

小飞蓬对 Cd 的耐性与吸收特性研究

杨帆^{1,2}, 刘雷¹, 刘足根¹, 杨国华¹, 黄精明¹, 方红亚^{1*}

(1. 江西省环境保护科学研究所, 江西南昌 330029; 2. 南昌大学环境科学与工程学院, 江西南昌 330031)

摘要 [目的] 分析小飞蓬的生长、生理及富集重金属的能力, 探索小飞蓬对 Cd 污染的生理响应机制与耐性机理。[方法] 采用水培试验方法, 研究了 5 个 Cd 浓度(0、25、50、75、100 $\mu\text{mol/L}$) 处理对小飞蓬(赣南钨矿区优势植物) 生长、叶绿素含量和吸收 Cd 的影响。[结果] 当 Cd 浓度为 25 和 50 $\mu\text{mol/L}$ 时小飞蓬能正常生长, 各生长指标与对照(0 $\mu\text{mol/L}$) 相比差异均不显著。当 Cd 浓度达到 75 和 100 $\mu\text{mol/L}$ 时植物生长缓慢、植株矮小。小飞蓬对 Cd 吸收有很强的分异特征, 能将更多重金属积累在植物地上部。小飞蓬地上部和根系的 Cd 含量随营养液 Cd 浓度的增加而增加, 当 Cd 浓度为 75 $\mu\text{mol/L}$ 时, 植物地上部 Cd 吸收总量达到最高, 为 118.87 ng。[结论] 小飞蓬对修复低、中浓度 Cd 污染的土壤具有一定潜力。

关键词 小飞蓬; Cd; 耐性; 吸收; 植物修复

中图分类号 Q948.12 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)06-02501-03

Tolerance and Adsorption Characteristic of *Conyza canadensis* to Cadmium

YANG Fan et al (Jiangxi Provincial Academy of Environmental Protection Sciences, Nanchang, Jiangxi 330029)

Abstract [Objective] The purpose was to analyze the growth and physiology of *Conyza canadensis* L. and its ability on enriching heavy metal and explore its physiological response and tolerance mechanisms to Cd pollution. [Method] The experimental method of water culture was used to study the influences of 5 concentration treatments (0, 25, 50, 75 and 100 $\mu\text{mol/L}$) of Cd on the growth, chlorophyll content and Cd absorption of *C. Canadensis* (dominant plant in wolframmine area of southern Jiangxi). [Result] When Cd concentrations were 25 and 50 $\mu\text{mol/L}$, *C. Canadensis* could grow normally and compared with CK (0 $\mu\text{mol/L}$), the differences on various indices were not significant. When Cd concentration reached 75 and 100 $\mu\text{mol/L}$, the plant grew slowly and was small. *C. Canadensis* had very strong differentiation characteristics on Cd absorption and could accumulate more heavy metal in its aerial part. The Cd contents in the aerial part and root of *C. Canadensis* increased along with the increment of Cd concentration in nutrient solution. When Cd concentration was 75 $\mu\text{mol/L}$, the total quantity of Cd absorption in the aerial part of plant reached the highest of 118.87 ng. [Conclusion] *C. Canadensis* had some potential on remedying the soil polluted by Cd with low and middle concentrations.

Key words *Conyza canadensis* L.; Cd; Tolerance; Adsorption; Phytoremediation

镉是环境中对植物、动物以及人类毒性最强的重金属元素之一, 镉污染土壤的治理一直是备受关注的热点^[1-2], 镉被列为我国优先控制污染的 8 种重金属元素之一^[3]。然而, 以传统的理化方法治理污染土壤造价高昂, 易破坏土壤结构和造成二次污染^[4-6]。近年来颇受关注的植物修复(Phytoremediation) 技术具有技术经济上的双重优势, 已成为国际学术界研究的热点问题^[7-10]。目前, 国外植物修复已成为商品化技术^[7], 而我国植物修复还在实验阶段^[11]。

超富集植物筛选是重金属污染土壤植物修复的基础和核心问题, 同时也是污染环境植物修复的难点及前沿^[12]。国际上目前虽已发现近 500 种超富集植物, 但公认的镉超富集植物只有 2 种, 即印度芥菜(*Brassica juncea*)^[13] 和十字花科的天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)^[14]。这些植物的生长具有很强的地域性, 很难大面积生长。近几年, 我国已有研究者陆续报道了镉超富集植物油菜、龙葵、商陆和宝山堇菜^[15-18], 可这些发现的超富集植物一般生长缓慢、植株矮小和地上部生物量小, 在实际应用中受到很大的限制。解决这个问题有两种方法, 一是寻找生物量大的超富集植物, 二是采用生物量大的中等富集植物, 通过一些调控措施来增加富集浓度, 如利用螯合剂来提高植物对镉的富集^[19-20]。赣南钨矿区菊科植物小飞蓬(*Conyza Canadensis* L) 在含大量 Cd、Mn、W 等的胁迫环境下保持了很强的生长优势, 该植物生长迅速且生物量大。以往有研究表明, 小飞蓬对 Cu 和 Mn 具有一定的耐性和富集能力^[21-22]。因此, 笔者采用水培试验研

究小飞蓬在不同浓度 Cd 污染条件下的生长状况、对重金属 Cd 的富集能力, 旨在筛选修复重金属 Cd 污染土壤的植物, 探索小飞蓬对 Cd 污染的生理响应机制与耐性机理, 以期为重金属污染植物修复技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 小飞蓬种子采自江西大余县漂塘钨矿(E 113°50'09", N 25°10'16") 的尾砂库区, 当地年平均温度 18.5℃, 年降雨量 1 563 mm, 属中亚热带季风湿润气候区, 库区面积有 0.34 km²。

1.2 试验方法 植物培养试验在光照培养箱中进行, 培养箱条件如下: 温度 25 / 20 (昼/夜), 相对湿度 65% ~ 70%, 每天光照 12 h, 光强 1.5 × 10⁴ lux。将小飞蓬种子播种于 1:1 (V/V) 珍珠岩和蛭石混合的育苗盘中, 每天喷洒蒸馏水维持基质的湿润。种子出芽 10 d 后, 喷洒 25% 的 Hoagland 营养液以供生长所需养分。30 d 后将大小一致、长势良好的幼苗移栽到含 1 L Hoagland 营养液的培养盆中预培养。完全营养液的组成为 ($\mu\text{mol/L}$): Ca(NO₃)₂ 1 000、MgSO₄ 500、KCl 100、K₂HPO₄ 50、H₃BO₃ 10、ZnSO₄ 5、MnSO₄ 1.8、CdSO₄ 0.31、Na₂MoO₄ 0.2、NiSO₄ 0.5、Fe-EDTA 50。每 3 d 更换一次营养液, 每天用 0.1 mol/L NaOH 或 0.1 mol/L HCl 调节 pH 值至 5.8 左右, 保持 24 h 通气。预培养 18 d 后进行不同 Cd 浓度的处理, 设定 Cd 浓度分别为 0 (CK)、25、50、75、100 ($\mu\text{mol/L}$) 5 个处理, 以 CdCl₂ 的形态加入, 每个处理设 3 次重复, 连续培养 40 d 后收获。

1.3 测定方法 植物收获前采用丙酮提取, 分光光度法测定功能叶叶绿素的含量^[23]。植株收获后记录植物株高、根长, 分别用自来水和去离子水洗净, 于 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 下烘 2 h, 称其重量, 将植物分为地上部和根系两部分, 粉碎

基金项目 江西省环保局项目(200602)。

作者简介 杨帆(1983-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 研究方向: 环境修复。* 通讯作者。

收稿日期 2007-07-19

后过80目筛,采用HNO₃-HClO₄(8:2)消解,ICP-AES法(美国Perkin Elmer公司,optima2100DV)测定重金属含量。

1.4 数据分析 耐性指数^[24] Π (%) = (重金属处理中植物的生物量/对照的生物量) × 100%; 转移系数^[25] = 地上部分重金属含量/地下部分重金属含量。试验数据采用SPSS 13.0统计软件进行方差分析(ANOVA)和LSD检验。文中数据均为3次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 小飞蓬生长状况 不同浓度的Cd处理对小飞蓬的生长产生一定的影响(表1)。从表1可见,小飞蓬的株高和地上部生物量在不同处理下反应一致。在低(25 μmol/L)、中(50 μmol/L)浓度处理下有小幅上升,然后随营养液Cd浓度的增加而逐渐下降;高浓度处理(75、100 μmol/L)下小飞蓬

的株高和地上部生物量低于CK处理(0 μmol/L),达到显著性差异($p < 0.05$),表明小飞蓬受其毒害作用影响显著。小飞蓬的根长和根系干重随Cd浓度的增加反而呈下降的趋势,在低(25 μmol/L)、中(50 μmol/L)浓度中根长和根系干重略低于对照,但差异不显著;而在高浓度处理下(75、100 μmol/L)根长和根系干重差异显著($p < 0.05$)。另外,小飞蓬在高浓度处理下(75、100 μmol/L),总干重明显减少,差异显著($p < 0.05$)。这可能是随着Cd浓度的增加,毒害作用逐渐增强导致的结果。由于Cd是植物的非必需元素,对植物生长、发育和繁殖会产生一定的抑制作用,当Cd进入植物体并积累到一定程度时,会使植物呈现发育迟缓、叶片变小、卷曲、叶颜色萎黄等不良生长状态^[26]。但不同植物对Cd的耐性不同,

表1 不同Cd处理对小飞蓬生长的影响

Table 1 Influence of different treatments of Cd on the growth of *Conyza canadensis* L.

处理 Treat ment	株高 cm Plant height	最长根长 cm Longest root length	地上部干重 g Dry weight of shoot	根系干重 g Dry weight of root	总干重 g Total dry weight	Π %
	68.30 b	12.60 a	3.477 0 b	2.658 6 a	6.135 6 a	-
	70.50 a	12.46 a	3.608 0 a	2.335 3 abc	5.943 3 a	96.87
	70.90 a	12.23 a	3.615 6 a	2.108 6 b	5.724 2 a	93.29
	63.50 c	11.00 b	3.169 3 c	1.916 0 b	5.085 3 b	82.88
	61.00 d	10.23 c	2.864 9 d	1.636 6 c	3.273 2 c	53.35

注:不同字母间表示差异显著($p < 0.05$)。下同。

Note: Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$). The same as below.

出现中毒时Cd的临界浓度也不同。耐性指数能较好地反映植物对重金属的耐性,指数值越高,表明该植物的生物量受影响越小,对重金属的耐性越强^[27]。从表中数据来看,小飞蓬耐性指数较高,尤其在低(25 μmol/L)、中(50 μmol/L)浓度处理下并没有受到明显的毒害。

2.2 小飞蓬叶绿素含量变化 植物叶片叶绿素的含量是植物生长和生理代谢的重要标志,叶绿素含量高低在一定程度上反映了光合作用的水平。Cd对叶绿体的破坏可能是由于Cd沉积在内囊体上并与膜上蛋白体结合进而破坏叶绿体酶系统,阻碍叶绿素合成^[28]。从图1可知,随着Cd浓度的增加,叶绿素a、b含量均逐渐降低,但变化不明显。因此,小飞蓬在含Cd介质下生长,可降低叶绿素含量,但毒害的临界浓度可能较普通植物高。

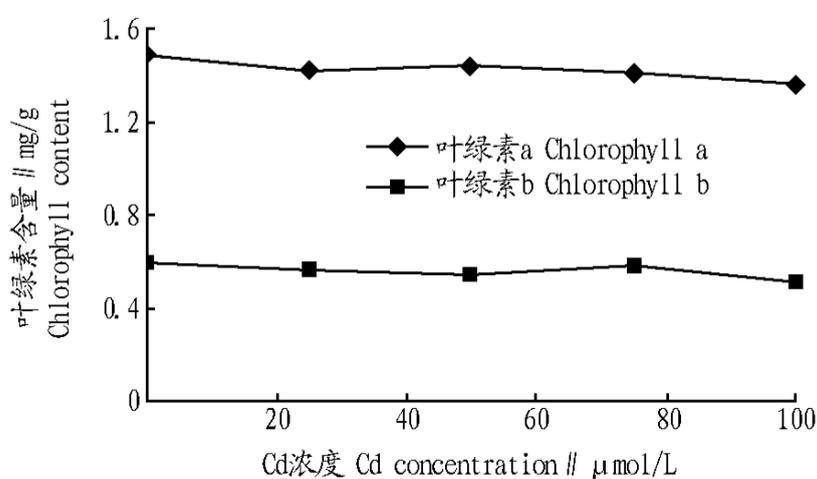


图1 不同Cd处理对小飞蓬叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of different treatments of Cd on content of chlorophyll in leaves

2.3 小飞蓬富集Cd的特征 如表2所示,小飞蓬地上部Cd和根系的Cd含量随Cd浓度的增加而增加。地上部Cd含量

在浓度为75和100 μmol/L时,增幅较大,分别增加了80.98%和67.82%。当外源Cd浓度达到75 μmol/L时,地上部Cd含量与低(25 μmol/L)、中(50 μmol/L)浓度处理相比差异达显著水平($p < 0.05$);外源Cd浓度继续增加至100 μmol/L时,小飞蓬地上部和根系中Cd含量达到最高,分别为对照的209.7和168.6倍。从转移系数来看,小飞蓬对Cd的吸收有很强的分异特征,其吸收的Cd主要富集于地上部。植物的转移系数越高,就越能有效地将环境中的重金属提取到容易收割的地上部分。小飞蓬体内可能存在更多的离子转运蛋白,能把暂时贮存的Cd装载到木质部导管,促进Cd向木质部装载,从而使Cd易向上运输和富集。

小飞蓬地上部的吸收总量(地上部生物量 × 地上部重金属浓度)是评价小飞蓬修复重金属污染土壤潜力的指标^[29]。实验结果表明(表2),在外源Cd浓度达75 μmol/L时,小飞蓬地上部的Cd吸收总量最高,为118.87 ng,显著高于其他处理($p < 0.05$)。该试验中植物地上部的Cd积累量随着Cd处理浓度的增加而显著增加;尽管小飞蓬地上部浓度随着Cd浓度的增大而增加(100 μmol/L),但由于Cd对小飞蓬的毒性也不断增加,导致其生物量明显下降,吸收总量也呈下降趋势。

小飞蓬地上部Cd吸收总量与营养液Cd浓度符合二项式拟合曲线, $y = -0.0147x^2 + 2.489x + 3.8454$, 相关系数 $R^2 = 0.9344$ 。式中, y 为小飞蓬地上部Cd的吸收总量(ng); x 为营养液Cd浓度(μmol/L)。由图2可知,随着营养液Cd浓度的增加,地上部Cd吸收总量呈先上升后下降趋势,在Cd浓度为75 μmol/L时,小飞蓬地上部Cd累积总量达到最高。可见在5个处理中,当营养液Cd浓度在75 μmol/L左右时,小飞蓬具有最佳的修复潜力。

表2 不同Cd处理下小飞蓬的富集情况

Table 2 Accumulation of *Conyza canadensis* L. in different treatments of Cd concentration

处理 Treatment	地上部Cd含量 ng/kg Cd content in shoot	根系Cd含量 ng/kg Cd content in root	转移系数 Transfer coefficient	地上部吸收总量 ng Gross absorption of shoot	根系吸收总量 ng Gross absorption of root	总吸收量 ng Gross absorption
	0.30 d	0.20 c	1.49	1.05 d	0.53 b	1.58 d
	18.85 c	20.60 ac	0.92	68.02 c	48.29 ab	116.31 c
	20.71 c	16.59 bc	1.27	74.90 c	35.08 ab	109.98 c
	37.48 b	26.04 ab	1.70	118.87 a	49.90 a	190.71 a
	62.90 a	33.71 a	1.88	102.97 b	55.17 a	158.14 b

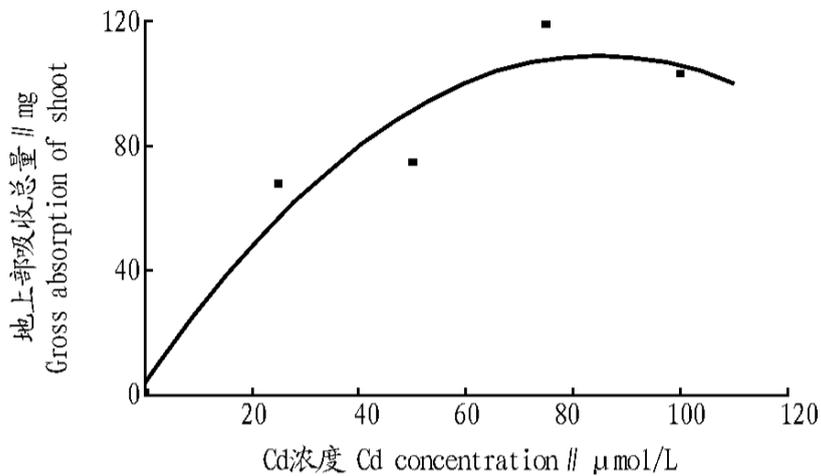


图2 小飞蓬地上部Cd吸收总量随浓度变化的关系曲线

Fig. 2 Connection Curve of total Cd contents absorbed in shoots of *Conyza Canadensis* L. and treatment of Cd concentrations

3 结论

(1) 低、中浓度Cd处理下小飞蓬能正常生长,各生理性指标与对照差异均不显著,当Cd浓度达到75和100 μmol/L时植物出现生长缓慢、植株矮小现象。

(2) 随着Cd处理浓度的增加,叶绿素a、b含量均逐渐降低,但差异均不显著。

(3) 小飞蓬对Cd的吸收有很强的分异特征,其吸收的Cd主要富集于地上部。

(4) 小飞蓬地上部和根系的Cd含量随营养液Cd浓度的增加而不断增加。较高浓度处理下小飞蓬生物量的下降影响了其吸收总量,在Cd浓度为75 μmol/L时,小飞蓬地上部Cd吸收总量达到最高,修复效果最佳。

(5) 根据Brooks对超富集植物的定义^[30],植物含Cd须在100 ng/kg以上,该试验中小飞蓬达不到这一要求,但由于其生物量大,生长迅速,植株Cd吸收总量较高,在Cd污染土壤的植物修复中具有一定应用价值。该试验为水培试验初步探讨,还需要在污染生态区进一步试验研究。

参考文献

[1] ERIKA K W, JANE. Potential of salix as phytoextractor for Cd on moderately contaminated soils[J]. Part and soil, 2003, 249(1): 127-137.

[2] VÁZQUEZ S, AGHA A, GRANADO A, et al. Use of White Lupin Plant for Phytostabilization of Cd and As Polluted Acid Soil[J]. Water, Air and Soil Pollution, 2006, 117(1-4): 349-365.

[3] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学报, 2004, 23(1): 65-72.

[4] 周启星, 魏树和, 张倩茹, 等. 生态修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

[5] 沈振国, 陈怀满. 土壤重金属污染生物修复的研究进展[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2): 39-44.

[6] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[7] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1197-1203.

[8] SUERBECK DR. Plant, parent and soil properties governing uptake and availabilities of heavy metals derived from sewage sludge[C]// Water, Air and Soil Pollution, 1991: 52-58.

[9] GLEBA D, BORISJUK NV, BOCHSJK LG, et al. Use of plant root for phytoremediation and role Cd for farming[J]. Proc Natl Acad Sci, 1999, 96: 5973-5977.

[10] BROOKS RR. Copper and cobalt uptake by haunariastrum species[J]. Part and Soil, 1977, 48: 541-544.

[11] 陈同斌, 韦朝阳, 黄泽春, 等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, 47(3): 207-210.

[12] MA L Q, KOMAR KM, TU C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic[J]. Nature, 2001, 409(6820): 579.

[13] SALT DE, PRINCE RC, HICKERLING J, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian Mustard[J]. Plant Physiol, 1995, 109: 1427-1433.

[14] BROWN SL, CHANEY RL, ANGLE JS, et al. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and *Baccharis californica* for zinc and cadmium contaminated soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1994(23): 1151-1157.

[15] 刘威, 束文圣, 蓝崇珏. 宝山堇菜 (*Vida baoshanensis*) — 一种新的镉超富集植物[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2046-2049.

[16] 聂发辉. 镉超富集植物商陆及其富集效应[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 303-306.

[17] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超富集植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 48-51.

[18] 魏树和, 周启星, 王新. 超富集植物龙葵及其对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2005, 26(3): 167-171.

[19] 陈玉成, 董姍燕, 熊治延. 表面活性剂与EDTA对雪菜吸收镉的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 651-656.

[20] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 镉污染土壤植物修复的EDTA调控机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 205-209.

[21] 任立民, 刘鹏, 蔡妙珍, 等. 水蓼、小飞蓬、杠板归和美洲商陆对锰毒的生理响应[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 81-85.

[22] 丁佳红, 刘登义, 李征, 等. 土壤不同浓度铜对小飞蓬毒害及耐受性研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 668-672.

[23] 蒋德安, 朱诚. 植物生理学实验指导[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999.

[24] WILKINS DA. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. New Phytologist, 1978, 80: 623-633.

[25] 李硕, 刘云国, 李永丽, 等. 水葱修复土壤镉污染潜力的研究[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(2): 84-86.

[26] 陆晓怡, 何池全. 蓖麻对重金属Cd的耐性与吸收积累研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 674-677.

[27] 夏汉平, 刘世忠, 敖惠修. 香根草等三种植物的抗盐性比较[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(1): 7-17.

[28] 彭鸣, 王焕校. 镉、铅诱导的玉米幼苗细胞超微结构的变化[J]. 中国环境科学, 1991, 11(6): 426-431.

[29] REEVES RD. The hyperaccumulation of nickel by serpentine plants. In: Intercept L. Baker Vegetation of Ultramafic (serpentine) Soil[M]. Andover UK: Hampshire, 1992: 253-277.

[30] BAKER AJM, BROOKS RR. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic element - a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. Biorecovery, 1989(1): 811-826.