

Cd 污染下茼蒿生长和 Cd 蓄积特性的研究^①

潘静娴, 李新国, 沈健, 姚海燕

(上海师范大学生命与环境学院, 上海 200234)

摘要: 以白蒿为试材, 采用盆栽试验, 研究了 Cd 污染砂土中白蒿的生态适应性以及 Cd 的蓄积特征。试验证实砂土中 20~100 mg/kg 的 CdCO₃ 促进茼蒿生长、提高叶绿素含量; 120~240 mg/kg 的 CdCO₃ 影响茼蒿生长, 但单株干物重、分株数、叶绿素含量未降至对照水平; 根、茎、叶中 Cd 含量与砂土中 Cd 含量成正比, 根的积累最强, 根/砂土 Cd 比值最大 7.2 倍, 平均 4.4 倍; 茼蒿器官 Cd 含量顺序为根>茎>叶, 根 Cd 含量最高达 532.9 mg/kg。

关键词: 茼蒿; 镉 (Cd); 蓄积特性

中图分类号: X53

在我国由于重金属引起的粮食减产达到 1000 万 t, 直接经济损失 100 多亿元^[1]。对土壤进行重金属的植物修复技术是利用植物和共生微生物体系清除重金属的一种新型、环保、发展潜力强大的环境修复技术^[2-8]。

植物修复技术的关键是必需找出具有对重金属超强蓄积能力的植物种类, 且应生长量大、对环境适应性强、易于机械化采收。虽然目前已发现了 360 种对重金属有超强蓄积能力的植物^[9], 如紫花苜蓿、黑麦草、酥油草、印度芥菜等, 但以积累 Ni 的最多, 积累 Cd 的植物较少。十字花科的 *Thlaspi caerulescens*, 地上部积累的 Cd 量可达 1800 mg/kg^[10-11], 但生长缓慢、地上部生物量小; 印度芥菜虽然生长快, 生物量大, 但 Cd 在根和叶中的最大积累量分别只有 300 mg/kg 和 160 mg/kg^[9]。因此, 寻找生长速度快、生物量大的超强蓄积植物是介质重金属植物修复的关键。

茼蒿 (*Artemisia selengensis* Turcz), 别名芦蒿、藜蒿、水艾、香艾, 菊科蒿属多年生草本植物, 原作为多年生野生蔬菜利用, 近年才引种驯化栽培, 由于栽培技术简单、生长量大、病虫害少、风味独特、产品售价高, 因此, 在我国江苏 (南京)、云南等地广泛栽培。目前, 关于茼蒿的生态习性, 尤其是对土壤重金属修复的研究还未见报道。本研究以白蒿 (南京) 为试材, 研究在人工 Cd 污染砂土中,

期为土壤重金属的植物修复提供新“设备”。

1 材料与方法

1.1 试验材料

植物材料茼蒿为市售的南京产白蒿, 栽培一季留种, 第 2 年从留种田采种。盆栽介质为过筛的清洁河砂。

1.2 试验方法

试验于 2003 年 12 月到 2004 年 3 月在上海师范大学塑料大棚中进行, 完全随机区组试验, 重复 3 次。称取清洁河砂, 每盆 800 g, 按 0、20、40、60、80、100、120、140、160、180、200、240 mg/kg 的浓度分别添加 CdCO₃, 制成含 Cd 量不同的人工污染砂土 12 个, 分别记作 CK、C1、C2、C3、C4、C5、C6、C7、C8、C9、C10、C11。污染砂土混匀装盆后, 少量灌溉使砂土含水量为田间持水量的 65%~75%, 直接将插条扦插盆中, 每盆 2 株, 于扦插塘中生根萌发, 成活后搬至塑料大棚内。生长期每天用电子称称重或加入相同体积的蒸馏水保持砂土含水量为 65%~75%。新枝萌发后, 每隔一段时间记录株高、新枝数量、每枝叶数、茎粗等, 并在生长前期、中期和后期取样测定叶片叶绿素。种植 100 天后收获, 按地上部茎、叶分别制样; 洗出根系, 烘干, 测定干物重, 并制成重金属测定的样品。

①基金项目: 上海市教育委员会科学项目 (04DB12) 资助。

作者简介: 潘静娴 (1963—), 女, 湖南人, 博士, 副教授, 主要从事园艺产品质量安全和土壤重金属植物修复的安全研究。E-mail: panjingxian@citiz.net

干称重法测定；叶绿素含量采用 1:1 的丙酮醋酸浸提法测定^[12]；Cd 含量采用电感耦合等离子发射光谱法测定^[13]。数据采用 Excel 处理分析。

2 结果与分析

2.1 Cd 对茛蒿单株干重和分枝数的影响

无论 Cd 含量高低，不同处理分枝数的变化趋势基本一致（图 1），在试验时间内分枝数呈增加势头，表明茛蒿具有较大的生物量，具备了重金属超强积累植物生物量大的特点。砂土 CdCO₃ 含量从 0 mg/kg 增加到 240 mg/kg，单株分枝数呈现先增加，后减少的变化规律，即 CdCO₃ 浓度在 0~100 mg/kg，单株分枝数随 Cd 含量增加而增加，82 天前基本为 CK、C1<C3<C5，F 检验显著；CdCO₃ 浓度继续增加到 240 mg/kg，单株分枝数不再增加，而呈下降

趋势（幅度不大，略低于 CK），除 82 天后，其他测定时间处理间差异不显著。这表明低浓度的 Cd 对茛蒿生长有一定的促进作用。

干物重也表现相似的变化规律（图 1），但达到最高值时的 CdCO₃ 浓度不同。无论是根、茎、叶各自干物重，还是单株干物重，随着 CdCO₃ 浓度从 0 增加到 80 mg/kg，干物重呈增加趋势，但处理间的显著性差异不同，单株根干重表现为 CK、C1、C2、C3<C4，CK、C1、C2、C3 差异不显著；单株茎干重为 CK、C1<C2、C3<C4；单株叶干重为 CK、C1、C2<C3、C4；单株干物重呈现 CK、C1<C2<C3<C4 的变化规律。CdCO₃ 浓度从 80 mg/kg 增至 240 mg/kg，除茎干物重有波动外，单株干物重、根、叶干物重均开始下降，但各类干物重降幅不大，基本达到 CK、C1 的水平。

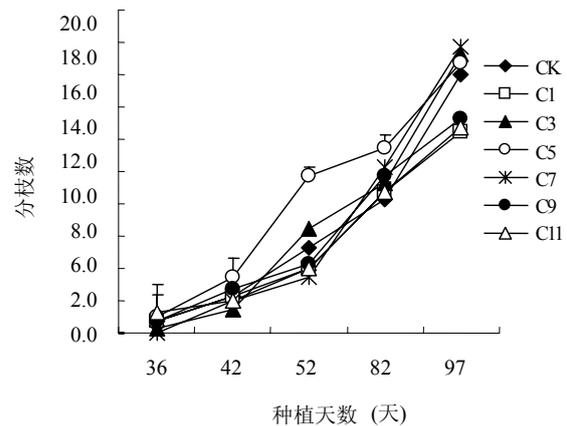
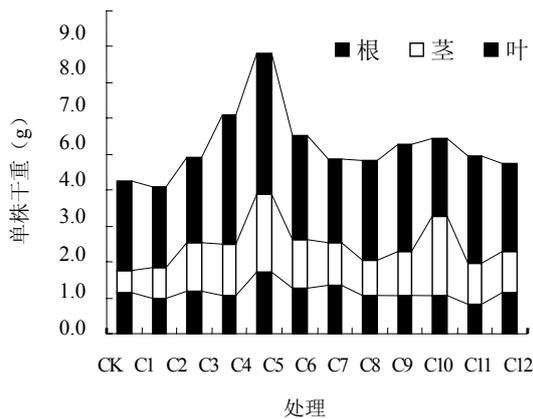


图 1 Cd 对茛蒿干物重和分枝数的影响

Fig. 1 Effect of Cd on dry matter and number of branches per plant of seleng Wormwood

以上分析显示，砂土中适量 Cd，即纯 Cd 为 14.5~72.4 mg/kg 可以促进茛蒿的生长。这表明茛蒿具有对 Cd 污染土壤的适应能力，是一种 Cd 抗性高的植物。

2.2 Cd 对茛蒿叶片叶绿素含量的影响

Cd 对茛蒿各生育期叶绿素含量有显著影响，达到了 $F_{0.05}$ 显著水平，但处理间的显著性和不同生长时期的影响程度不同。在苗期和生长前期，CdCO₃ 从 20 mg/kg 增加到 240 mg/kg，叶绿素含量呈现 CK、C1、C2、C3、C4、C5 高于 C6、C7、C8、C9、C10、C11 的趋势（图 2），但 CK、C1、C2、C3、C4、C5 间，C6、C7、C8、C9、C10、C11 间差异

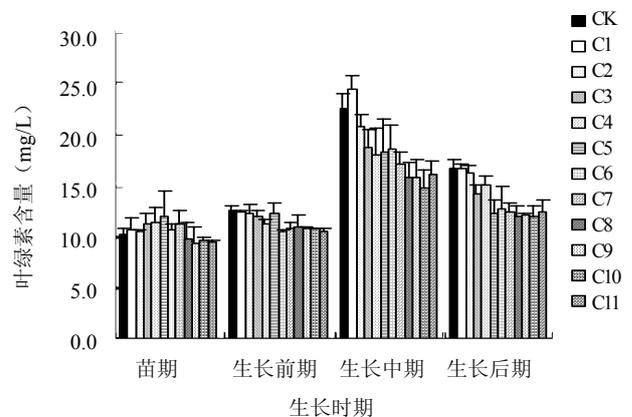


图 2 Cd 对茛蒿叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of Cd content in the media on chlorophyll concentration of seleng wormwood

不显著; 生长中期和后期, 叶绿素含量基本随砂土中 Cd 含量增加而下降, 这可能与 Cd 在植株中积累量增加, 产生了一定毒害有关, 但叶片并未见明显的黄化现象, 因此, 在 20~240 mg/kg CdCO₃ 内, 茛蒿具有较强的 Cd 抗性。此外, 在生长的 100 天内, 各处理叶绿素含量基本是增加的, 这与茛蒿喜冷凉、耐寒性强有关。

2.3 Cd 在茛蒿不同器官的积累

茛蒿不同器官对 Cd 的积累表现出较大的差异, 无论是 CK 还是其他处理, 根的含 Cd 量均是器官中最高的, 砂土 CdCO₃ 含量为 20~120 mg/kg, 根/茎 Cd 含量的比值为 4.56~8.86, CdCO₃ 继续增加到 240 mg/kg, 该比值基本稳定在 2.56~2.95 之间。根/叶 Cd 含量比值最低值为 3.13, 最大值为 10.43; 茎、叶 Cd 积累量也基本上是茎含量高于叶含量, 尤其是在砂土 Cd 含量高的情况下。数据分析显示茎/叶 Cd 含量比值除 3 个处理 <1 之外, 其他处理均 >1, 最大值为 1.94, 接近 2 倍。

茛蒿根、茎、叶 Cd 含量与砂土 Cd 含量密切相关, 砂土含 Cd 量从 20 mg/kg 增加到 240 mg/kg, 无论是根、茎、叶, 其 Cd 含量均随之增加, 达到了 F_{0.05} 显著性水平, 但处理间差异显著性程度不同(表 1)。根、茎、叶不同器官对砂土 Cd 的积累程度有所差异, 根对砂土 Cd 的积累能力最强, 根 Cd 含量平均为砂土 Cd 含量的 4.40 倍(按纯 Cd 计), 最低为 3.26 倍, 最大为 7.24 倍; 茎的积累能力位居第二, 茎 Cd 含量平均为砂土 Cd 含量的 1.02 倍, 最低 0.71

表 1 茛蒿不同器官含 Cd 量 (mg/kg)

Table 1 Cd contents in different organs of seleng wormwood

处理号	根	茎	叶
CK	0.7 ± 0.03g	0.4 ± 0.05h	0.3 ± 0.01e
C1	67.5 ± 3.50f	12.7 ± 0.18g	18.4 ± 0.21d
C2	126.3 ± 1.68e	22.2 ± 0.56f	20.4 ± 0.48c
C3	282.7 ± 1.68e	31.9 ± 0.56e	27.1 ± 0.47c
C4	295.3 ± 2.13d	45.7 ± 0.78e	34.8 ± 0.35c
C5	298.4 ± 1.58d	45.5 ± 0.43e	84.3 ± 0.47b
C6	300.6 ± 2.42d	65.8 ± 1.24d	74.3 ± 0.78b
C7	302.4 ± 2.31d	105.7 ± 0.35c	96.6 ± 0.32a
C8	328.6 ± 1.87c	118.8 ± 0.45c	95.6 ± 0.32a
C9	392.4 ± 1.98b	132.6 ± 0.64b	98.8 ± 0.45a
C10	489.3 ± 1.38a	175.9 ± 0.47a	94.8 ± 0.35a
C11	532.9 ± 2.45a	207.1 ± 1.34a	106.5 ± 1.01a

注: 同列数值间字母不同表明 Duncan's 多重比较差异显著

(P<0.05); 数值为平均值 ± 标准误。

最大 1.38 倍。

植物对重金属的积累能力是重金属超强富集植物的重要特征, 本试验中, 茛蒿根的 Cd 含量最大达到了 532.9 mg/kg, 在该含量下, 尽管茛蒿的单株干物重和分枝数均下降, 但并没有降低到 CK 的水平, 而且茛蒿从扦插到收获, 只用了 3 个月左右的时间, 因此, 茛蒿对环境砂土中 Cd 含量的耐受值应该可以超过 165.2 mg/kg (纯 Cd), 目前我国农田 Cd 污染的最大含量为 130 mg/kg^[11], 远低于茛蒿对 Cd 的抗性范围, 因此, 茛蒿是一种前景广阔的 Cd 污染修复植物。

3 结论

砂土 Cd 含量对白蒿的生长势、叶绿素和不同部位 Cd 的积累产生显著影响。20~100 mg/kg 的砂土 Cd (CdCO₃) 对茛蒿的生长有促进作用, 单株分枝数和干物重随之增加; 砂土 Cd 超过 100 mg/kg, 会降低茛蒿的单株干物重和单株分枝数, 但降低水平没有低于 CK; 叶绿素含量对砂土 Cd 含量有不同的反应, 苗期和生长前期, 20~100 mg/kg 的 CdCO₃ 促进叶绿素含量的增加, 但生长中期和后期, 叶绿素含量随 Cd 浓度增加而下降。

Cd 在茛蒿不同器官中的含量差别较大, 根 > 茎 > 叶, 根/茎 Cd 含量比值在低浓度 Cd 含量时 (20~120 mg/kg) 为 4.56~8.86, 高浓度下为 2.56~2.95。茎/叶 Cd 含量比值基本为 1.0~2.0。根/叶 Cd 含量比值最大 10.43, 最小 3.13。从茛蒿器官 Cd 含量看, 按照绿色食品和无公害标准, Cd 含量超标非常严重, 是不能食用的。

茛蒿不同器官对砂土 Cd 的积累程度不同, 根/砂土 Cd 比值平均为 4.4, 茎/砂土为 1.02, 叶/砂土为 0.91。根是 Cd 的强富集器官, 茎位居其次, 叶积累最少。

4 讨论

植物对重金属具有强的积累能力, 同时生长又不受影响, 是环境重金属植物修复的核心。前人在寻找这类植物方面作了不少工作, 但获得的植物总是存在某种缺陷^[1,11]。如印度芥菜在 CdCO₃ 含量为 40 mg/kg 时, 地上部和根系生物量就开始下降^[15], 在其他作物上也有同样现象^[16-17]。本试验 20~100 mg/kg 的 CdCO₃ 对茛蒿生长表现出促进作用, 即使增加到 120~240 mg/kg, 茛蒿分枝数、干物重、叶

绿素含量虽有一定降低,但仍与 CK 相当。此外,在 20~240 mg/kg 的 CdCO₃ 范围内,萹蒿生长势未降到 CK 水平,因此,有必要继续试验,进一步证明萹蒿 Cd 的最大忍受范围以及季节吸收差异。不过,从现有农田土壤 Cd 污染水平看(10 mg/kg 左右),萹蒿作为一种富积强、生长快的植物,可以用于农田土壤 Cd 污染的修复。

植物通过排斥和积累两种途径对重金属产生耐性。重金属超积累植物是一种极端的金属积累型,对重金属的大量吸收和积累而又不产生生理伤害的这种效应可能与重金属在植物体内的分布和化学形态密切相关,如 Cd 在超积累植物 *Thlaspi caerulescens* 细胞壁中蓄积^[18]。本试验萹蒿在高浓度 Cd 下仍能保持较好的生长状况,吸收的 Cd 是否也沉积在细胞壁上,需要进一步的试验来证实。此外,本试验采用的 CdCO₃ 虽是一种难溶态化合物,但萹蒿却表明出良好吸收效果,这可能是根系分泌物活化了难溶态 Cd 的缘故^[15]。鉴于此,萹蒿对 Cd 的吸收和积累的相关研究还有待深入。

参考文献:

- [1] 叶春和. 紫花苜蓿对铅污染土壤修复能力及其机理的研究. 土壤与环境, 2002, 11(4): 331-334
- [2] Liao M, Xie XM. Cadmium release in contaminated soils due to organic acids. Pedosphere, 2004, 14 (2): 223-228
- [3] Zhang MK, Ke ZX. Copper and zinc enrichment in different size fractions of organic matter from polluted soils. Pedosphere, 2004, 14 (1): 27-36
- [4] 薛生国, 陈国旭, 骆永明, Reeves RD, 林琦. 商陆 (*Phytolacca acinosa* Roxb) 的锰耐性和超积累. 土壤学报, 2004, 41 (16): 889-894
- [5] 郑喜坤, 鲁安怀, 高翔, 赵谨, 郑德圣. 土壤中重金属污染现状与防治方法. 土壤与环境, 2002, 11(1): 79-84
- [6] Wase DAJ, Forster CF. Biosorbents for Metal Ions. London: Taylor and Francis, 1997
- [7] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 曹志洪. 土壤中有有机污染物的植物修复研究进展. 土壤, 2003, 35 (3): 187-192
- [8] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖. 土壤环境中的多氯联苯 (PCBs) 及其修复技术. 土壤, 2004, 36 (1): 16-20.
- [9] 蒋先军, 骆永明, 赵其国. Cd 污染土壤的植物修复及其 EDTA 调控研究. 土壤, 2001, 33(4): 197-201
- [10] Brooks RR. General introduction//Brooks RR. Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. Wallingford, U.K.: CAB International, 1998: 1-15
- [11] 沈振国, 刘友良. 重金属超量积累植物研究进展. 植物生理学通讯, 1998, 34 (2): 133-139
- [12] 潘静娴, 黄丹枫, 王世平, 贾志宽. 甜瓜幼苗生长及光合特性与育苗基质 pH 相关性研究. 武汉植物学研究, 2003, 21 (6): 497-502
- [13] 潘静娴, 黄丹枫, 王世平, 贾志宽. 育苗基质 pH 对甜瓜穴盘苗营养特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2002, 8 (2): 251-253
- [14] 廖自基. 微量元素的环境化学及其生物效应. 北京: 中国环境科学出版社, 1993: 299-302
- [15] 苏德纯, 黄焕忠, 张福锁. 印度芥菜对土壤难溶性中难溶态镉、铅的吸收差异. 土壤与环境, 2002, 11 (2): 125-128
- [16] Belyaeva ON, Haynes RJ, Birukova OA. Barley yield and soil microbial and enzyme activities as affected by contamination of two soils with lead, zinc or copper. Biology and Fertility of Soils, 2005, 41 (2) : 85-94
- [17] Daniela P, Tomas M, Martina M, Jirina S, Jiri B. Cadmium tolerance and accumulation in transgenic tobacco plants with a yeast metallothionein combined with a polyhistidine tail. International Biodeterioration & Biodegradation, 2004, 54 (2/3) : 233-237
- [18] Boominathan R, Doran PM. Organic acid complexation, heavy metal distribution and effect of ATPase inhibition in hairy roots of hyperaccumulator plant species. Journal of Biotechnology, 2003, 101: 1931-146

Growth and Cd Accumulation Properties of Seleng Wormwood in Cd-Contaminated Sandy Soil

PAN Jing-xian, LI Xing-guo, SHEN Jian, YAO Hai-yan

(*College of Biology and Environment, Shanghai Normal University, Shanghai 200232, China*)

Abstract: With Nanjing Baihao as a testing plant growing in pots of Cd-contaminated sandy soil, growth and Cd accumulation properties of the plant were investigated. Growth of the plant was promoted with chlorophyll concentration increased when the concentration of CdCO₃ ranged from 20 to 100 mg/kg. And when the concentration reached 120 ~ 240 mg/kg in the sandy soil, the growth was slightly inhibited, but the dry matter and branches per plant and chlorophyll concentration were not reduced to the level of the control; Cd concentration in the root, stem and leaves of seleng wormwood was positive related to that of the sandy soil. Among these tissues, the roots accumulated most of the Cd in the plant, making Cd concentration therein upto 532.9 mg/kg, about 7.2 times or 4.4 times on average as much as in the maxium. In terms of Cd concentration, the tissues of the plant were in the following order, roots>stems>leaves.

Key words: Seleng wormwood, Cadium, Absorption perperty