

文章编号:1001-1498(2012)01-0054-04

# Cd 及矿质营养元素在结缕草植株中的积累特性

刘俊祥, 孙振元\*, 钱永强, 巨关升, 韩蕾, 周晓星

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091)

**摘要:**以水培方法研究了镉在结缕草中的积累特性及对矿质元素含量的影响。结果表明: Cd<sup>2+</sup> 处理下结缕草根、叶中镉的分布比例为细胞壁 > 胞液 > 细胞器。低浓度(1、10 mg · L<sup>-1</sup>) 处理下, 结缕草茎细胞液中镉的比例分别较细胞壁中镉的比例高出 61.70%、69.60%; 高浓度(100 mg · L<sup>-1</sup>) 处理下, 细胞壁中镉的比例较细胞液中镉的比例高出 47.70%。低浓度(1、10 mg · L<sup>-1</sup>) 处理的结缕草地下部的镉含量显著高于地上部, 而高浓度下(100 mg · L<sup>-1</sup>) 结缕草地上部的镉含量较地下部显著提高 37.31%; 随着处理浓度的升高, 镉转运系数显著提高, 100 mg · L<sup>-1</sup> 处理下镉转运系数分别较 1、10 mg · L<sup>-1</sup> 提高了 4.12、2.45 倍。高浓度(100 mg · L<sup>-1</sup>) 处理下, 结缕草地下部 N、K、Ca、Mg 含量下降, P、S 含量有所提高。高浓度(100 mg · L<sup>-1</sup>) 镉处理下, 地上部 N 含量较对照显著上升 16.11%, Ca、Mg 的含量均较对照升高; 不同浓度镉处理的地上部 P、K、S 含量均较对照降低。

**关键词:** 镉; 矿质营养; 结缕草; 积累

中图分类号: S688.4

文献标识码: A

## The Accumulation Characteristics of Cd and Mineral Nutrition Element in *Zoysia japonica* under Cd<sup>2+</sup> Treatment

LIU Jun-xiang, SUN Zhen-yuan, QIAN Yong-qiang, JU Guan-sheng, HAN Lei, ZHOU Xiao-xing

(Research Institute of Forestry of Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The accumulation characteristics of Cd and the effects of Cd<sup>2+</sup> on mineral metabolism in *Zoysia japonica* were studied by hydroponic culture. In the leaves and roots, the proportion of Cd in cell wall was higher than that in cytosol, and the proportion of Cd in organelle was the lowest. Whereas in the stem of *Z. japonica*, the proportion of Cd in cytosol was higher than that in cell wall when the concentration of Cd<sup>2+</sup> was low (1 mg · L<sup>-1</sup> and 10 mg · L<sup>-1</sup>), the case was opposite when the concentration of Cd<sup>2+</sup> reached 100 mg · L<sup>-1</sup>. The concentration of Cd in underground was significantly higher than that in aboveground when the concentration of Cd<sup>2+</sup> was low (1 mg · L<sup>-1</sup> and 10 mg · L<sup>-1</sup>). However, when the concentration reached 100 mg · L<sup>-1</sup>, the concentration of Cd in aboveground was significantly increased by 37.31% compared with that in underground, and the transferring index was significantly increased by 4.12 and 2.45 times compared with 1 mg · L<sup>-1</sup> and 10 mg · L<sup>-1</sup>. In underground part, the N, K, Ca and Mg contents decreased, while the P and S contents increased. In aboveground part, the contents of P, K and S decreased, and the contents of N, Ca and Mg increased.

**Key words:** cadmium; mineral nutrition; *Zoysia japonica*; accumulation

目前, 重金属污染已成为一个亟待解决的问题<sup>[1-3]</sup>, 已严重破坏了生态环境, 对人类的安全、健

康存在潜在危害。镉因其高毒性、高移动性, 很容易进入食物链, 是对人类健康最具威胁的重金属。利

收稿日期: 2010-10-25

基金项目: 国家“863”项目“高产优质多抗林木花草分子与细胞育种技术(2006AA100109)”

作者简介: 刘俊祥(1981—), 男, 辽宁本溪人, 博士研究生, 研究方向为园林植物生理生态。

\* 通讯作者: 研究员, 博士生导师, 主要从事植物生理生态研究. Email: sunzy@263.net

用草坪草覆盖重金属污染的土壤,一方面可以美化环境,更重要的是可以对重金属进行固定和吸附,进而减轻土壤中重金属含量,即防止其进入食物链又对污染的土壤进行了修复。结缕草(*Zoysia japonica*)为多年生暖季型草坪草,适应性强,常被应用在条件艰苦的立地条件下进行绿化建植,结缕草对重金属镉的抗性已有报道<sup>[4]</sup>,但有关结缕草对镉富集特性的研究仍为空白。本文以水培的方法对结缕草进行镉处理,研究了结缕草根、茎、叶中镉的亚细胞分布,对镉处理下结缕草地上部、地下部镉及矿质营养元素含量的变化进行了分析,以初步明确结缕草对重金属镉的富集特性,并从镉的区域化分布与营养元素的积累两方面揭示了结缕草的抗镉机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

实验在中国林科院科研温室进行。将结缕草‘Zenith’的种子播于草炭土基质中,常规养护管理。待结缕草幼苗长至4~5分蘖时,选择长势一致的植株,将其移植到长33 cm、宽15 cm、高12 cm含5 L 1/2Hoagland 营养液的塑料盒中,每盒14株,7 d后转至全Hoagland 营养液,培养一周后进行Cd<sup>2+</sup>处理。Cd<sup>2+</sup>由CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O(分析纯)提供。处理液以全Hoagland 营养液配制,Cd<sup>2+</sup>浓度分别为0、1、10、100 mg·L<sup>-1</sup>,pH值为6.0,3 d更换1次。培养和处理过程中,利用气泵不间断向营养液通气。每处理2盒,重复3次。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 亚细胞组分分离** 处理第11天,每处理随机取结缕草6株。根系用10 mmol·L<sup>-1</sup>Na<sub>2</sub>-EDTA溶液浸泡15 min,以去除表面吸附的金属离子。将植株分为根、茎、叶三部分,去离子水洗净,滤纸吸干。分别取根、茎、叶鲜样1 g,用20 mL预冷的缓冲液匀浆化,缓冲液的组成为:蔗糖250 mmol·L<sup>-1</sup>,Tris-HCl(pH值7.5)50 mmol·L<sup>-1</sup>,β-巯基乙醇(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>S<sub>2</sub>)1 mmol·L<sup>-1</sup>,Mg<sup>2+</sup>10 mmol·L<sup>-1</sup>,Ca<sup>2+</sup>1 mmol·L<sup>-1</sup>。将匀浆用差速离心法分为细胞壁、细胞器和细胞液三部分<sup>[5]</sup>。细胞壁、细胞器组分用1:4(V/V)的HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>混合消煮,定容、过滤,用石墨炉原子吸收分光光度计测定镉含量;细胞液为可溶组分,无需消化,直接用石墨炉原子吸收分光光度计法测定镉含量。

**1.2.2 元素含量测定** 处理第33天,每处理随机

选取结缕草6株。根系用10 mmol·L<sup>-1</sup>Na<sub>2</sub>-EDTA溶液浸泡15 min,以去除表面吸附的金属离子。将植株地上部和地下部分开,去离子水洗净,105℃杀青20 min,70℃烘干至恒质量。烘干的地上部、地下部样品消煮完全后,定容、过滤,用流动注射分析仪测定N、P含量,用火焰原子吸收分光光度计测定Cd、K、Ca、Mg、S含量。

镉转运系数=地上部Cd含量/地下部Cd含量。

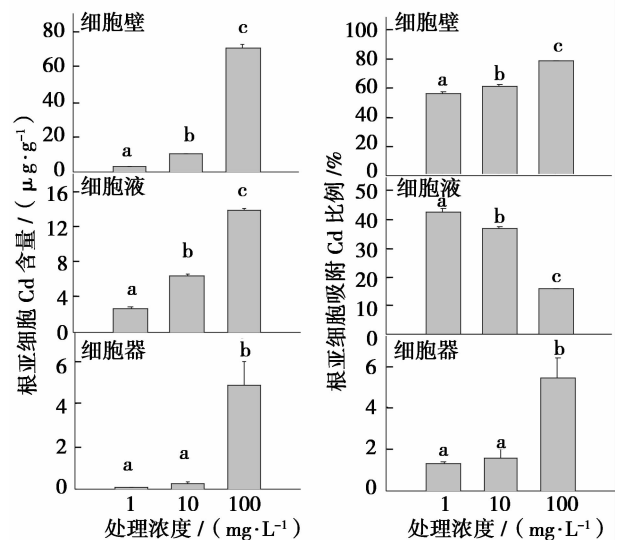
### 1.3 数据处理

用EXCEL2007整理实验数据,用SPSS13.0进行方差分析和Duncan多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 结缕草根、茎、叶中镉的亚细胞分布

由图1可知:镉处理下,根细胞壁、细胞液和细胞器中镉的含量显著升高。随着处理浓度的升高,细胞壁和细胞器中吸附镉的比例显著提高,细胞液中镉的比例显著下降,各浓度下根中亚细胞吸附镉的比例均为细胞壁>细胞液>细胞器。



图中不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图1 结缕草鲜根各亚细胞组分Cd含量及比例

由图2可知:茎中亚细胞镉含量的变化趋势与根相同,随着处理浓度的升高,各亚细胞组分的镉含量显著增加。细胞壁吸附镉的比例显著增加,细胞液中镉的比例则显著降低,细胞器无显著变化。处理浓度为1、10 mg·L<sup>-1</sup>时,细胞液中镉的比例最大;浓度升至100 mg·L<sup>-1</sup>时,细胞壁吸附镉的比例上升,大于细胞液所占的比例。

由图3可知:各浓度Cd<sup>2+</sup>处理下,结缕草鲜叶细胞

壁、细胞液中的镉含量均呈现出显著升高的趋势。与根相同,各处理下细胞壁吸附镉的比例始终最高。

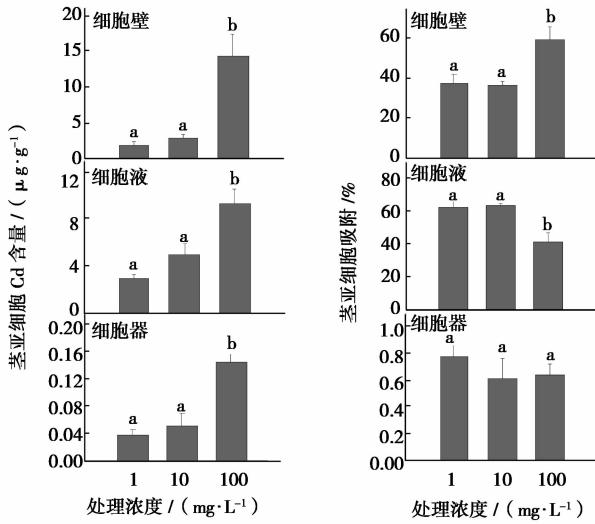


图2 结缕草鲜茎各亚细胞组分 Cd 含量及比例

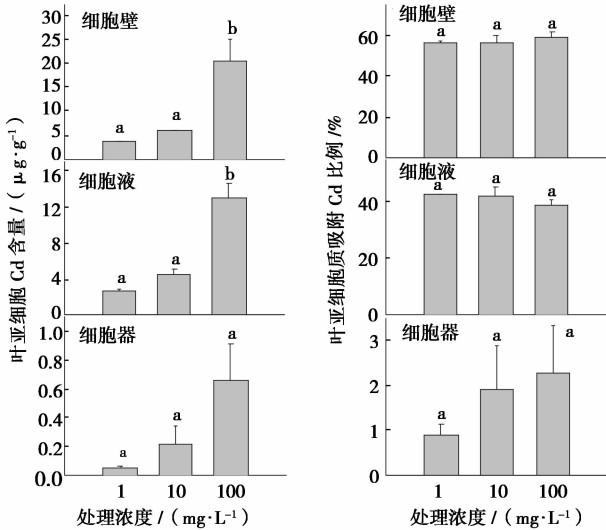


图3 结缕草鲜叶各亚细胞组分 Cd 含量及比例

## 2.2 镉在结缕草中的积累特性

图4表明:镉处理下,结缕草地上部、地下部镉的含量显著升高,浓度升至 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,地上部镉含量较地下部显著上升 $37.32\%$  ( $P=0.017$ ),因此,转运系数在 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时显著提高。

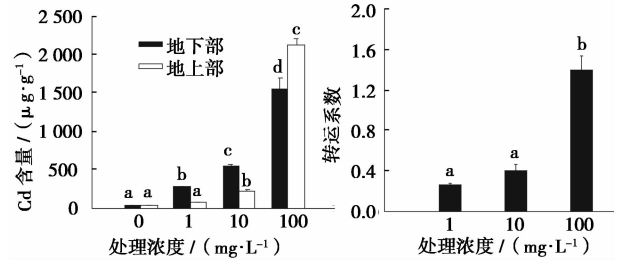


图4 结缕草中 Cd 含量及镉的转运系数

## 2.3 镉对结缕草矿质营养元素含量的影响

由表1可知:镉处理下,地下部 N、Mg 的含量先升后降, P、S 的含量先降后升, K 的含量逐渐降低, Ca 的含量在镉处理浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时高于对照,其他浓度则低于对照。镉处理浓度对这些矿质营养元素的影响均不显著。

表2表明: $\text{Cd}^{2+}$ 处理下,结缕草地上部 N 含量显著升高,镉浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,地上部 N 含量较对照显著上升了 $16.11\%$ 。镉处理下, P、K、S 的含量有所下降, Ca、Mg 的含量先降低后升高。

## 3 结论与讨论

结缕草在镉浓度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,地上部镉含量为 $219.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,镉浓度升高至 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,转运系数大于1,地上部镉含量为 $2134.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,均超出 Brooks<sup>[6]</sup>对镉超富集植物定义中的浓度阈值;因此,结缕草具备了重金属修复植物的潜在特性。

重金属胁迫下,植物会触发一系列的适应性生理响应以增强对重金属毒害的耐受能力,其中,限制重金属的吸收、区域化重金属的分布在植物抵抗重金属毒性中发挥了重要作用<sup>[7]</sup>。低浓度胁迫下,结缕草吸收的镉主要积累在地下部,转运至地上部的较少,减轻了镉对地上部的伤害,增加了植物的耐性<sup>[8]</sup>。镉浓度增至 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,结缕草中镉的分布格局被改变,地下部的镉大量转运至地上部,一方面可能是地下部的镉浓度过高,超出了根系的耐受范围;另一方面可能是叶片将镉进行了区域化分布或是螯合固定,能够接收更多的镉离子。低浓

表1  $\text{Cd}^{2+}$ 对结缕草地下部(鲜)矿质元素含量的影响

$\text{Cd}^{2+}$ 浓度 / (mg·L <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg	S
0	11.76 ± 0.19a	5.28 ± 0.21a	5.72 ± 0.20a	2.84 ± 0.71a	1.33 ± 0.36a	3.21 ± 0.91a
1	12.22 ± 0.37a	4.55 ± 0.15a	5.70 ± 0.40a	1.83 ± 0.27a	1.48 ± 0.38a	3.11 ± 0.39a
10	11.38 ± 0.69a	5.21 ± 0.68a	4.92 ± 0.57a	3.09 ± 0.46a	1.07 ± 0.13a	4.34 ± 1.62a
100	10.56 ± 0.28a	5.64 ± 0.14a	4.34 ± 0.37a	2.42 ± 0.30a	0.86 ± 0.03a	6.00 ± 1.96a

注:表中数据为均值 ± 标准差,同列间不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

表 2 Cd<sup>2+</sup> 对结缕草地上部矿质元素含量的影响(均值 ± 标准差, mg · g<sup>-1</sup>)

Cd <sup>2+</sup> 浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg	S
0	20.48 ± 0.96a	3.64 ± 0.23a	15.56 ± 0.40a	3.150 ± 0.26a	2.10 ± 0.11a	2.05 ± 0.12a
1	20.80 ± 0.44a	3.12 ± 0.08a	13.83 ± 0.97a	2.60 ± 0.22a	1.83 ± 0.06a	1.71 ± 0.12a
10	23.07 ± 0.75ab	3.08 ± 0.06a	13.51 ± 0.41a	2.92 ± 0.47a	2.48 ± 0.25a	1.78 ± 0.16a
100	23.78 ± 0.86b	3.40 ± 0.11a	14.08 ± 0.69a	3.85 ± 0.25a	2.49 ± 0.13a	1.70 ± 0.11a

度(1、10 mg · L<sup>-1</sup>)镉处理下,茎中胞液吸附镉的比例大于细胞壁,茎中胞液的镉包括了韧皮部和木质部汁液中运输的镉,因此胞液中的镉含量较高。Cd<sup>2+</sup>浓度为 100 mg · L<sup>-1</sup>时,镉在茎细胞壁中的比例大于胞液。细胞壁能将重金属离子隔离在胞外<sup>[9]</sup>,提供大量的离子交换点<sup>[10]</sup>,进而降低进入原生质体的重金属离子数量。在镉超富集植物东南景天中,细胞壁中的 Cd 占绝大部分,细胞器和胞液所含的 Cd 较少<sup>[8]</sup>。本研究结果表明,在结缕草根、茎、叶中,细胞壁吸附镉的比例最大,其次为细胞液和细胞器,结缕草的根、茎、叶均可通过细胞壁的区域化作用降低镉的毒性。

镉会影响矿质营养在植物中的积累和分布<sup>[11-14]</sup>。Cd 抑制了玉米 (*Zea mays* L.) 幼苗对 N、P 的吸收,增加了对 Ca 的吸收<sup>[15]</sup>;在多年生黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 根部,镉对 Ca、Mg 的吸收具有拮抗作用,对 P、S 的吸收具有协同作用<sup>[16]</sup>。与对照相比,结缕草地下部 N、K、Ca、Mg 的含量降低,P、S 含量升高;地上部 P、K、S 的含量降低, N、Ca、Mg 的含量升高。镉处理下,结缕草的蒸腾速率、光合速率显著降低<sup>[17]</sup>,一方面减少了矿质元素在蒸腾拉力作用下向地上部的运输;一方面减少了同化物的积累,间接降低了主动运输的能量供应。此外,Cd<sup>2+</sup>可以通过 Ca<sup>2+</sup>的离子通道转运至细胞内,阻碍了植物对 Ca<sup>2+</sup>的吸收<sup>[18]</sup>;质子泵的活性也受 Cd<sup>2+</sup>的抑制<sup>[19]</sup>等,这些都可能是地下部 N、K、Ca、Mg 含量降低的原因。镉胁迫下植物会增强对硫的吸收,用于合成半胱氨酸、谷胱甘肽和植物螯合肽等巯基类金属络合物,以络合镉离子,降低镉对植物的毒性<sup>[20]</sup>。因此,地下部 S 含量的升高,可能与结缕草根系应激加速巯基化合物的合成有关。地下部 P 含量的提高,一方面与保持植物体内阴阳离子平衡有关,一方面与对重金属有高亲和力的植酸合成有关<sup>[21]</sup>。地下部直接暴露于镉处理液中,受镉处理的直接影响。与地下部不同,镉对结缕草地上部生理代谢的影响受着地下部的调控和制约,P、S 可能被限制于地下部用于植物络合素的合成,而 N、Ca、Mg 是叶片进行光合作用的必需元素,其含量的提高对保证叶片的同化功能有积极作用。

## 参考文献:

[1] Eugenia G G, Vicente A, Rafael B. Heavy metals incidence in the

- application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soil [J]. *Environmental Pollution*, 1996, 92(1): 19-25
- [2] Grant C A, Buckley W T, Bailey L D, *et al.* Cadmium accumulation crops [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1998, 78: 1-17
- [3] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients-food safety issues [J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 143-163
- [4] 张 绵. 结缕草在镉污染农田上开发与应用的研究 [J]. *植物研究*, 2002, 22(4): 467-472
- [5] Weigel H J, Jager H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants [J]. *Plant physiology*, 1980, 65: 480-482
- [6] McGrath S P. Phytoextraction for soil remediation [M] // Brooks R. *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals*. CAB International: Wallingford, UK, 1998
- [7] 杨居荣, 鲍子平, 张素芹. 镉、铅在植物细胞内的分布及其可溶性结合形态 [J]. *中国环境科学*, 1993, 13(4): 263-268
- [8] Nith W. Subcellular distribution of cadmium in mining ecotype *Sedum alfredii* [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(5): 925-928
- [9] Rauserw E. Structure and function of metal chelators produced by plants [J]. *Cell Biochem and Biophys*, 1999, 31: 19-48
- [10] Allen D L, Jarrell W M. Proton and copper adsorption to maize and soybean root cell walls [J]. *Plant Physiology*, 1989, 89: 823-832
- [11] Ouari O, Gouia H, Ghorbal M H. Response of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition and nitrate reduction [J]. *Plant Physiol Biochem*, 1997, 35: 347-354
- [12] Moral R, Gomez I. Effect of cadmium on nutrient distribution yield and growth of tomato grown in soilless culture [J]. *Plant Nutrition*, 1994, 17(6): 953-962
- [13] 宋 瑜, 曹宗英, 王晓娟. 植物对重金属镉的响应及耐受机理 [J]. *草业学报*, 2008, 17(5): 84-91
- [14] 万雪琴, 张 帆, 夏新莉, 等. 镉胁迫对杨树矿质营养吸收和分配的影响 [J]. *林业科学*, 2009, 45(7): 46-51
- [15] 王焕校. *污染生态学基础* [M]. 云南: 云南大学出版社, 1990: 71-148
- [16] 杨明杰, 林成永, 杨肖娥. Cd 对不同种植物生长和养分积累的影响 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(1): 89-94
- [17] 刘俊祥, 孙振元, 巨关升, 等. 重金属 Cd<sup>2+</sup> 对结缕草叶片光合特性的影响 [J]. *核农学报*, 2009, 23(6): 1050-1053
- [18] Hinkle P M, Kinsella P A, Osterhoudt K C. Cadmium uptake and toxicity via voltage sensitive calcium [J]. *Journal Biology Chemistry*, 1987, 262: 16333-16337
- [19] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis [J]. *Planta*, 2001, 212: 475-486
- [20] Pereira G J G, Molina S M G, Lea P J. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea* [J]. *Plant and Soil*, 2002, 239: 123-132
- [21] Marschner H. *Macronutrients in Mineral Nutrition of Higher Plants* [M] // Marschner. *Function of Mineral*. 2<sup>nd</sup> Edition. London: Academic NIC, 1995: 265-277