

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

魏树和¹, 杨传杰^{1,2}, 周启星^{1,3*}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘要:超富集植物是植物修复重金属污染土壤技术最主要的内容, 而超富集植物的筛选是植物修复技术的难点和重点. 采用室外盆栽试验的方法, 研究了我国北方较常见的 7 种菊科植物对重金属的超富集特征. 盆栽筛选试验表明, 蒲公英和三叶鬼针草对 Cd 单一及 Cd-Pb-Cu-Zn 复合污染的耐性较强, 植物地上部镉含量分别高于其根部镉含量, 地上部镉的富集系数也均大于 1, 具备了镉超富集植物的基本特征. 以这 2 种植物为试材的盆栽浓度梯度试验表明, 当土壤中 Cd 投加浓度分别为 25、50、100 mg·kg⁻¹ 时, 三叶鬼针草地上部生物量没有明显下降 ($p < 0.05$), Cd 含量均大于其根部 Cd 含量, 且其叶中 Cd 含量均大于 100 mg·kg⁻¹, 达到了 Cd 超富集植物应达到的临界含量标准. 而蒲公英在这 3 个处理条件下, 其叶片中 Cd 含量均没有超过 100 mg·kg⁻¹. 可见只有三叶鬼针草完全具有镉超富集植物的基本特征, 是镉超富集植物.

关键词:三叶鬼针草; 重金属; 超富集特征

中图分类号: X506 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2912-07

Hyperaccumulative Characteristics of 7 Widely Distributing Weed Species in Composite Family Especially *Bidens pilosa* to Heavy Metals

WEI Shu-he¹, YANG Chuan-jie^{1,2}, ZHOU Qi-xing^{1,3}

(1. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Hyperaccumulator is the main point of phytoremediating contaminated soils by heavy metals, and the identification of hyperaccumulator is still the difficult and key step of phytoremediation. The outdoor pot-culture experiment was used to study the hyperaccumulative characteristics of 7 widely distributing weed species in Northeast of China to heavy metals. The results in screening experiment showed that *Taraxacum mongolicum* and *Bidens pilosa* indicated strong tolerance to Cd single and Cd-Pb-Cu-Zn combined pollution, their Cd concentration in shoot were higher than that in roots, and the Cd enhancement factors (ratio of heavy metal concentration in shoot to that in soil) in shoots were greater than 1 too, which displayed that the two plants were with Cd hyperaccumulative characteristics. In concentration gradient experiment, Cd concentration in leaves of *B. pilosa* were all greater than 100 mg·kg⁻¹ the minimum of Cd-hyperaccumulator should have under the conditions of 25, 50, 100 mg·kg⁻¹ Cd added. Meanwhile, the shoot biomass of *B. pilosa* did not reduce significantly ($p < 0.05$), Cd concentration in its shoots were higher than those in roots. But for *T. mongolicum*, Cd concentration in its shoots were not greater than 100 mg·kg⁻¹ in any treatment. Thus, only *B. pilosa* can be regarded as Cd-hyperaccumulator.

Key words: *Bidens pilosa*; heavy metal; hyperaccumulative characteristic

植物修复是 20 世纪前期发展起来的一项污染环境清洁技术, 其最具代表性的修复技术主要是指利用重金属超富集植物的超量积累作用去除污染环境中的重金属^[1]. 超富集植物(Hyperaccumulator)是指能超量积累一种或同时积累几种重金属元素的植物. 现一般认为超富集植物最显著的特征是临界含量特征, 即植物(主要是茎或叶)富集重金属的临界含量分别为 Zn、Mn 10 000 mg·kg⁻¹, Cd 100 mg·kg⁻¹, Au 1 mg·kg⁻¹, Pb、Cu、Ni、Co、As 均为 1 000 mg·kg⁻¹^[2]; 其次是转移特征, 植物地上部重金属含量大于其根部重金属含量^[2,3]; 此外还有耐性特征

和富集系数特征. 耐性特征是指植物对重金属具有较强的耐性. 对于自然生长在污染状态下的植物来说, 是指植物的生长从长相来看没有表现出明显的毒害症状. 对于人为控制试验条件下的植物来说, 是指与对照相比, 植物地上部生物量没有下降, 至少当土壤中重金属浓度高到足以使植物地上部重金

收稿日期: 2007-09-29; 修订日期: 2007-12-18
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z386); 中俄自然资源与生态环境联合研究中心项目
作者简介: 魏树和(1970~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为污染土壤的植物修复, E-mail: shuhewei@yahoo.com.cn
* 通讯联系人, E-mail: zhouqx@iae.ac.cn

属含量达到超富集植物应达到的临界含量标准时地上部生物量没有下降^[3~5];富集系数特征是指植物地上部富集系数 >1 ,至少当土壤中重金属浓度与超富集植物应达到的临界含量标准相当时植物地上部富集系数 >1 ^[3~5].尽管目前已报道的超富集植物有几百种之多^[6],但植物修复技术还不成熟,目前大多还只处于试验阶段.因此,超富集植物的筛选仍然是植物修复研究的重点和难点,通过各种方式筛选超富集植物,即使只筛选到具有超富集植物的某些特征的植物,对于植物修复种质资源库的建立乃至理想超富集植物的构建都可能具有重要意义^[1].

杂草特别是农田杂草是一类人为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,这些特性可能使杂草对重金属有较强的耐性.同时杂草也具有较强的争光、争水、争肥能力,吸收能力很强,这种较强的吸收特性可能利于杂草对重金属的积累.因此,杂草可能是超富集植物的丰富资源.又由于杂草具有耐不良环境、生长迅速、繁殖能力强,以及在生长条件改善条件下生物量急剧提高等特点,可以弥补现有修复植物的某些缺点和不足,而且杂草植物具有某些栽培性状,在修复实践容易管理.因此,总体来看杂草对于植物修复来说是一类较理想的植物资源^[7].鉴于上述原因,本研究以我国东北 7 种最常见的菊科杂草植物为试材,分析其对重金属的超富集特征.

1 材料与方法

1.1 筛选试验

试验于中国科学院沈阳生态实验站内进行,该站地理位置为东经 $123^{\circ}41'$ 、北纬 $41^{\circ}31'$,海拔约 50 m,周围没有污染源,是重金属未污染区.该站地处松辽平原南部的中心地带,距沈阳市区约 35 km,属温带半湿润大陆性气候,年平均温度 $5\sim9^{\circ}\text{C}$, $>10^{\circ}\text{C}$ 的年活动积温 $3\,100\sim3\,400^{\circ}\text{C}$,年总辐射量 $520\sim544\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,无霜期 $127\sim164\text{ d}$,年降水量 $650\sim700\text{ mm}$.盆栽试验所用土壤均采自该站表土($0\sim20\text{ cm}$),土壤类型为草甸棕壤.参试的 7 种菊科杂草植物均取自生态站,这 7 种植物在该生态站是优势杂草植物种,也是东北地区较常见的杂草植物^[8,9],即蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、三叶鬼针草(*Bidens pilosa*)、菊芋(*Helianthus tuberosus*)、三裂叶豚

草(*Ambrosia trifida*)、苣荬菜(*Sonchus brachyotus*)、泥胡菜(*Hemistepta lyrata*)和野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*).

参照文献[10]设计了 Cd 单一污染(T1)和 Cd-Pb-Cu-Zn 复合污染(T2)2 个处理,其中 Cd 单一污染处理投加浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,复合污染处理中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的投加浓度分别依次为 10 、 $1\,000$ 、 400 和 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,相当于国家土壤环境质量标准三级标准值的 10 、 2 、 1 和 2 倍,这一污染水平与辽宁地区重金属污染状况和水平^[11~14]大体相符.所投加的重金属形态分别为: $\text{CdCl}_2\cdot2.5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4\cdot5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{ZnSO}_4\cdot7\text{H}_2\text{O}$,均为分析纯试剂.与此同时,以不投加重金属的处理为对照(CK1).

于杂草开始生长季节,将供试土壤风干并过 4 mm 筛后,与一定量的重金属混合,装入塑料盆($\phi=20\text{ cm}$, $H=15\text{ cm}$)中,平衡 2 周后,选择生长一致的各种杂草幼苗分别移栽入 CK1、T1 和 T2 处理的盆中.根据植株大小,每盆各栽 $1\sim6$ 棵苗,重复 3 次,各重复间栽入的苗数一致.露天栽培,无遮雨设施.根据盆缺水情况,不定期浇自来水(水中未检出 Cd、Pb、Cu、Zn),使土壤含水量保持在田间持水量的 80% 左右.待植物成熟后或下霜之前,收获杂草.

1.2 浓度梯度试验

盆栽初步筛选试验结果表明,蒲公英和三叶鬼针草是 Cd 超富集特征植物,但可能因试验中投加的重金属浓度 $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 较低,难以使植物对 Cd 的积累达到 Cd 超富集植物应达到的临界含量标准 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,因此有必要通过浓度梯度试验检验植物对 Cd 的积累潜力,以确认这 2 种植物是否确为 Cd 超富集植物.

试验地点仍然设在中国科学院沈阳生态实验站内.盆栽所用土壤取自生态站表土,其基本理化性质与盆栽初步筛选试验相同.试验共设了 5 个处理,分别为对照(CK2),Cd 投加浓度: $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (R1)、 $25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (R2)、 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (R3)、 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (R4).本试验于下一年春开始,盆栽植物蒲公英和三叶鬼针草移栽幼苗均采自沈阳生态站内,三叶鬼针草每盆 2 棵,蒲公英每盆 4 棵,3 次重复.盆栽试验处理与植物生长期管理均与盆栽筛选试验相同,植物成熟后收获.

1.3 样品分析及数据统计

收获的植物样一部分(近一半)用于地上部重金属含量测定,其余部分分为根、茎、叶和花序 4 部

分,分别用自来水充分冲洗,然后再用去离子水冲洗,沥去水分,之后在烘干前先在 105℃ 下杀青 30 min,然后在 70℃ 下于烘箱中烘至恒重.烘干后的植物样品粉碎过筛备用.土壤样品风干后过 100 目筛备用.植物及土壤样品均采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消化(体积比约为 87%:13%)、原子吸收分光光度计法测定其中的重金属含量,重复 3 次^[4,5,13].原子吸收分光光度计为日立 180-80,其 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的波长分别为 228.8、283.3、324.8 和 213.8 nm.土壤的有机质含量等基本理化性质的测定采用常规的测定方法^[14]. pH 用 PHS-3B 型 pH 测定,土水比为 1:2.5.

所获数据用 Microsoft Excel 和 SPSS11.5 进行统计分析,利用 Duncan 新复极差测验进行差异显著性测验($p < 0.05$).

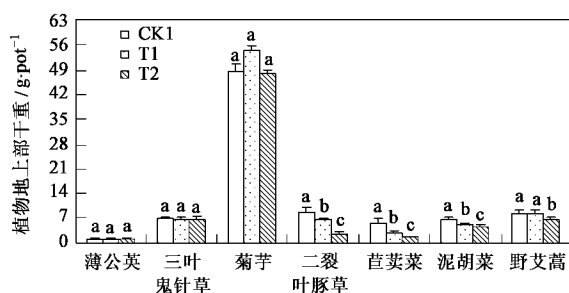
测定结果表明,盆栽土壤基本理化性质为 pH 值 6.65,有机质 $16.75 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N $0.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 P $0.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效 P $10.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 K $89.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,重金属元素背景值分别为总 Cd $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总 Pb $14.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总 Cu $12.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总 Zn $39.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2 结果与分析

2.1 筛选试验中植物对重金属的耐性与富集特征

图 1 给出了这 7 种杂草植物在盆栽条件下地上部的生物量变化情况.与未投加重金属的对照相比,蒲公英、三叶鬼针草和菊芋在镉单一污染(T1)和镉、铅、铜、锌复合污染(T2)条件下,地上部生物量均没有下降($p < 0.05$),说明其对重金属的耐性较强^[3];野艾蒿虽在镉单一污染条件下有较强耐性[其地上部生物量未下降($p < 0.05$)],但其对镉、铅、铜、锌复合污染耐性较差[地上部生物量明显下降($p < 0.05$)];而三裂叶豚草、苣荬菜和泥胡菜无论是在镉单一污染还是镉、铅、铜、锌复合污染条件下,其地上部生物量显著下降($p < 0.05$),对重金属耐性较弱.由此可见,蒲公英、三叶鬼针草和菊芋具备了超富集植物应具备的对重金属耐性较强的基本特征^[3,4].

在镉单一污染(T1)和和镉、铅、铜、锌复合污染(T2)条件下,植物对镉的富集特征基本相同(表 1).蒲公英、三叶鬼针草和苣荬菜地上部对镉的富集系数均大于 1,且其地上部镉含量大于其根部镉含量.因此,从植物对重金属的富集特征来看,这 3 种植物都具有镉超富集植物应具有的基本特征^[2,4].而



同一植物数据柱上不同字母表示差异显著($p < 0.05$),下同

图 1 筛选试验中植物地上部生物量

Fig.1 Shoot biomasses of tested plants in screening experiment

其它 4 种植物对镉的富集均不具有镉超富集植物的基本特征.从这 7 种植物对重金属铅、铜、锌的富集特征来看,虽然有的植物地上部重金属含量大于其根部重金属含量,但其富集系数均小于 1.所以也不具有超富集植物的基本特征.

综合植物对重金属的耐性和富集特征来看,苣荬菜对镉的富集虽具有镉超富集特征,但其对重金属耐性较弱,因此,只有蒲公英和三叶鬼针草具有镉超富集植物的基本特征,有必要通过浓度梯试验就其对镉的富集潜力进行检验,以确定其是否是镉超富集植物.

2.2 浓度梯度试验中植物对镉的耐性与超富集特征

浓度梯度试验中,三叶鬼针草和蒲公英地上部生物量见图 2.可以看出,在镉投加量分别为 10、25、50、100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (R1、R2、R3、R4) 条件下,这 2 种植物地上部生物量与对照(CK2)均未下降($p < 0.05$),说明其对重金属的耐性较强,具备了超富集植物应具有的对重金属耐性较强的特征^[3,4].

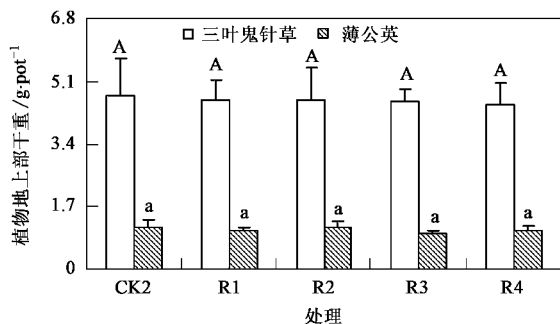


图 2 浓度梯度试验中植物地上部生物量

Fig.2 Shoot biomasses of tested plants in concentration gradient experiment

植物对镉的富集潜力表明(表 2),在土壤中镉含量为 10、25、50、100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,蒲公英地

表 1 筛选试验中植物体对重金属的富集情况

Table 1 Heavy metal concentration in plants and enhancement factors in screening experiment										
植物种	处理	部位	总 Cd /mg•kg ⁻¹	EF ¹⁾	总 Pb/mg•kg ⁻¹	EF	总 Cu/mg•kg ⁻¹	EF	总 Zn/ mg•kg ⁻¹	EF
蒲公英	CK1	根	nd ²⁾		2.1 ± 0.2		10.0 ± 1.3		38.6 ± 4.4	
		叶	0.2 ± 0.0		1.8 ± 0.1		5.5 ± 0.7		71.1 ± 7.2	
	T1	根	8.0 ± 0.7b ³⁾	0.79						
		叶	32.6 ± 3.1a	3.21						
	T2	根	7.4 ± 0.8b	0.73	49.2 ± 5.5a	0.05	35.3 ± 4.8a	0.09	62.4 ± 7.8a	0.06
		叶	31.8 ± 0.4a	3.13	24.2 ± 3.2b	0.02	22.0 ± 3.2b	0.05	34.4 ± 4.5b	0.03
三叶鬼针草	CK1	根	0.3 ± 0.1		9.2 ± 0.9		9.5 ± 1.4		83.8 ± 9.0	
		茎	0.8 ± 0.2		3.7 ± 0.4		8.5 ± 0.9		27.6 ± 3.1	
		叶	1.3 ± 0.3		2.3 ± 0.2		25.6 ± 3.1		95.2 ± 9.8	
		花序	0.4 ± 0.1		0.8 ± 0.1		8.1 ± 0.7		76.5 ± 7.9	
		地上部	0.8 ± 0.1		2.6 ± 0.3		11.5 ± 2.3		53.0 ± 6.4	
	T1	根	13.2 ± 1.4c	1.32						
		茎	28.3 ± 4.3b	2.83						
		叶	53.7 ± 3.6a	5.37						
		花序	12.4 ± 2.2c	1.24						
		地上部	28.3 ± 3.5b	2.83						
	T2	根	12.9 ± 2.8c	1.29	110.5 ± 9.8a	0.11	38.8 ± 4.3a	0.09	264.8 ± 25.0b	0.26
		茎	28.5 ± 4.1b	2.86	30.1 ± 3.7b	0.03	11.7 ± 1.9c	0.03	198.3 ± 21.1c	0.19
		叶	51.9 ± 5.0a	5.19	39.8 ± 4.2b	0.04	26.1 ± 3.6b	0.06	580.9 ± 66.9a	0.56
		花序	10.3 ± 1.7c	1.03	22.7 ± 3.5c	0.02	11.0 ± 1.6c	0.03	262.5 ± 31.5b	0.25
		地上部	27.1 ± 2.9b	2.71	28.7 ± 3.1b	0.03	12.3 ± 1.3c	0.03	280.4 ± 24.8b	0.27
菊芋	CK1	根	0.1 ± 0.0		0.1 ± 0.0		5.0 ± 0.6		22.7 ± 3.3	
		块茎	nd		nd		4.9 ± 0.3		8.9 ± 0.7	
		茎	0.1 ± 0.0		1.1 ± 0.1		1.8 ± 0.1		8.3 ± 0.5	
		叶	0.1 ± 0.0		nd		4.8 ± 0.7		48.7 ± 6.4	
		花序	nd		nd		8.5 ± 0.6		32.8 ± 4.8	
		地上部	0.1 ± 0.0		0.4 ± 0.1		3.4 ± 0.3		15.4 ± 2.2	
	T1	根	2.1 ± 0.2a	0.20						
		块茎	0.6 ± 0.1c	0.06						
		茎	1.1 ± 0.2b	0.11						
		叶	2.3 ± 0.2a	0.23						
		花序	1.6 ± 0.1b	0.16						
		地上部	1.3 ± 0.2b	0.13						
	T2	根	2.1 ± 0.1a	0.20	68.6 ± 7.8a	0.07	27.7 ± 3.6a	0.07	102.6 ± 11.7c	0.1
		块茎	0.6 ± 0.1c	0.07	6.7 ± 5.2	0.01	8.6 ± 0.9b	0.02	23.4 ± 3.2d	0.02
		茎	0.9 ± 0.2b	0.10	14.0 ± 2.8b	0.01	3.0 ± 0.2c	0.01	141.3 ± 17.0b	0.14
		叶	2.4 ± 0.3a	0.24	6.2 ± 0.9c	0.01	5.2 ± 0.6c	0.01	330.6 ± 30.0a	0.32
		花序	1.5 ± 0.2b	0.15	2.4 ± 0.4d	< 0.01	9.4 ± 1.1b	0.02	161.9 ± 20.2b	0.16
		地上部	1.3 ± 0.1b	0.13	8.9 ± 0.9b	0.01	6.8 ± 0.7b	0.02	144.9 ± 12.3b	0.14
三裂叶豚草	CK1	根	0.3 ± 0.1		13.9 ± 2.3		13.8 ± 2.3		17.1 ± 2.2	
		茎	0.2 ± 0.0		8.4 ± 0.8		2.5 ± 0.4		15.5 ± 2.0	
		叶	0.4 ± 0.0		6.9 ± 0.6		4.9 ± 0.3		11.6 ± 1.8	
		花序	0.2 ± 0.0		2.1 ± 0.2		5.9 ± 0.6		3.5 ± 0.2	
		地上部	0.2 ± 0.0		6.4 ± 0.7		4.2 ± 0.5		11.4 ± 0.9	
	T1	根	28.5 ± 3.1a	2.85						
		茎	14.0 ± 2.1b	1.41						
		叶	19.5 ± 3.0b	1.95						
		花序	6.8 ± 0.9c	0.68						
		地上部	13.7 ± 2.4b	1.38						
	T2	根	27.8 ± 3.3a	2.77	287.5 ± 30.5a	0.28	145.7 ± 20.6a	0.35	229.7 ± 33.8b	0.22
		茎	13.5 ± 2.1b	1.35	51.8 ± 6.7b	0.05	11.6 ± 1.3c	0.03	333.5 ± 40.1a	0.32
		叶	20.6 ± 2.5b	2.05	20.4 ± 2.2d	0.02	15.4 ± 1.6b	0.04	57.6 ± 6.7c	0.06
		花序	5.4 ± 0.7c	0.54	4.1 ± 0.5e	< 0.01	17.0 ± 2.0b	0.04	41.4 ± 5.8c	0.04
		地上部	14.3 ± 2.4b	1.43	40.1 ± 0.7c	0.04	13.1 ± 1.4bc	0.03	240.7 ± 26.7b	0.23

续表 1

植物种	处理	部位	总 Cd /mg•kg ⁻¹	EF ¹⁾	总 Pb/mg•kg ⁻¹	EF	总 Cu/mg•kg ⁻¹	EF	总 Zn/ mg•kg ⁻¹	EF
菘蓝菜	CK1	根	0.4±0.1		2.7±0.3		12.1±1.3		17.6±2.5	
		茎	0.4±0.1		1.7±0.2		4.9±0.6		15.7±2.9	
		叶	1.0±0.2		0.7±0.2		6.8±0.7		41.9±6.7	
		花序	0.4±0.1		0.5±0.1		0.9±0.2		6.9±0.9	
		地上部	0.6±0.1		1.3±0.3		5.0±0.4		22.3±3.1	
	T1	根	11.2±2.3b	1.11						
		茎	21.0±2.2a	2.08						
		叶	23.9±2.9a	2.37						
		花序	5.6±0.8c	0.56						
		地上部	19.9±1.6a	1.97						
	T2	根	10.2±1.7b	1.01	58.3±7.4a	0.06	40.8±4.2a	0.10	408.6±42.8a	0.39
		茎	22.8±3.5a	2.26	16.8±2.5b	0.02	12.0±1.5bc	0.03	276.3±30.9b	0.27
		叶	25.4±3.0a	2.52	9.8±1.1c	0.01	16.1±1.8b	0.04	430.6±39.8a	0.41
		花序	5.8±0.6c	0.58	1.2±0.2d	<0.01	10.8±1.2c	0.03	120.5±14.5c	0.12
		地上部	19.6±2.4a	1.94	14±2.3b	0.01	13.7±1.5b	0.03	350.9±39.6b	0.34
泥胡菜	CK1	根	0.2±0.0		1.4±0.2		5.6±0.7		28.8±3.2	
		茎	0.1±0.0		0.7±0.1		2.0±0.3		18.9±1.5	
		叶	0.2±0.1		3.4±0.5		2.4±0.2		28.3±3.6	
		花序	0.1±0.0		1.1±0.2		4.3±0.4		14.8±2.7	
		地上部	0.2±0.0		1.8±0.1		3.0±0.2		19.5±2.4	
	T1	根	14.1±2.1a	1.39						
		茎	6.2±0.8c	0.61						
		叶	8.2±0.9b	0.81						
		花序	2.8±0.3d	0.28						
		地上部	5.8±0.4b	0.58						
	T2	根	13.7±1.6a	1.35	77.0±8.7a	0.08	31.8±0.4a	0.08	247.2±28.6b	0.24
		茎	5.7±0.5c	0.57	11.7±2.6b	0.01	4.1±0.5d	0.01	208.9±22.6b	0.2
		叶	8.7±0.6b	0.86	13.1±2.3b	0.01	19.9±2.8b	0.05	504.3±45.2a	0.49
		花序	3.5±0.4d	0.34	7.2±0.8c	0.01	7.2±0.8c	0.02	237.8±22.9b	0.23
		地上部	6.1±0.5b	0.60	9.6±1.4b	0.01	10.1±1.2c	0.02	233.1±30.7b	0.22
野艾蒿	CK1	根	0.8±0.2		10.3±2.1		22.1±2.5		39.6±4.5	
		茎	0.5±0.1		2.5±0.3		3.1±0.4		43.1±4.2	
		叶	0.5±0.1		7.7±0.9		8.9±0.9		54.3±5.5	
		花序	0.3±0.0		0.4±0.1		7.8±0.6		44.5±3.8	
		地上部	0.5±0.1		3.0±0.4		5.4±0.3		45.6±6.7	
	T1	根	13.3±2.2a	1.32						
		茎	8.0±0.9b	0.79						
		叶	9.9±0.8ab	0.98						
		花序	5.4±0.4c	0.54						
		地上部	8.1±0.7b	0.80						
	T2	根	12.4±1.6a	1.22	69.6±7.8a	0.07	48.1±5.4a	0.12	178.5±22.5b	0.17
		茎	7.5±0.8b	0.74	13.8±2.4c	0.01	5.2±0.4c	0.01	304.5±32.6a	0.29
		叶	9.8±0.7ab	0.97	78.3±8.9a	0.08	46.9±5.8a	0.11	260.2±28.9a	0.25
		花序	5.2±0.6c	0.52	11.0±2.0c	0.01	19.0±2.1b	0.05	134.2±15.4b	0.13
		地上部	8.1±0.9b	0.80	26.7±4.4b	0.03	18.0±1.9b	0.04	247.1±26.5a	0.24

1) EF: 富集系数,即植物体内重金属含量与土壤中重金属含量的比值; 2) nd: 未检出; 3) 同一列同一处理重金属含量后的不同字母表示彼此之间的差异显著($p<0.05$),下同

上部镉含量虽均大于其根部镉含量(TF>1),且在土壤中镉含量为 10、25 mg•kg⁻¹其地上部富集系数也均>1,但其叶中镉含量均没有>100 mg•kg⁻¹这一镉超富集植物应达到的临界含量标准.因此,不是镉超富集植物^[2,4].三叶鬼针草当土壤中镉投加量为 25、50、100 mg•kg⁻¹时,其叶中镉含量均超过 100 mg•kg⁻¹这一镉超富集植物应达到的临界含量标准,分别为 145.3、160.6 和 192.3 mg•kg⁻¹,尤其是当土壤中镉投加量为 100 mg•kg⁻¹时,其茎及地上部镉含量也均大于 100 mg•kg⁻¹,分别为 115.4 和

102.3 mg•kg⁻¹. 同时, 其富集系数和转移系数也均 > 1.

由此可见, 在本试验条件下, 三叶鬼针草对镉

的富集特征已完全具有镉超富集植物的 4 个主要特征, 即临界含量特征、转移特征、耐性特征和富集系数特征, 基本可以认定为是镉的超富集植物^[2~5].

表 2 浓度梯度试验中植物体对重金属的超富集特征/mg•kg⁻¹
Table 2 Hyperaccumulative characteristics of plants to heavy metals in concentration gradient experiment /mg•kg⁻¹

植物	部位	R1	R2	R3	R4
蒲公英	根	8.2±0.9b	12.0±0.2b	26.0±2.1b	41.9±3.9b
	叶	31.9±0.5a	39.4±4.5a	45.5±6.5a	60.3±5.4a
	花序	12.2±2.2b	14.5±3.1b	15.3±2.0c	18.0±2.6c
	地上部	31.8±3.4a	33.0±2.3a	36.8±4.4a	57.2±6.2a
	EF	3.21	1.31	0.73	0.57
	TF ¹⁾	3.87	2.75	1.42	1.36
三叶鬼针草	根	11.6±4.1c	20.9±4.2d	25.5±5.6d	35.4±0.8d
	茎	35.4±3.8b	84.0±4.8b	97.1±11.7b	115.4±4.3b
	叶	83.9±9.0a	145.3±5.7a	160.6±3.1a	192.3±18.9a
	花序	18.3±3.7c	31.2±3.1c	37.4±1.3c	47.7±5.9c
	地上部	46.1±5.2b	84.7±7.5b	97.3±16.9b	102.3±12.7b
	EF	4.70	3.40	1.95	1.03
	TF	3.97	4.05	3.82	2.89

1) TF: 转移系数,即植物地上部重金属含量与其根部重金属含量的比值

3 讨论

近年来, 国内在重金属污染土壤植物修复领域进展也比较快, 发现了几种具有我国自主知识产权的超富集植物, 并开展了相关研究, 如 As 超富集植物蜈蚣草对砷的富集特征、其植物体内砷化学形态、磷对其富集砷的影响等; Zn 超富集植物东南景天对锌的富集特征、潜力、对镉、铅的积累特性、有机物料对其提取锌的影响、铅对其叶片抗氢化酶活性及叶绿素含量影响等; Cd 超富集植物宝山堇菜、油菜对镉的富集特征、修复潜力; Mn 超富集植物商陆对锰的富集特征等^[1]. 此外, 在铅、锌、铜超富集/富集植物的筛选^[16,17], 植物根际生态过程及根系分泌物对重金属生物有效性影响^[18,19], 植物对重金属的耐性机理^[20~22], 重金属相关基因的表达及抗性分析^[23,24], 螯合剂的环境风险, 植物修复与土壤酶活性, 修复中有机物料的使用^[25,26]等方面也取得了一定进展. 在修复实践方面, 建立了 As 等重金属污染土壤植物修复示范工程. 学术交流方面, 近几年已在我国成功举办了多次土壤污染和修复国际会议, 就重金属污染土壤植物修复等多方面的研究进行广泛的交流. 但总的来看, 植物提取修复技术还不十分成熟, 进一步筛选超富集植物仍然是十分必要的^[16].

三叶鬼针草是一年生草本植物, 一般株高为 25

~ 100 cm 左右. 茎直立, 四棱形, 疏生柔毛或无毛. 中下部叶对生, 叶片 3~7 深化裂至羽状复叶, 下部很少为单叶, 叶片卵形或卵状椭圆形, 有锯齿或分裂, 下部叶有长叶柄, 向上逐渐变短; 上部叶互生, 3 裂或不裂, 线状披针形. 头状花序开花时直径约为 8 mm, 有长梗. 瘦果线形, 成熟后黑褐色, 长 7~15 mm, 有硬毛; 冠毛芒刺状, 3~4 枚, 长 1.5~2.5 mm. 花果期一般在 9~11 月. 在我国的北方、东部、中南部和西南部均有分布^[8,9]. 三叶鬼针与其它已报道的镉超富集植物相比^[1], 具有生物量大、根系发达、易繁殖等优点, 其对重金属的修复潜力值得进一步研究.

4 结论

盆栽筛选试验和浓度梯度试验结果表明, 参试的 7 种我国东北地区常见菊科杂草植物中, 只有三叶鬼针草具备了超富集植物应具有的临界含量特征、转移特征、耐性特征和富集系数特征, 是一种镉超富集植物.

参考文献:

[1] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
[2] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements- a review of their distribution, ecology and phytochemistry [J]. Biorecovery, 1989, 1: 811-826.

- [3] Chaney R L, Malik M, Li Y M. Phytoremediation of soil metals [J]. *Current Opinions in Biotechnology*, 1997, **8**: 279-284.
- [4] Wei S H, Zhou Q X. Identification of weed species with hyperaccumulative characteristics of heavy metals [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, **14**(6): 495-503.
- [5] Wei S H, Zhou Q X, Koval P V. Flowering stage characteristics of cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and their significance to phytoremediation [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **369**: 441-446.
- [6] Brooks R R, Chambers M F, Nicks L J, *et al.* Phytomining [J]. *Trends in Plant Science*, 1998, **3**(9): 359-362.
- [7] 魏树和, 周启星, 刘睿. 重金属污染土壤修复中杂草资源的利用 [J]. *自然资源学报*, 2005, **20**(3): 432-440.
- [8] 李书心. 辽宁植物志(上、下)[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1992.
- [9] 王枝荣. 中国农田杂草原色图谱[M]. 北京: 农业出版社, 1996.
- [10] 夏家洪. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [11] 黄会一, 蒋德明, 张春桂, 等. 沈阳镉土地区生物治理的研究 [A]. 见: 高拯民. 土壤-植物系统污染生态研究 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1986. 79-85.
- [12] 吴燕玉, 陈涛, 张学询. 沈阳张士灌区镉的污染生态研究 [A]. 见: 高拯民. 土壤-植物系统污染生态研究 [C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1986. 295-301.
- [13] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 某铅锌矿坑口周围具有重金属超积累特征植物的研究 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2004, **5**(3): 33-39.
- [14] 周启星, 任丽萍, 孙铁珩, 等. 某铅锌矿开采区土壤镉的污染及有关界面过程 [J]. *土壤通报*, 2002, **33**(4): 300-302.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 周琼. 我国超富集·富集植物筛选研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2005, **33**(5): 910-912.
- [17] 聂俊华, 刘秀梅, 王庆仁. Pb(铅)富集植物品种的筛选 [J]. *农业工程学报*, 2004, **20**(4): 255-258.
- [18] 朱永官. 土壤-植物系统中的微界面过程及其生态环境效应 [J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(2): 265-271.
- [19] 孙瑞莲, 周启星. 高等植物重金属耐性与超积累特性及其分子机理研究 [J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(3): 497-504.
- [20] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, **8**(1): 8-15.
- [21] 冯保民, 麻密. 植物络合素及其合酶在重金属抗性中的功能研究进展 [J]. *应用与环境生物报*, 2003, **9**(6): 657-661.
- [22] 江行玉, 赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理 [J]. *应用与环境生物学报*, 2001, **7**(1): 92-99.
- [23] 柴团耀, 陈琼, 张玉秀, 等. 菜豆重金属响应基因 *PvSR2* 在烟草中的表达及镉抗性分析 [J]. *中国科学: C 辑*, 2003, **33**(5): 391-397.
- [24] 张晓钰, 茹炳根. 转金属硫蛋白突变体 $\alpha\alpha$ 的烟草具有较高的重金属抗性 [J]. *植物学报*, 2000, **42**(4): 416-420.
- [25] 刘云国, 李欣, 徐敏, 等. 土壤重金属镉污染的植物修复与土壤酶活性 [J]. *湖南大学学报*, 2002, **29**(4): 108-113.
- [26] 华珞, 陈世宝, 白玲玉, 等. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应 [J]. *农业环境保护*, 1998, **17**(2): 55-59, 62.