去离子水配成母液(低浓度染毒用量 0.512 g, 高浓度染毒用量 5.118 g), 分 5 次倒入喷雾器中, 每倒入 1/5 母液, 向喷雾器中加入自来水约 5 L 稀释, 然后喷洒到自然土壤中, 边喷洒边搅拌, 染毒结束后, 将供试土壤在温室中稳定 2 个星期, 以保证染毒均匀, 然后分盆。

### 1.3 试验设计

试验设置 3 种植物在 2 个浓度(分别为 1.2、12.0 mg/kg, 其中高浓度是借鉴荷兰土壤相关修复标准中 Cd 的干预值(达到或高于该值时即采取修复措施), 低浓度设定为高浓度的 1/10)染毒下考察。不同浓度下每种植物均设 5 组(以供不同生长时期采样), 每组 3 次重复。同时各浓度均设置不种植物的空白对照 5 组, 每组 3 次重复。

根据植物的不同生长特性, 紫茉莉直播, 最终定苗 3 株/盆。三叶鬼针草和中华景天均选择清洁土壤上培育的生长健壮、个体大小一致的幼苗移栽(3 株/盆)。

### 1.4 取样与测定

试验从 2011 年 4 月开始, 紫茉莉播种时间在 4 月初, 三叶鬼针草和中华景天移栽时间在 4 月中旬; 2 个月后开始采样, 之后每个月月中采样 1 次, 共 5 次。

植物样品: 将植物整株从土壤中移除, 根部用蒸馏水冲洗干净后烘干称量。

表 1 土壤理化性质  
Table 1 The physical and chemical properties of soil

项目	土壤 pH	有机质 <sup>1)</sup> /%	总氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /(mg·kg <sup>-1</sup> )	全 Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )
数值	7.5~8.2	1.2~1.8	43	68	<0.05

注: <sup>1)</sup>以质量分数计。

土壤样品:植物移除后再次将盆中土壤混合均匀,取土壤 50 g,测定土壤中 Cd 浓度。

土壤 Cd 测定方法:采用电感耦合等离子体发射光谱法。先将土壤样品进行前处理,去除植物根系等杂质,风干后研磨,过 80 目筛,取一定量土壤样品加入消解液后使用微波消解仪直接消解,然后制备标准溶液,选择最佳分析谱线进行测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植物对 Cd 污染土壤的修复效果

#### 2.1.1 低浓度处理下 3 种植物的修复效果

低浓度处理下 3 种植物的修复效果见图 1。

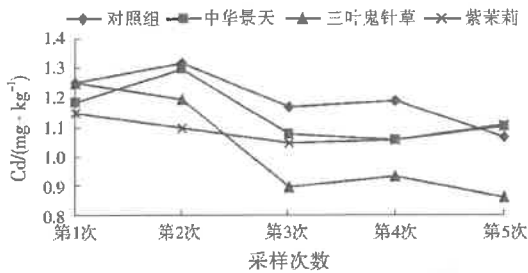


图 1 1.2 mg/kg 质量浓度下植物修复效果比较  
Fig. 1 The phytoremediation performance of 3 plants under 1.2 mg/kg of Cd stress

由图 1 可以看出,低浓度处理下,三叶鬼针草盆中 Cd 浓度下降最为显著,土壤中 Cd 由原来的 1.249 9 mg/kg 下降到 0.861 7 mg/kg,降低 0.388 2 mg/kg, Cd 浓度下降最快的时间在第 2 次和第 3 次采样之间即 8 月中旬至 9 月中旬,这段时间刚好是三叶鬼针草生长旺盛时期;紫茉莉盆中 Cd 质量浓度由 1.146 7 mg/kg 下降到 1.042 5 mg/kg,降低 0.104 2 mg/kg,说明紫茉莉对 Cd 的去除速度较为缓慢,土壤 Cd 浓度在第 5 次采样时有上升趋势,可能由于紫茉莉枝叶在土壤中腐化重新将 Cd 释放所致;中华景天由 1.294 9 mg/kg 下降到 1.056 5 mg/kg,降低 0.238 4 mg/kg,中华景天与紫茉莉相似,对 Cd 去除速度较慢,且土壤 Cd 浓度有上升趋势。三叶鬼针草、紫茉莉、中华景天 3 种植物 Cd 的去除率分别为 31.06%、9.09%、18.41%;可见,三叶鬼针草对 Cd 的修复效果最佳,中华景天次之,紫茉莉最差。试验数据表明,紫茉莉、中华景天有向土壤中重新释放 Cd 的可能,不宜用来修复农田土壤 Cd 污染。对照组存在土壤 Cd 浓度降低的趋势,可能是浇水导致土壤中部分 Cd 淋失。

#### 2.1.2 高浓度处理下 3 种植物的修复效果

高浓度处理下 3 种植物的修复效果见图 2。

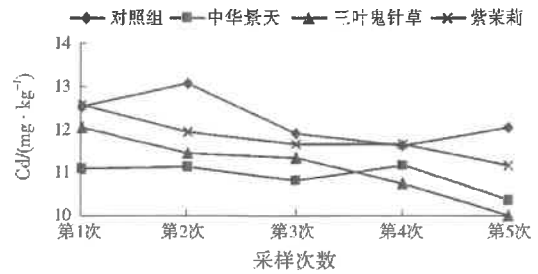


图 2 12.0 mg/kg 质量浓度下植物修复效果比较  
Fig. 2 The phytoremediation performance of 3 plants under 12.0 mg/kg of Cd stress

从图 2 可知,高浓度处理下,三叶鬼针草盆中土壤 Cd 浓度下降最为显著,土壤中 Cd 由原来的 12.033 2 mg/kg 下降到 10.020 6 mg/kg,降低 2.012 6 mg/kg,去除率为 16.73%;紫茉莉盆中 Cd 质量浓度则由 12.560 5 mg/kg 下降到 11.154 7 mg/kg,降低 1.405 8 mg/kg,去除率为 11.19%;中华景天盆中 Cd 质量浓度由 11.166 5 mg/kg 下降到 10.365 7 mg/kg,降低 0.800 8 mg/kg,去除率为 7.17%。对比分析表明,三叶鬼针草对 Cd 修复效果最佳,紫茉莉次之,中华景天最差。对照组第 2 次的 Cd 浓度测定值偏高,说明可能存在部分土壤染毒不够均匀;和低浓度处理一样,高浓度处理下对照组也存在 Cd 浓度下降的趋势,可能是浇水导致土壤中部分 Cd 淋失。

#### 2.1.3 分析讨论

通过 2 种浓度下 3 种植物对土壤 Cd 污染修复效果的比较表明,无论是低浓度还是高浓度处理下,三叶鬼针草的修复效果均最佳,且相对于低浓度处理而言,高浓度处理下三叶鬼针草对 Cd 的富集可能会受到影响。相比较而言,紫茉莉和中华景天修复效果均不够理想,不适合用来修复农田土壤中 Cd 污染;但在低浓度处理下,中华景天对 Cd 的去除率较紫茉莉高,而在高浓度处理下,紫茉莉对 Cd 的去除率较中华景天高。因此,建议将三叶鬼针草作为上海地区 Cd 污染农田土壤修复的优选植物。

### 2.2 不同浓度下 3 种植物的生长情况

低浓度处理下 3 种植物地上部分生物量见图 3。

从图 3 可知,低浓度处理下,三叶鬼针草和紫茉莉地上部分生物量随着采样次数的增加而先增大后减小,并都在第 4 次采样时达到最大值,分别为 10.114、2.934 g;中华景天是常绿植物,整个采样过程中生物量变化幅度较小(3.190~5.681 g),在第 3 次采样时生物量出现最小值可能是由于前期浇水与其他两种植物相同所致,试验过程中发现该植物耐

旱忌涝,所以与三叶鬼针草和紫茉莉同样的土壤持水量可能会使中华景天的生长受到一定影响。3种植物地上部分生物量排序为三叶鬼针草>中华景天>紫茉莉。

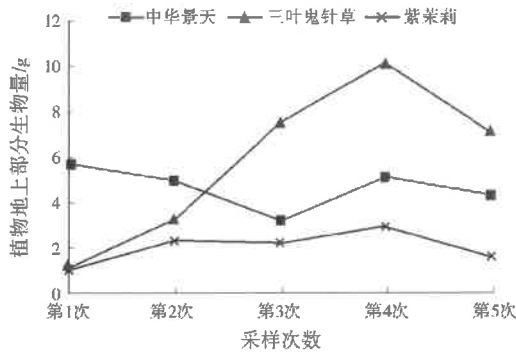


图3 1.2 mg/kg质量浓度下植物地上部分生物量  
Fig. 3 The aboveground biomass of 3 plants under 1.2 mg/kg of Cd stress

高浓度处理下 3 种植物地上部分生物量见图 4。

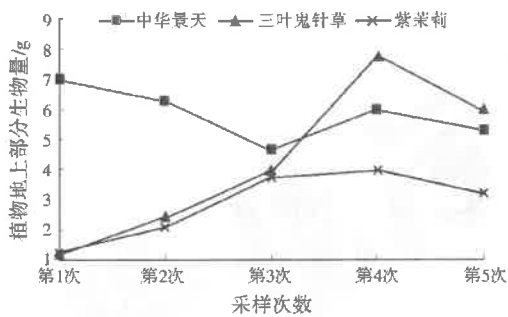


图4 12.0 mg/kg质量浓度下植物地上部分生物量  
Fig. 4 The aboveground biomass of 3 plants under 12.0 mg/kg of Cd stress

从图 4 可知,高浓度处理下,3种植物地上部分生物量变化特点均与低浓度处理下表现一致,即三叶鬼针草和紫茉莉地上部分生物量随着采样次数的增加而先增大后减小,第 4 次采样时生物量最大,分别为 7.782、3.968 g;中华景天地上部分生物量先减小后增大,可能的原因与低浓度处理相同,生物量变化范围为 4.657~6.978 g。3种植物地上部分生物量排序为三叶鬼针草>中华景天>紫茉莉。

### 3 结论与建议

(1) 低浓度处理下,三叶鬼针草对 Cd 修复效果最佳,土壤 Cd 质量浓度由原来的 1.249 9 mg/kg 下降到 0.861 7 mg/kg,降低 0.388 2 mg/kg,对 Cd 的去除率高达 31.06%;紫茉莉、中华景天效果均较差,Cd 去除率分别为 9.09%、18.41%。

(2) 高浓度处理下,三叶鬼针草对 Cd 修复效果最佳,土壤 Cd 质量浓度由原来的 12.033 2 mg/kg

下降到 10.020 6 mg/kg,降低 2.012 6 mg/kg,对 Cd 的去除率为 16.73%;紫茉莉、中华景天效果均较差,Cd 去除率分别为 11.19%、7.17%。

(3) 低浓度处理下,三叶鬼针草、紫茉莉和中华景天地上部分生物量最大值分别为 10.114、2.934、5.681 g;3种植物地上部分生物量排序为三叶鬼针草>中华景天>紫茉莉。高浓度处理下,三叶鬼针草、紫茉莉和中华景天地上部分生物量最大值分别为 7.782、3.968、6.978 g;3种植物地上部分生物量排序为三叶鬼针草>中华景天>紫茉莉。

在本试验设定的条件下,三叶鬼针草表现出对 Cd 污染农田土壤良好的修复效果,且生物量最大,建议将三叶鬼针草作为上海地区 Cd 污染农田土壤修复的优选植物。

### 参考文献:

- [1] 骆永明. 中国土壤环境污染态势及预防、控制和修复策略[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(12): 27-31.
- [2] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2507-2517.
- [3] CHANEY R L, MINNIE M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. Current Opinion in Biotechnology, 1997, 8(3): 279-284.
- [4] PERRONNET K, SCHWARTZ C, MORE J L. Distribution of cadmium and zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown on multicontaminated soil; distribution of metals in *Thlaspi caerulescens*[J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 19-25.
- [5] BROWN S L, CHANEY R L, ANGLE J S, et al. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc and cadmium-contaminated soil[J]. J. Environ. Qual., 1994, 23(6): 1151-1157.
- [6] WENZEL W W, JOCKWER F. Accumulator of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps[J]. Environ. Pollut., 1999, 104(1): 145-155.
- [7] DAHMANI MULLER H, VAN OORT F, GÉLIE B, et al. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter[J]. Environ. Pollut., 2000, 109(2): 231-238.
- [8] VOGEL MIKUS K, PONGRAC P, KUMP P, et al. Localisation and quantification of elements within seeds of Cd/Zn hyperaccumulator *Thlaspi praecox* by micro-PIXE[J]. Environ. Pollut., 2007, 147(1): 50-59.
- [9] TOLRÁ R, PONGRAC P, POSCHENRIEDER C, et al. Distinctive effects of cadmium on glucosinolate profiles in Cd hyperaccumulator *Thlaspi praecox* and non-hyperaccumulator *Thlaspi arvense*[J]. Plant and Soil, 2006, 288(1): 333-341.
- [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[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2046-2049.
- [11] YANG Xiaoe, LONG Xinxian, YE Haibo, et al. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance)[J]. Plant and Soil, 2004, 259(12): 181-189.

(下转第 30 页)