

芦蒿对 Cd 积累与转运的基因型差异研究

李霞¹, 张银龙^{1*}, 魏猷刚², 徐明喜², 狄广娟¹, 卜丹蓉¹

(1.南京林业大学森林资源与环境学院 江苏省林业生态工程重点实验室, 南京 210037; 2.南京市蔬菜科学研究所, 南京 210042)

摘要:为保障芦蒿作为茎叶菜食用的安全性,通过温室盆栽试验,研究了4种芦蒿对Cd积累与转运的基因型差异。结果表明,同一Cd处理水平下4种芦蒿品种干物重变化差异显著($P<0.05$),且随着Cd处理水平的增加4种芦蒿品种干物重均呈现先上升后下降的趋势,在 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大。随着土壤Cd处理浓度的增大,4种芦蒿叶片抗氧化酶活性呈现先上升后下降的趋势,且伏秋芦蒿和白芦蒿抗氧化酶活性下降幅度大于大叶青芦蒿和青白芦蒿。4种芦蒿基因型可食部分(茎)Cd含量、富集系数(BFs)和转运系数(TFs)存在显著的品种差异($P<0.05$),且富集系数均大于1.0。当土壤Cd浓度超过 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,芦蒿茎中Cd含量均超过无公害蔬菜安全要求,说明该土壤已不适宜种植芦蒿,当土壤Cd含量略高于自然背景值时,则可以选择伏秋芦蒿。

关键词:芦蒿;镉;积累;转运;基因型差异

中图分类号:X503.23

文献标志码:A

文章编号:1672-2043(2013)11-2132-08

doi:10.11654/jaes.2013.11.005

Genotypic Differences in Cd Accumulation and Translocation in *Artemisia selengensis*

LI Xia¹, ZHANG Yin-long^{1*}, WEI You-gang², XU Ming-xi², DI Guang-juan¹, BU Dan-rong¹

(1.College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University Key Laboratory of Forestry Ecology and Engineering in Jiangsu Province, Nanjing 210037, China; 2.Nanjing Institution of Vegetable Science, Nanjing 210042, China)

Abstract: Heavy metals may pose health risks through food chain. The accumulation of heavy metals by vegetable plants has genotypic differences. A pot-culture experiment was carried out to study genotypic differences in Cd accumulation and translocation in *Artemisia selengensis*, a health-benefiting vegetable. At the same Cd level, the variation of dry weight of 4 *Artemisia selengensis* was significant ($P<0.05$). The dry weight of 4 *Artemisia selengensis* followed a rise-fall pattern with Cd concentrations, with the greatest dry weight at $100\text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$. Similarly, the activity of antioxidant enzyme in the leaves of 4 *Artemisia selengensis* increased at first and then decreased with increasing Cd. The decline in the antioxidant enzyme activity was greater in Fuqiu *Artemisia selengensis* and Bai *Artemisia selengensis* than in Dayeqing *Artemisia selengensis* and Qingbai *Artemisia selengensis*. Significant differences ($P<0.05$) were observed in Cd concentrations in edible part (stem), bioaccumulation factors (BFs) and translocation factors (TFs) among 4 *Artemisia selengensis*. The BFs were greater than 1.0 for all 4 *Artemisia selengensis*. The Cd concentrations in *Artemisia selengensis* stems grown in soils with $>0.5\text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$ exceeded the Safety Standards for non-pollution vegetables, indicating that the soils was not suitable for growing *Artemisia selengensis*. Fuqiu *Artemisia selengensis* should be choosed for soils containing Cd slightly higher than the natural background value.

Keywords: *Artemisia selengensis*; cadmium; accumulation; translation; genotypic differences

随着城市化进程的加快和工农业的迅猛发展,特别是矿山开采、电镀、油漆着色剂、合金抗腐蚀和抗磨擦剂、塑料稳定剂、光敏元件的制备以及电池生产等

行业的蓬勃发展和含镉重金属农药的不合理使用,土壤环境Cd污染日益严重,我国城郊种植的蔬菜中重金属的积累量也有上升趋势。据报道,我国城郊菜地Cd含量相对较高,土壤和蔬菜已受到一定程度的Cd污染^[1]。

当前,不同农作物积累重金属的基因型差异研究已成为国内外的一个研究热点,众多研究表明,水稻^[2]、大麦^[3]、小麦^[4]、花生^[5]、玉米^[6-7]等在吸收积累重金属以及对重金属的耐性上存在显著的基因型差异。尽管我

收稿日期:2013-02-22

基金项目:国家林业局“948”项目(2011-4-81);江苏省高校自然科学基金重大项目(09KJA180002);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:李霞(1987—),女,扬州江都人,硕士研究生,研究方向为环境生态学。E-mail:544436827@qq.com.

*通信作者:张银龙 E-mail:ecoenvylz@163.com

国对于城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染已进行了较为广泛的研究,但多侧重于调查取样分析和蔬菜对重金属吸收富集的品种间差异及其相关机制的初步研究,而有关蔬菜不同基因型对重金属吸收富集差异的研究相对较少,尤其对于目前越来越受老百姓青睐的野生蔬菜 Cd 积累基因型差异的研究尚未见报道。芦蒿(*Artemisia selengensis*)属于菊科蒿属,系多年草本植物,广泛分布于我国河北、山西及东北与中南各省的低洼潮湿的沟边、圩堤荒滩、水甸边。随着人们对芦蒿消费量的不断增加,单纯的采摘野生资源已不能满足人们的消费需求,人工规模化栽培芦蒿成为目前市场上的主要来源。建有全国最大的野生蔬菜基地的南京市八卦洲 2010 年芦蒿的种植面积达 2300 hm² 左右,全国已有十多个省广泛种植芦蒿。本研究通过温室盆栽试验研究 4 种芦蒿对土壤 Cd 积累和转运的品种差异,以期保障芦蒿作为茎叶菜食用的安全性,也可为其他蔬菜作物安全生产提供必要的参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 试验地概况

盆栽实验地点设在南京市蔬菜研究所温室内,该温室周围没有污染源,是重金属未污染区。盆栽实验土壤采自南京林业大学未污染土壤,采样深度 0~40 cm,经风干后过 4 mm 筛,与基质以 1:1 的比例充分混合后备用,基质购于南京市蔬菜研究所,由东北老林的枯枝落叶经高温发酵所得,供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤的养分特性及 Cd 含量

Table 1 Basic properties and Cd contents in the soils used for the experiments

土壤质地 Soil texture	pH 值	有机质 O.M./ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	有效磷 Avail P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Avail K/ mg·kg ⁻¹	全量 Cd Total Cd/ mg·kg ⁻¹
壤土	6.25	7.31	0.42	12.74	96.05	0.1734

1.1.2 供试植物

实验作物为芦蒿,来自南京八卦洲苗圃,共 4 个品种,分别为伏秋芦蒿、大叶青芦蒿、白芦蒿、青白芦蒿。2012 年 3 月初,选择长势一致的芦蒿老根,栽植于塑料盆中,每盆种植 3 株。芦蒿生长的适宜温度为 12~18 ℃, >20 ℃茎秆容易木质化;对土壤要求不严,但以肥沃、疏松排水良好的壤土为宜;耐湿性强,不耐

干旱;大棚栽培芦蒿一般需 40~50 d,株高 20~25 cm 时即可采收。

1.1.3 供试重金属

供试重金属为 Cd,以 CdCl₂·2.5H₂O 金属盐形式添加于水中,设置 11 个处理水平,另设对照组 CK,即不添加任何重金属离子。

1.2 盆栽实验设计

盆栽实验于 2012 年 2 月在南京市蔬菜研究所温室内进行。每盆装土 2 kg,每千克土施加 0.10 g N、0.10 g P₂O₅、0.10 g K₂O,分别以尿素、磷酸二氢钾和氯化钾形式施入,作为基肥,外源重金属以 CdCl₂·2.5H₂O 金属盐形式加入,将 CdCl₂·2.5H₂O 配置成一定浓度的溶液,为 0.5、1、5、10、25、50、100、150、200、250、300 mg·kg⁻¹,共设置 Cd 污染包括对照共 12 个处理。装盆时,将含有重金属的溶液连同基肥施入土壤并混合均匀,加去离子水至田间持水量的 70%左右,培养稳定 1 个月后再进行生物盆栽实验。选择长势一致的芦蒿老根直接栽种于盆中,每盆定苗为 3 株,每个处理重复 3 次。根据盆中缺水情况,不定期浇自来水(水中未检测出 Cd),使土壤含水量保持在田间持水量的 70%左右。

1.3 样品分析

1.3.1 芦蒿干物重(DW)的测定

采集的植物分为根部和茎叶,分别用自来水充分冲洗,以去除样品上的泥土和污物,然后再用蒸馏水冲洗 3 遍,沥去水分,之后放置到烘箱,在 105 ℃杀青 3 min 后,80 ℃烘干到恒重,冷却,称重。

1.3.2 芦蒿叶片抗氧化酶系统活性的测定

(1)酶液的制备:将芦蒿新鲜叶片剪细,混合均匀,称 0.5 g 样品,用保鲜膜包好放低温冰箱预冻 1 h,置于预冻的研钵中,加入 2 mL 冰冷的 0.05 mol·L⁻¹ pH 值 7.8 磷酸缓冲液及少量的石英砂,研磨成匀浆再加入 2 mL 缓冲液,研磨均匀后,将匀浆液倒入聚乙烯离心管中,低温(0~4 ℃)下离心 10 min(10 000 r·min⁻¹),上清液即为酶液,将上清液倒入小青霉瓶,低温下贮存,供 POD、SOD、CAT 活性的测定。

(2)超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定:采用抑制 NBT 光化学还原法^[8],以抑制 NBT 光还原的 50%为 1 个酶活性单位(U·g⁻¹ FW);过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法^[8],以每分钟内 A₄₇₀ 变化 0.1 为 1 个酶活性单位(U·g⁻¹ FW·min⁻¹);过氧化氢酶(CAT)活性的测定采用过氧化氢分解法^[9],以每分钟内 A₂₄₀ 减少 0.1 为 1 个酶活性单位(U·g⁻¹ FW·min⁻¹)。

1.3.3 芦蒿根、茎、叶 Cd 含量的测定

称取过 1 mm 筛的植物样品 0.5 g(精确至 0.000 1 g)于 50 mL 三角瓶中,加几粒玻璃珠和 10 mL 体积比为 3:1 的高氯酸和硝酸混合酸,盖上小漏斗,放置电热板上低温过夜(约 65 ℃),次日将温度提升以样液微沸为宜,直到溶液无色透明,待白烟慢慢消失后取下冷却,加 2 mL 体积比为 1:1 的硝酸充分溶解,加热 10 min 左右,取下冷却定容于 25 mL 容量瓶中,摇匀,用电感耦合等离子体质谱法测定滤液中重金属 Cd 含量。

1.4 数据处理

富集系数(Bioaccumulation factors, BF_s)定义为作物体内 Cd 含量与相应土壤 Cd 含量的比值,其表达式如下:

$$BF_s = \frac{w(\text{作物})}{w(\text{土壤})}$$

式中: $w(\text{作物})$ 表示作物体内 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $w(\text{土壤})$ 表示相应土壤 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

转运系数(Translocation factors, TF_s)定义为作物地上部 Cd 含量与地下部 Cd 含量的比值,其表达式如下:

$$TF_s = \frac{w(\text{地上})}{w(\text{地下})}$$

式中: $w(\text{地上})$ 表示作物地上部分 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $w(\text{地下})$ 表示作物地下部分 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

实验数据均为 3 次重复的平均值,采用 Excel 2007 和 SPSS17.0 软件对数据进行统计和方差分析(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 Cd 处理对不同基因型芦蒿生长的影响

2.1.1 干物重

从外观上看,4 种芦蒿基因型随着 Cd 浓度的增

加基本都能正常生长,未出现萎黄、缺绿等受胁迫症状,表明其对 Cd 具有很强的耐性。由图 1 可以看出,同一 Cd 处理下 4 种芦蒿基因型生物量差异显著($P < 0.05$)。不同 Cd 处理水平下 4 种芦蒿基因型(伏秋芦蒿、大叶青芦蒿、白芦蒿和青白芦蒿)生物量的范围分别为:1.66~3.61 g、3.47~5.93 g、2.72~4.96 g 和 3.19~5.30 g。与对照相比,随着投加 Cd 浓度从 0.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单株干物重呈增加趋势,投加 Cd 浓度从 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单株干物重均开始下降,当 Cd 浓度增加到 300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,芦蒿干物重比 Cd 浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时芦蒿干物重下降超过 30%,伏秋芦蒿干物重下降超过 40%。

2.1.2 叶片抗氧化酶系统活性

关于膜伤害机制有多种学说,其中生物氧毒害的超氧学说研究进展很快。许多研究表明,植物在逆境中(如干旱、涝、盐、环境污染等)会产生大量的氧自由基^[10-11],SOD、POD、CAT 对这些自由基和过氧化物起着清除作用,是植物体内活性氧酶促防御系统的 3 种重要保护酶。SOD 将超氧化物歧化形成 H_2O_2 ,POD 和 CAT 则催化 H_2O_2 形成 H_2O 。只有 SOD、POD 和 CAT 三者协同作用,才能使生物自由基维持在一个低水平,从而防止自由基毒害。

(1) Cd 胁迫对 4 种芦蒿叶片 POD 活性的影响

图 2 表明,芦蒿受到 Cd 污染时,叶片中的 POD 活性呈现先上升后下降的趋势,伏秋芦蒿和白芦蒿在 50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处 POD 活性达到最大值,大叶青芦蒿和青白芦蒿在 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处 POD 活性达到最大值,均极显著高于对照($P < 0.01$)。伏秋芦蒿和白芦蒿在 300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处 POD 活性甚至低于对照水平。

(2) Cd 胁迫对 4 种芦蒿叶片 SOD 活性的影响

实验结果表明(图 3),不同的 Cd 处理水平下,

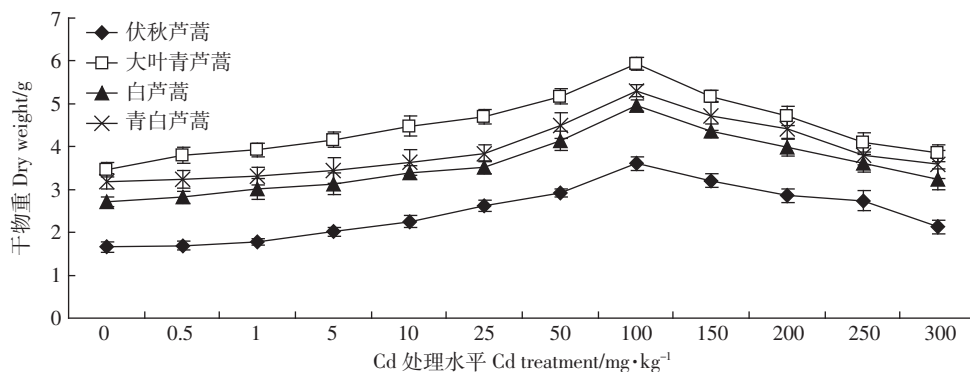


图 1 Cd 处理对 4 种芦蒿基因型干物重的影响

Figure 1 Dry biomass of four *Artemisia selegensis* genotypes grown in different Cd levels

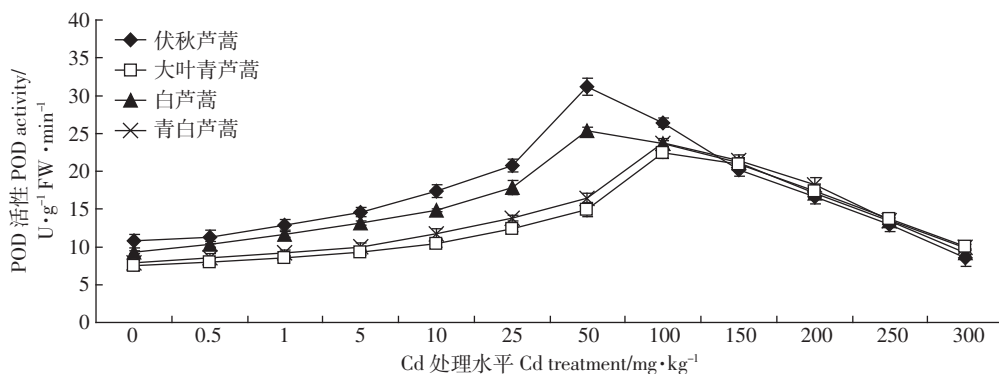


图 2 Cd 胁迫对 4 种芦蒿基因型叶片 POD 活性的影响

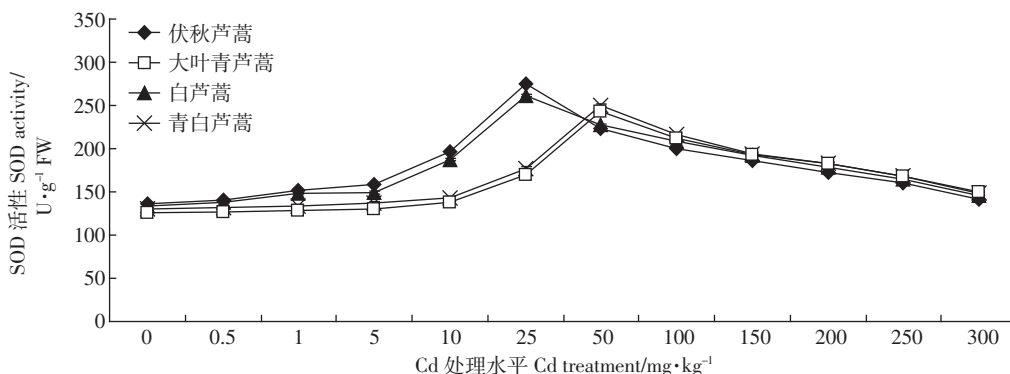
Figure 2 Activity of POD in leaves of 4 *Artemisia seleirgensis* genotypes grown in different Cd levels

图 3 Cd 胁迫对 4 种芦蒿基因型叶片 SOD 活性的影响

Figure 3 Activity of SOD in leaves of 4 *Artemisia seleirgensis* genotypes grown in different Cd levels

SOD 的活性随着 Cd 浓度的增加先增加,伏秋芦蒿和白芦蒿在 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处 SOD 活性达到最大值,大叶青芦蒿和青白芦蒿在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处 SOD 活性达到最大值,随着 Cd 浓度的继续增大 SOD 活性逐渐下降。

(3) Cd 胁迫对 4 种芦蒿叶片 CAT 活性的影响

CAT 能够清除细胞内过多的 H_2O_2 以维持细胞内 H_2O_2 在一个正常水平,从而保护膜结构。CAT 活性的变化与 POD 和 SOD 的相同(图 4),伏秋芦蒿和白芦蒿在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处 CAT 活性达到最大值,大叶青芦蒿

和青白芦蒿在 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处 CAT 活性达到最大值。

伏秋芦蒿和白芦蒿达到自身保护极限的 Cd 处理水平低于大叶青芦蒿和青白芦蒿,且随着 Cd 胁迫程度的加大,伏秋芦蒿和白芦蒿抗氧化酶活性下降幅度大于大叶青芦蒿和青白芦蒿,甚至在同一 Cd 胁迫水平下抗氧化酶的活性低于大叶青芦蒿和青白芦蒿,说明伏秋芦蒿和白芦蒿对重金属的污染反映较快、较大。所以从抗氧化酶结果可见,大叶青芦蒿和青白芦蒿对环境变化的敏感度小于伏秋芦蒿和白

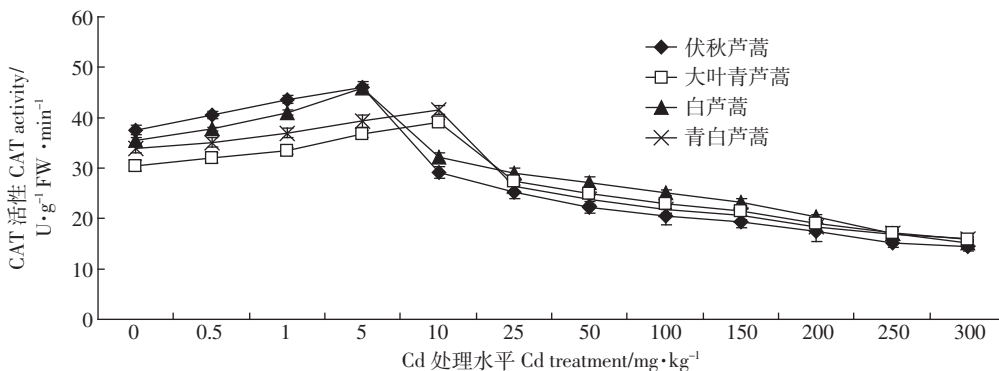


图 4 Cd 胁迫对 4 种芦蒿基因型叶片 CAT 活性的影响

Figure 4 Activity of CAT in leaves of 4 *Artemisia seleirgensis* genotypes grown in different Cd levels

芦蒿。

在正常情况下,CAT、SOD 和 POD 酶的协同作用能使生物自由基维持在一个低水平,从而防止自由基毒害,对植物起到保护作用,其中 CAT 对外界重金属胁迫的反应最为敏感,SOD 居中,POD 明显滞后^[12]。因此,当重金属胁迫达到一定程度时就可能造成植物体内 3 种酶活性比的不平衡,降低了内源活性氧清除功能,H₂O₂、OH 等的积累,使细胞膜功能紊乱和伤害,并最终导致植物伤害。

2.2 芦蒿可食部分 Cd 含量基因型差异

由表 2 可见,4 种芦蒿品种在同一 Cd 处理下,可食部分(茎)Cd 含量差异显著($P<0.05$)。加镉污染的土壤中,大叶青芦蒿和青白芦蒿茎中 Cd 含量较高,可能与芦蒿根中 Cd 的迁移率较高有关,白芦蒿茎中 Cd 含量其次,伏秋芦蒿茎中 Cd 含量较低。

根据无公害蔬菜安全要求 (GB 18406.1—2001)Cd 最大容许含量(MPC)为 0.50 mg·kg⁻¹ DW,芦蒿可食部分 Cd 含量超过 0.50 mg·kg⁻¹ DW 即认为 Cd 超标。在对照处理和 0.5 mg·kg⁻¹ 处理中,4 种芦蒿可食部分 Cd 含量均低于 0.50 mg·kg⁻¹,达标率为 100%,在其他处理中芦蒿可食部分 Cd 超标率均为 100%。

2.3 芦蒿 Cd 富集系数基因型差异

富集系数(Bioaccumulation factors,BFs)也称吸收系数,是指植物中某元素含量与土壤中元素含量之比^[13]。富集系数表征土壤-植物体系中元素迁移的难易程度,也是反映植物将重金属吸收转移到体内能力大小的评价指标。富集系数越高,表明植物地上部重金属富集质量分数越大。

由图 5 可看出,4 种芦蒿的富集系数差异明显($P<0.05$),在不同的 Cd 处理水平下,4 种芦蒿的富集

表 2 盆栽实验中 4 种芦蒿可食部分(茎)Cd 含量

Table 2 Cadmium concentrations in edible parts(stem) of 4 *Artemisia seleirgensis* in the pot experiment

Cd 处理浓度/mg·kg ⁻¹ Cd treatment	芦蒿茎中重金属 Cd 含量 Stem Cd concentration of <i>Artemisia selengensis</i> /mg·kg ⁻¹			
	伏秋芦蒿	大叶青芦蒿	白芦蒿	青白芦蒿
0	0.224 0±0.020 3b	0.394 1±0.023 2a	0.359 6±0.023 7a	0.377 4±0.033 5a
0.5	0.263 0±0.022 7c	0.432 2±0.021 0a	0.379 6±0.021 4b	0.451 8±0.012 2a
1	1.012 2±0.041 9b	1.886 0±0.112 8a	1.563 4±0.013 2a	1.876 1±0.014 2a
5	4.702 7±0.230 5d	9.394 5±0.014 2a	7.586 8±0.060 4c	8.775 2±0.241 4b
10	11.692 1±1.051 3c	20.149 7±0.642 2a	15.124 1±1.342 6b	19.569 8±1.194 2a
25	29.341 3±1.133 1d	49.103 7±1.311 5a	34.693 1±1.051 5c	44.580 1±1.341 3b
50	84.351 6±2.182 4c	121.698 8±2.100 5a	92.503 0±0.800 6b	122.745 4±1.412 3a
100	227.753 9±2.213 1d	310.677 7±1.962 4a	241.668 0±1.634 2c	285.525 2±1.873 3b
150	267.290 6±1.901 3d	363.143 9±3.314 2a	295.584 2±2.112 3c	343.226 9±1.702 1b
200	285.789 5±1.012 4d	382.107 8±1.574 1a	312.562 3±1.900 5c	355.482 0±0.930 6b
250	315.920 9±2.872 5d	409.267 4±1.781 8a	362.347 8±1.832 5c	385.012 7±1.122 3b
300	328.055 1±2.710 7d	418.237 6±1.682 0a	368.575 2±0.743 0c	393.463 1±1.934 0b

注:不同字母表示同一 Cd 处理下不同芦蒿基因型间的差异性显著($P<0.05$)。
Note: Means followed by different letters at a Cd treatment level are significantly different at $P<0.05$.

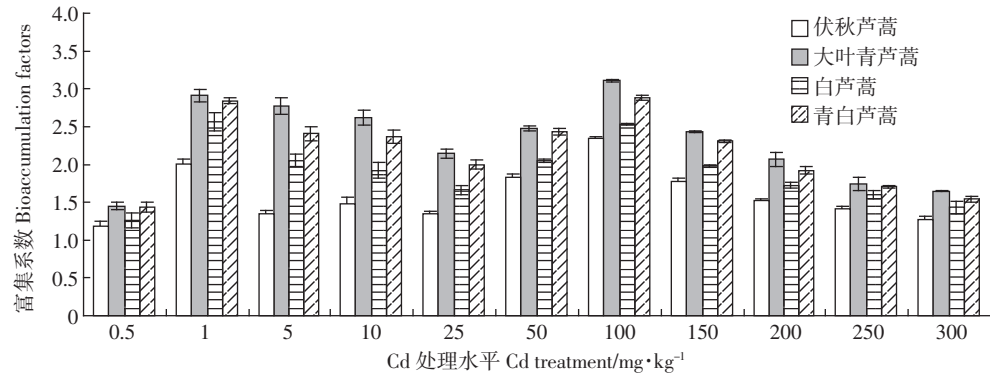


图 5 不同 Cd 处理下 4 种芦蒿富集系数

Figure 5 Bioaccumulation factors of 4 *Artemisia seleirgensis* genotypes in different Cd treatments

系数依次为大叶青芦蒿>青白芦蒿>白芦蒿>伏秋芦蒿,但 4 种芦蒿的富集系数均超过了 1.0,表明具有较强的富集吸收 Cd 的能力。4 种芦蒿的富集系数随着土壤 Cd 浓度的升高呈现先上升后下降的趋势,说明适宜的 Cd 浓度可以促进植物对 Cd 的吸收,但随着 Cd 浓度增加,其富集系数有下降的趋势,可能与土壤 Cd 浓度超过芦蒿吸收 Cd 的适宜浓度有关。

2.4 芦蒿 Cd 转运系数基因型差异

转运系数(Translocation factors, TFs)是指地上部元素的含量与地下部同种元素含量的比值^[14],主要用来评价植物将重金属从地下向地上的运输和富集能力。转运系数越大,则重金属从根系向地上部器官转运能力越强。由图 6 可知,不同 Cd 处理水平下 4 种芦蒿的转运系数差异显著($P<0.05$),其中大叶青芦蒿最大,青白芦蒿其次,白芦蒿第三,伏秋芦蒿最小。

4 种芦蒿在 $0.5\sim 10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下转运系数 <0.40 ,说明芦蒿从土壤中吸收的 Cd 主要集中和固定在根系,向地上部运输的量很少,这与其他研究的结论相似^[15]。其原因可能是植物根中的 Cd 绝大部分结合于细胞壁或储存于液泡,导致组织中 Cd 主要以活性低的醋酸和盐酸提取态存在,移动性很差,而且 Cd 在根、茎、叶中以相似的形态转移和积累^[15-16]。因此,前一器官对 Cd 的固定或“拦截”能力对下一器官 Cd 的积累有很大影响。随着 Cd 浓度的增加,4 种芦蒿的转运系数也越来越高,这一结果与富集系数相似,可能与土壤中适宜的 Cd 浓度促进植物对 Cd 的吸收从而向地上部转运和液泡的区室化作用有关^[14]。当 Cd 处理水平达到 $150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,4 种芦蒿的转运系数均为最大,之后随着 Cd 处理水平继续增加,转运系数呈下降趋势,但仍显著高于对照。

3 讨论

重金属污染,特别是 Cd 污染,已经成为中国农业可持续发展的一大阻碍^[17]。20 世纪 90 年代初,由于引污灌溉,Cd 污染耕地达 $1.3\times 10^4\text{ hm}^2$,土壤 Cd 含量为 $2.5\sim 23.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[18]。1998 年杨永岗和胡霁堂研究表明,南京城郊结合部零散菜地土壤中 Cd 平均质量分数是南京农区蔬菜基地土壤的 17.2 倍^[19]。2003 年丁爱芳和潘根兴根据南京建城区的扩展情况随机采集南京城郊零散菜地土壤进行分析,结果发现城郊零散菜地土壤中 Cd 的质量分数变化范围是 $1.03\pm 1.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[20]。2006 年陈亚华、黄少华等采集了南京市 5 县 4 郊 5 个环境单元(矿冶区、交通干线、工厂周边、污灌地、农产品基地)的农田土壤进行调查研究,结果显示在所采集的 100 个土壤样品中,58% 的土壤 Cd 总含量超过国家二级标准值,Cd 的质量分数变化范围是 $0.09\sim 17.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 10 个农产品生产基地样点中,八卦洲蔬菜基地两个样品点土壤 Cd 含量超过国家二级标准值的 3~4 倍^[21]。本实验研究发现当土壤中 Cd 含量超过 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,芦蒿可食部分茎中 Cd 含量超过无公害蔬菜安全要求,故在选择芦蒿种植地时要特别考虑土壤中 Cd 含量。芦蒿在高浓度的 Cd 处理水平(如 $300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)下能正常生长,且芦蒿体内的 Cd 含量也达到很高的水平,本研究结论与此前的一致^[22],可能与芦蒿耐湿、耐热、耐肥、抗逆性强的特性有关。因此,在 Cd 污染土壤上芦蒿不宜作为蔬菜作物种植,可考虑用于植物修复 Cd 污染土壤,而且其生长量大,管理粗放。

重金属 Cd 能使植物组织细胞产生活性氧,引起膜脂过氧化,改变活性氧代谢有关酶的活性,影响植株生长。本研究发现当土壤 Cd 浓度为 $0.5\sim 300\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

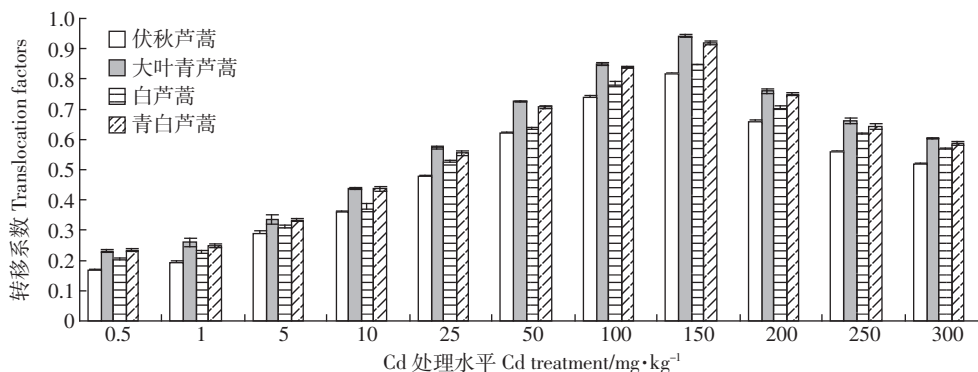


图 6 不同 Cd 处理下 4 种芦蒿转移系数

Figure 6 Translocation factors of 4 *Artemisia selegensis* genotypes in different Cd treatments

kg^{-1} 时 4 种芦蒿基本都能正常生长, 未出现萎黄、缺绿等受胁迫症状, 且当土壤 Cd 浓度 $\geq 150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时芦蒿干物重才开始下降; 然而研究发现土壤 Cd 浓度 $\geq 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时伏秋芦蒿和白芦蒿叶片 CAT 活性开始下降, 大叶青芦蒿和青白芦蒿叶片 CAT 活性在土壤 Cd 浓度 $\geq 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时开始下降, 表明此时芦蒿已经受到重金属 Cd 的胁迫。

目前中轻度污染土壤的农产品安全生产问题引起了越来越多的关注^[23-24]。重金属低积累作物基因型的筛选和培育被认为是当前最为合理和有效的途径之一, 国外研究者已经成功筛选到向日葵和硬质小麦 Cd 低积累基因型, 并用于实际生产^[25]。低积累植物最重要的特征就是植物体尤其是地上部重金属含量较低, 是重金属污染土壤稳定修复的理想植物, 笔者认为今后有关芦蒿的研究工作可以致力于 Cd 低积累芦蒿基因型的寻找, 这样既可以修复轻度 Cd 污染土壤, 也可以满足芦蒿作为茎叶菜食用的无公害蔬菜安全要求。

值得注意的是, 本次试验是采用温室盆栽试验单一进行研究, 而自然环境与盆栽试验的人工条件相比更为复杂和难以控制, 有可能致使盆栽试验结论和自然环境结论相差较大甚至出现相矛盾的结论, 故在充足的人力、物力、财力条件下, 应采用温室盆栽试验结合大田试验验证的系统方法来进行研究, 以期获得较为可靠的数据。

4 结论

(1) 同一 Cd 处理下 4 种芦蒿基因型生物量差异显著 ($P < 0.05$)。0.5~100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 促进芦蒿的生长和干物重的提高, 当 Cd 处理水平超过 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 芦蒿单株干物重均开始下降, 当 Cd 浓度增加到 300 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 芦蒿干物重比 Cd 浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时下降超过 30%, 伏秋芦蒿干物重下降超过 40%。

(2) 随着土壤 Cd 处理浓度的增大, 4 种芦蒿叶片抗氧化酶活性均呈现先上升后下降的趋势, 伏秋芦蒿和白芦蒿达到自身保护极限的 Cd 处理水平低于大叶青芦蒿和青白芦蒿, 且随着 Cd 处理浓度的增加, 伏秋芦蒿和白芦蒿抗氧化酶活性下降幅度大于大叶青芦蒿和青白芦蒿。

(3) 4 个品种芦蒿在同一 Cd 处理下可食部分(茎)Cd 含量差异显著 ($P < 0.05$), 其中大叶青芦蒿和青白芦蒿茎中含量较高, 白芦蒿次之, 伏秋芦蒿较低。在 0.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理中, 4 种芦蒿可食部分 Cd 含量均低于 0.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在其他处理中芦蒿可食部分 Cd

含量均超过无公害蔬菜安全要求。

(4) 同一 Cd 处理水平下 4 种芦蒿的富集系数和转运系数差异显著 ($P < 0.05$), 大小顺序为大叶青芦蒿 > 青白芦蒿 > 白芦蒿 > 伏秋芦蒿。4 种芦蒿的富集系数均超过了 1.0, 表明具有较强的富集吸收 Cd 的能力; 4 种芦蒿在低 Cd 处理下转运系数较小, 说明其向地上部运输的量非常有限, 随着 Cd 浓度的增加, 4 种芦蒿的转运系数也越来越高, 这一结果与富集系数相似, 当 Cd 处理水平达到 150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 4 种芦蒿的转运系数最大, 之后随着 Cd 处理水平继续增加, 转运系数呈下降趋势, 但仍显著高于对照。

参考文献:

- [1] 许炼烽, 郝兴仁, 冯显湘. 城市蔬菜的重金属污染及其对策[J]. 生态科学, 2000, 19(1): 80-85.
XU Lian-feng, HAO Xing-ren, FENG Xian-xiang. Heavy metal pollution of vegetable in cities and its countermeasures[J]. *Ecologic Science*, 2000, 19(1): 80-85.
- [2] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 104-107.
WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 104-107.
- [3] 朱永官. 锌肥对不同基因型大麦吸收积累镉的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1985-1988.
ZHU Yong-guan. Effect of zinc fertilization on cadmium uptake and accumulation in two barely (*Hordeum vulgare*) cultivars[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1985-1988.
- [4] 杨玉敏, 张庆玉, 张 冀, 等. 小麦基因型间籽粒镉积累及低积累资源筛选[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 342-346.
YANG Yu-min, ZHANG Qing-yu, ZHANG Ji, et al. Genotypic differences of cadmium accumulation in *Triticum aestivum* and screening of low-accumulation material[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 342-346.
- [5] 郑 海, 潘冬丽, 黎华寿, 等. 不同浓度镉污染土壤对 22 个花生品种籽粒镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1255-1266.
ZHENG Hai, PAN Dong-li, LI Hua-shou, et al. The effect of soil cadmium content on seeds cadmium content of 22 different peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars genotypes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6): 1255-1266.
- [6] 曹 莹, 赵艺欣, 刘玉莲, 等. 不同玉米品种籽粒中富集镉、铅特性的比较[J]. 玉米科学, 2011, 19(3): 94-97.
CAO Ying, ZHAO Yi-xin, LIU Yu-lian, et al. Comparison of cadmium and lead accumulation among different maize grains[J]. *Journal of Maize Science*, 2011, 19(3): 94-97.
- [7] 曹 莹, 刘 洋, 王国骄, 等. 铅-镉复合胁迫下玉米品种间积累铅、镉的差异[J]. 玉米科学, 2009, 17(1): 80-85.
CAO Ying, LIU Yang, WANG Guo-jiao, et al. Differences in lead and cadmium concentrations among plant tissues of 25 maize cultivars under

- the combined stress of lead and cadmium[J]. *Journal of Maize Science*, 2009, 17(1):80-85.
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- LI He-sheng. Plant physiological and biochemical experiment principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [9] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- ZOU Qi. Plant physiology experiment instruction[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [10] 刘燕云, 曹洪法. 酸雨和 SO_2 作用下 SOD 酶活性与菠菜叶片损伤相关性研究[J]. 应用生态学报, 1993, 4(2):223-225.
- LIU Yan-yun, CAO Hong-fa. Leaf injury and superoxide dismutase activity in spinach leaves exposed to SO_2 and/or simulated acid rain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(2):223-225.
- [11] 邹晓燕, 刘厚田. 植物对 SO_2 的敏感性与超氧化物歧化酶活性的关系[J]. 中国环境科学, 1989, 9(6):427-432.
- ZOU Xiao-yan, LIU Hou-tian. Relationship between the sensitivity of plant to SO_2 and the activity of superoxide dismutase[J]. *China Environmental Science*, 1989, 9(6):427-432.
- [12] 任安芝, 高玉葆, 刘爽. 青菜幼苗体内几种保护酶的活性对 Pb、Cd、Cr 胁迫的反应研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4):510-512.
- REN An-zhi, GAO Yu-bao, LIU Shuang. Response of some protective enzymes in *Brassica chinensis* seedlings to Pb^{2+} , Cd^{2+} and Cr^{6+} stresses[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4):510-512.
- [13] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜(*Brassica pekinensis* L.)对镉富集基因型差异的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2):226-235.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Genotypic variation of cadmium accumulation in Chinese cabbage(*Brassica pekinensis* L.)[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(2):226-235.
- [14] Mertens J, Luyssaert S, Verheyen K. Use and abuse of trace metal concentrations in plants tissue for biomonitoring and phytoextraction[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(1):1-4.
- [15] 刘军, 李先恩, 王涛, 等. 药用植物中铅的形态和分布研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2):143-145.
- LIU Jun, LI Xian-en, WANG Tao, et al. Chemical form and distribution of lead in medical plants[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(2):143-145.
- [16] Lane S D, Martin E S. A histochemical investigation of lead uptake in *Raphanus sativus*[J]. *New Phytologist*, 1977, 79(2):281-286.
- [17] 张金彪, 黄维南. 镉对植物生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(3):514-523.
- ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3):514-523.
- [18] 王凯荣, 张格丽. 农田土壤镉污染及其治理研究进展[J]. 作物研究, 2006(4):359-374.
- WANG Kai-rong, ZHANG Ge-li. Farmland soil cadmium pollution and its research progress[J]. *Crop Research*, 2006(4):359-374.
- [19] 杨永岗, 胡霁堂. 无公害蔬菜基地土壤中有害金属污染评价[J]. 环境与健康杂志, 1998, 15(5):213-214.
- YANG Yong-gang, HU Ai-tang. Assessment on the hazardous metals pollution of soil in vegetable base without public nuisance[J]. *Journal of Environment and Health*, 1998, 15(5):213-214.
- [20] 丁爱芳, 潘根兴. 南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. 生态环境学报, 2003, 12(4):409-411.
- DING Ai-fang, PAN Gen-xing. Contents of heavy metals in soils and Chinese cabbages (*Brassica chinensis*) from some urban vegetable fields around Nanjing and the human health risks[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2003, 12(4):409-411.
- [21] 陈亚华, 黄少华, 刘胜, 等. 南京地区农田土壤和蔬菜重金属污染状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3):356-360.
- CHEN Ya-hua, HUANG Shao-hua, LIU Sheng, et al. Study of the heavy metal contamination in soil and vegetables in Nanjing area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3):356-360.
- [22] 潘静娟, 李新国, 沈健, 等. Cd 污染下蒺藜生长和 Cd 蓄积特性的研究[J]. 土壤, 2006, 38(2):181-185.
- PAN Jing-xian, LI Xin-guo, SHEN Jian, et al. Growth and Cd accumulation properties of seleng wormwood in Cd-contaminated sandy soil[J]. *Soil*, 2006, 38(2):181-185.
- [23] McLaughlin M J, Bell M J, Wright G C, et al. Uptake and partitioning of cadmium by cultivars of peanut(*Arachis hypogaea* L.)[J]. *Plant and Soil*, 2000, 222(1-2):51-58.
- [24] 赵小虎, 王富华, 张冲, 等. 南方菜地重金属污染状况及蔬菜安全生产调控措施[J]. 农业环境与发展, 2007, 24(3):91-94.
- [25] Li Y M, Chaney R L, Schnitzer A A, et al. Screening for low grain cadmium phenotypes in sun flower, durum wheat and flax[J]. *Euphytica*, 1997, 94(1):23-30.