

氯化钙对互花米草镉积累及胁迫的影响*

何真真¹ 柴民伟¹ 魏 远¹ 刘立民² 石福臣^{1**}

(¹南开大学生命科学学院, 天津 300071; ²天津港环保卫生管理中心, 天津 300071)

摘 要 采用蛭石盆栽试验研究了低、中、高浓度 CaCl_2 对互花米草 Cd 积累与胁迫的影响。结果表明, 在 $200 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ CdCl_2 浓度下, 互花米草的株高、分蘖数、过氧化氢酶活性、地上和地下部分干重都有所降低, 脯氨酸含量显著升高; 在 $200 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ CdCl_2 浓度下添加 CaCl_2 以后, 随着 CaCl_2 浓度的增加, 互花米草的株高、分蘖数、地上干重、地下干重和过氧化氢酶活性呈现先增长后降低的变化, 说明一定的 Ca 浓度增加了互花米草耐受 Cd 的能力。与单独 CdCl_2 胁迫相比, CaCl_2 的添加降低了互花米草脯氨酸含量, 缓解了重金属 Cd 对互花米草的毒害作用。互花米草体内的 Cd 主要积累在地下部分, 随着 CaCl_2 浓度的增加, 互花米草地上和地下部分 Cd 含量及转运系数均显著升高, 说明 CaCl_2 对 Cd 有一定的活化作用, 能够提高互花米草对重金属 Cd 的吸收积累和向地上部分的转运能力。

关键词 胁迫; 植物修复; 解毒作用; 转运系数

中图分类号 Q945. 78 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)6-1571-07

Effects of CaCl_2 on the Cd accumulation and stress of *Spartina alterniflora*. HE Zhen-zhen¹, CHAI Min-wei¹, WEI Yuan¹, LIU Li-min², SHI Fu-chen^{1**} (¹College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China; ²Environmental Health Management Center of Tianjin Port, Tianjin 300071, China). Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(6): 1571–1577.

Abstract: A vermiculite pot culture experiment was conducted to study the effects of low, medium, and high concentrations of CaCl_2 on the Cd accumulation and stress of *Spartina alterniflora*. At $200 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ of CdCl_2 , the *S. alterniflora* plant height, tiller number, catalase activity, and shoot- and root dry weights decreased somewhat, while the plant proline content increased significantly. With the supplement of increasing concentration of CaCl_2 , the plant height, tiller number, catalase activity, and shoot- and root dry weights decreased after an initial increase, indicating that definite concentration of CaCl_2 increased the Cd tolerance of *S. alterniflora*. As compared with CdCl_2 stress alone, the supplement of CaCl_2 decreased the plant proline content, suggesting the mitigation effect of CaCl_2 on the toxic effect of Cd on *S. alterniflora*. The Cd was mainly accumulated in the underground part of *S. alterniflora*. With the increasing concentration of supplemented CaCl_2 , the Cd concentration in the above- and underground parts of *S. alterniflora* and the Cd transfer coefficient increased significantly, suggesting that CaCl_2 had definite activation effect on Cd, and helped to increase the capability of *S. alterniflora* in absorbing Cd and transporting the Cd to the plant aboveground part.

Key words: stress; phytoremediation; detoxification; transfer coefficient.

近年来,随着经济的高速发展,工业生产及人类活动产生的重金属污染物在土壤中逐渐累积。河口湿地作为陆海交互作用的重要界面,受到重金属污染的影响程度尤为严重。渤海湾底部的海河入海

口,由于上游及本市工业废水和生活污水的排放,使滨海湿地遭受 Cd、Pb、Zn 等重金属的污染 (Meng *et al.*, 2008)。作为一种常见的重金属污染物, Cd 不仅可以在植物根、茎、叶及籽粒中大量积累,严重地影响植物的生长和发育 (Dong *et al.*, 2005), 还能通过食物链的生物富集作用被人体摄入,具有致癌、致畸、致突变作用 (邓新等, 2010)。

* 国家科技基础性工作专项 (2007FY110500-08) 和天津港科技计划项目资助。

** 通讯作者 E-mail: feshi@nankai.edu.cn

收稿日期: 2012-11-13 接受日期: 2013-03-12

一些植物可以吸收积累重金属化合物,而本身的生长不受或少受影响。利用绿色植物清除环境中的重金属污染物,使其有害性降低或消失的方法,称为植物修复技术(黄铮等,2007),植物对土壤重金属污染的修复包括植物降解、植物提取、植物挥发、根系钝化以及植物固定(冯颖俊和孙龙仁,2009)。东南景天可以大量吸收重金属 Cd (Zhang *et al.*, 2010)。芦苇、白芒、蒲公英和蜈蚣草对 Pb 和 Zn 有较好的富集能力(路畅等,2010)。

互花米草(*Spartina alterniflora*)是一种多年生草本植物,具有耐盐(肖燕等,2011)、耐淹水(邓自发等,2010)、繁殖能力强(苑泽宁等,2008)等特征,对特定的重金属有一定的富集固定作用(柴民伟等,2011)。有研究表明,互花米草可以吸收土壤中重金属 Cd,而不影响生长(潘秀等,2012)。因此,种植互花米草可以有效减轻重金属污染。如何增加互花米草对重金属的富集,同时使其生长不受或少受影响成为一个值得考虑的课题。

作为植物必需的大量营养元素,Ca 可缓解水分胁迫、低温胁迫、盐胁迫等对植物的伤害(史跃林等,1995;杨根平等,1995;李美如等,1996)。施加钙离子可以减轻白三叶草的 Cd 胁迫(Wang & Song, 2009)。在植物抗逆境过程中,Ca 作为耦联胞外信号与胞内生理生化反应的第二信使起作用,外界刺激启动 Ca 信使系统使胞质中 Ca 浓度发生改变(Pcovalah & Reddy, 1993),从而诱导 Cd 结合蛋白的形成。大量研究表明,土壤中施加 Ca 可以减少植物对重金属的吸收和富集:如 CaCl₂ 的加入减少了挪威云杉对重金属 Cd 的吸收(Österås & Greger, 2003),CaCO₃ 与 Cd 混合处理的玉米全 Cd 含量较单独 Cd 处理明显减少(周卫等,2001),施加 Ca 对 Cd 的土壤有效性和小油菜的吸收均有明显的影响,减少了小油菜对 Cd 的吸收(宋正国等,2009)。但是,也有研究表明,CaCl₂ 处理还可以增加水稻对 Cd 的吸收(胡坤等,2011)。因此,Ca 对于植物吸收 Cd 的作用可能因不同植物而异。

本研究探讨了 CaCl₂ 和 CdCl₂ 交互作用下,互花米草对重金属 Cd 的富集吸收效率,为今后治理湿地生态系统重金属污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料及处理

2011 年 6 月 11 日于天津滨海地区(38°33'N—

40°14'N,116°42'E—118°03'E)采集互花米草实生苗带回培养,此时幼苗约 4~5 片叶。采样地点土壤为滨海沼泽盐土,平均含盐量为 2%~3%。选择高度一致、生长情况相近的幼苗移栽到盛有 600 g 蛭石的培养盆中,每盆定苗 2 株。每周每盆补充 100 mL Hoagland 营养液,定期补水。为了保证实验材料生理状态的一致性,培养 1 个月,待幼苗复壮后,7 月 10 日,对互花米草进行 CdCl₂ 和 CaCl₂ 的处理,设置 1 个 CdCl₂ 浓度梯度(200 μg·g⁻¹)和 3 个 CaCl₂ 浓度梯度,即低浓度 199.8 μg·g⁻¹(= 3 μmol·mL⁻¹)、中浓度 990 μg·g⁻¹(= 15 μmol·mL⁻¹)、高浓度 3330 μg·g⁻¹(= 50 μmol·mL⁻¹),CdCl₂ 和 CaCl₂ 都以水溶液的形式均匀添加到蛭石里,对照组不添加 CdCl₂ 和 CaCl₂,每个梯度设置 3 个重复。各实验组合如表 1 所示。实验于室外有避雨设施的试验场内进行,每周每盆添加 100 mL Hoagland 营养液且定期补水。

1.2 数据的测定及处理

处理 1 个月后,测定每盆植株的株高、分蘖数;采集互花米草的叶,带回实验室,测定生理指标(李玲等,2009);收获植株,分成地上、地下两部分,先用蒸馏水冲洗,于烘箱中 80 °C 烘干,粉碎,测定干重。取 0.5 g 干样,经 HNO₃-HClO₄ 消化法消解后,用原子吸收分光光度计(TAS-990)测定植株 Cd 含量(黄朝表等,2004)。

转运系数表示植物对重金属从地下部分转移到地上部分的有效程度,即植物地上与根部重金属含量的比值(Windham *et al.*, 2001)计算公式(Marchiol *et al.*, 2004; Tiwari *et al.*, 2011)如下:

$$TF = C_{\text{aerial}} / C_{\text{root}}$$

式中,C_{aerial} 为植物地上部分重金属含量(μg·g⁻¹),C_{root} 为植物地下部分重金属含量(μg·g⁻¹)。

所测数据以 3 次重复后的平均值±标准误差

表 1 不同 Cd 和 Ca 处理的实验设计(μg·g⁻¹)
Table 1 Experimental design of different Cd and Ca treatments

处理组	CdCl ₂ 浓度	CaCl ₂ 浓度
CK	0	0
Cd	200	0
Ca-1&Cd	200	199.8
Ca-2&Cd	200	990
Ca-3&Cd	200	3330

示,数据处理采用软件 Excel 及 SPSS 17。利用 one way ANOVA 单因素方差分析中的 Duncan 多重比较方法对数据进行差异性显著分析,差异显著水平为 $\alpha=0.05$ 。用 S-N-K 双因素方差分析方法对数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 CdCl₂、CaCl₂处理对互花米草株高、分蘖数的影响

由图 1 可见,CdCl₂处理下的互花米草幼苗株高显著低于对照组 ($P<0.05$),说明该浓度重金属 Cd 阻碍了互花米草的生长。相比单独 CdCl₂ 处理,加入低浓度 CaCl₂ 可以提高 CdCl₂ 处理下互花米草的株高,中浓度 CaCl₂ 则对株高的影响不显著,高浓度 CaCl₂ 反而降低了 Cd 处理下互花米草的株高。表明,适量浓度 CaCl₂ 的加入可以缓解由于重金属 Cd 引起的互花米草株高的降低,但是,过高浓度 CaCl₂ 的加入反而会加剧株高的降低,造成更大的盐胁迫作用。

200 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ CdCl₂ 处理下互花米草的分蘖数少于对照组的分蘖数,且差异显著 ($P<0.05$),说明此

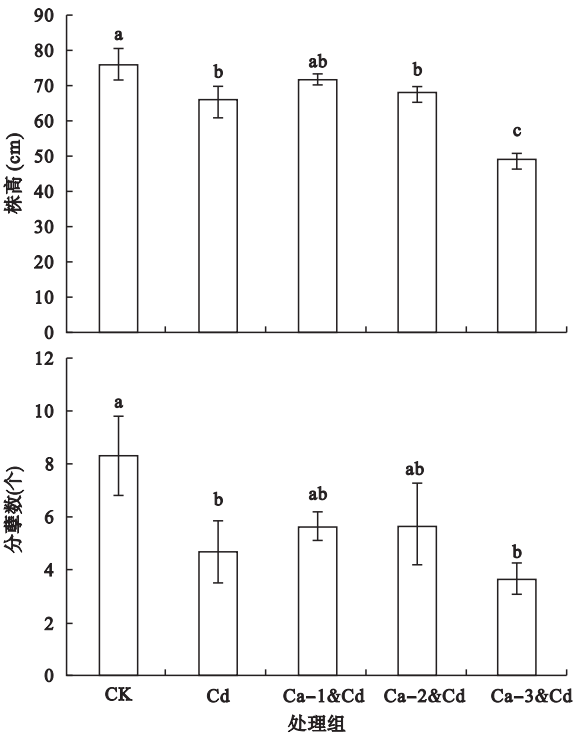


图 1 不同浓度 CdCl₂、CaCl₂处理下互花米草株高、分蘖数的变化
Fig.1 Plant height and tillering number of *Spartina alterniflora* under different CdCl₂, CaCl₂ treatments

浓度下重金属 Cd 影响了互花米草无性繁殖的能力。不同浓度 CaCl₂ 的加入对互花米草分蘖数影响不同:低、中浓度 CaCl₂ 可以增加 Cd 胁迫下互花米草的分蘖数,而高浓度 CaCl₂ 反而会减少分蘖数,影响植物的生长。

2.2 不同浓度 CdCl₂、CaCl₂处理对互花米草生物量的影响

由图 2 可见,互花米草地上、地下部分干重在各种处理组下,呈现相同的变化趋势。与对照组相比,CdCl₂ 单独处理下的互花米草生物量显著降低 ($P<0.05$),说明该浓度的 CdCl₂ 影响了互花米草的生长。加入低、中浓度 CaCl₂ 使互花米草地上、地下部分干重较 CdCl₂ 单独处理时有所提高,其中,低浓度 CaCl₂ 对增加互花米草干重的作用较明显。高浓度 CaCl₂ 则起相反的作用。

2.3 不同浓度 CdCl₂、CaCl₂处理对互花米草脯氨酸含量的影响

由图 3 可见,单独 CdCl₂ 处理下,互花米草叶片中脯氨酸含量显著增加,表明互花米草处于胁迫状态。而在 CaCl₂ 与 CdCl₂ 交互作用下,叶片中脯氨酸的含量显著下降 ($P<0.05$),表明CaCl₂ 对于互花米

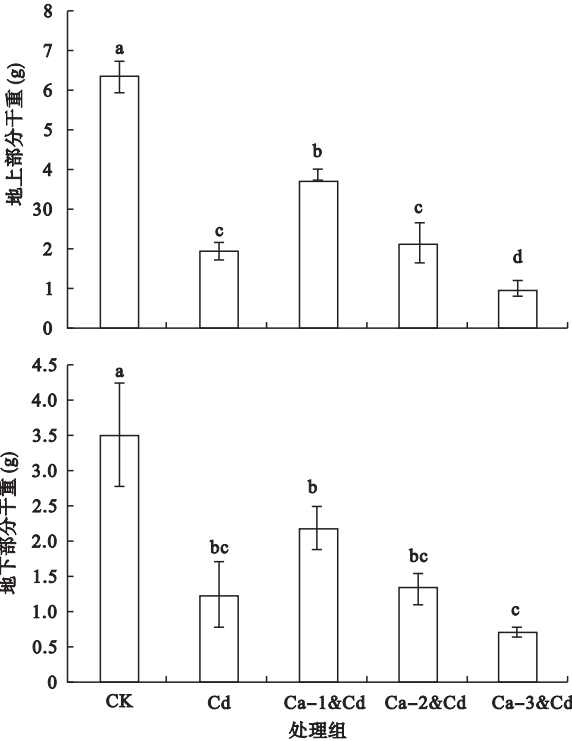


图 2 不同浓度 CdCl₂、CaCl₂处理下互花米草地上、地下部分干重的变化
Fig.2 Above- and under-ground dry weight of *Spartina alterniflora* under different CdCl₂, CaCl₂ treatments

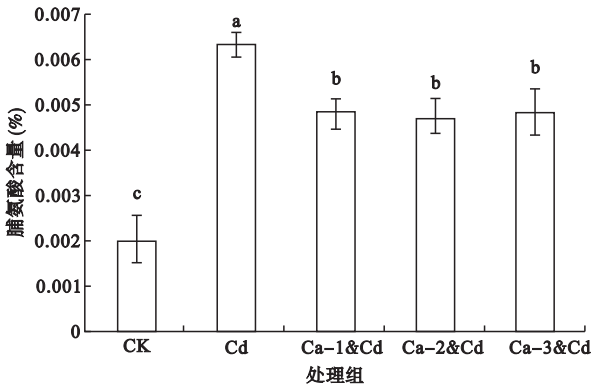


图 3 不同浓度 CdCl_2 、 CaCl_2 处理下互花米草叶脯氨酸含量的变化
Fig. 3 Pro contents of *Spartina alterniflora* under different CdCl_2 , CaCl_2 treatments

草 CdCl_2 胁迫有明显的缓解作用。

2.4 不同浓度 CdCl_2 、 CaCl_2 处理下互花米草过氧化氢酶含量的影响

由图 4 可见,较 CdCl_2 单独处理而言,低浓度 CaCl_2 的加入显著增加了互花米草叶中过氧化氢酶含量。中、高浓度 CaCl_2 对互花米草叶中过氧化氢酶含量的增加作用不显著。

2.5 不同浓度 CdCl_2 、 CaCl_2 处理对互花米草吸收、积累、转运重金属的影响

由图 5 可见,随着 CaCl_2 浓度的增加,互花米草地上、地下部分 Cd 含量均呈现增加的趋势,地上部分 Cd 含量增加幅度更加显著。说明 CaCl_2 促进互花米草富集重金属 Cd,且 CaCl_2 的浓度越大,促进作用越明显。值得注意的是,CK 组未经 CdCl_2 处理,仍含有少量 Cd,这是因为,野外采集的幼苗已经富集了污染土壤中的 Cd。

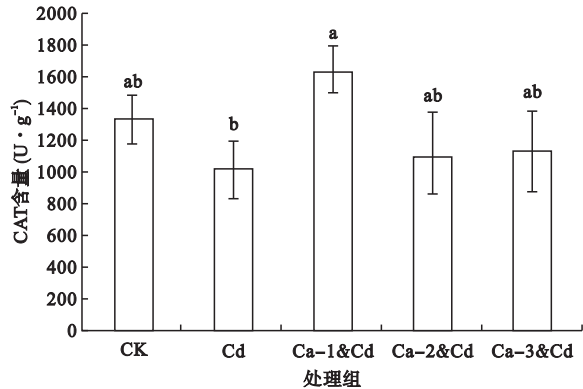


图 4 不同浓度 CdCl_2 、 CaCl_2 处理下互花米草叶中过氧化氢酶含量的变化
Fig. 4 CAT contents of *Spartina alterniflora* under different CdCl_2 , CaCl_2 treatments

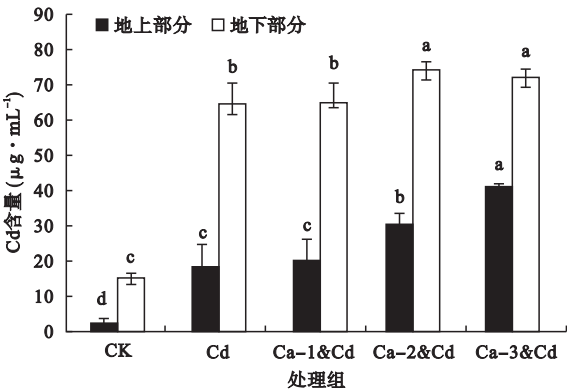


图 5 不同浓度 CdCl_2 、 CaCl_2 处理下互花米草地上、地下部分重金属 Cd 含量的变化
Fig. 5 Above- and under-ground Cd contents of *Spartina alterniflora* under different CdCl_2 , CaCl_2 treatments

由图 6 可见,随着 CaCl_2 浓度的增加,互花米草地上、地下部分 Cd 积累量呈现先增加后降低的趋势,表明低浓度 CaCl_2 可增加重金属 Cd 在互花米草中的积累量,中、高浓度的 CaCl_2 反而不利于互花米草积累重金属 Cd。CK 组中互花米草积累的 Cd,是采集前在野外污染土壤中吸收的。

由表 2 可见,单独施用 CdCl_2 时,转运系数较小,此时植物将 Cd 富集在根中,转运至地上部分 Cd 的

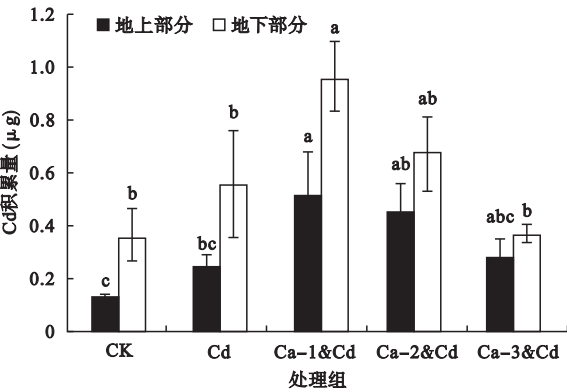


图 6 不同浓度 CdCl_2 、 CaCl_2 处理下互花米草地上、地下部分 Cd 积累量的变化
Fig. 6 Above- and under-ground Cd accumulation of *Spartina alterniflora* under different CdCl_2 , CaCl_2 treatments

表 2 不同浓度 CdCl_2 、 CaCl_2 处理下互花米草的转运系数
Table 2 Transport coefficient of Cd in *Spartina alterniflora* under different CdCl_2 , CaCl_2 treatments

Cd、Ca 浓度组合	转运系数
CK	0.21
Cd	0.29
Ca-1&Cd	0.31
Ca-2&Cd	0.41
Ca-3&Cd	0.57

表3 CdCl₂ (Cd), CaCl₂ (Ca) 及其相互作用对互花米草生长、生理特点和 Cd 积累的双因素方差分析 (F 值)
Table 3 Two-way ANOVA (F values) of CdCl₂ (Cd), CaCl₂ (Ca) and the interaction of CdCl₂ (Cd), CaCl₂ (Ca) on the growth, physiological characteristics and Cd accumulation of *Spartina alterniflora*

项目	Cd	Ca
株高	19.39 **	36.05 **
分蘖数	15.13 *	2.06
地上部分干重	243.91 **	31.37 **
地下部分干重	41.89 **	5.92 *
脯氨酸含量	161.33 **	10.51 **
过氧化氢酶含量	3.48	5.77 *
地上部分 Cd 含量	26.92 **	24.26 **
地下部分 Cd 含量	545.75 **	10.80 **
地上部分 Cd 积累量	1.96	5.60 *
地下部分 Cd 积累量	2.99	10.32 *
转运系数	2.29	11.67 **

* P<0.05, ** P<0.01。

量较少,以减轻 Cd 对植物地上部分生长发育和繁殖的不良影响。混合施用 CaCl₂,互花米草对 Cd 的转运系数变大,且转运系数与 CaCl₂ 浓度呈正相关关系,说明 CaCl₂促进了互花米草将重金属 Cd 从地下部分向地上部分运输,且浓度越大,促进作用越明显。

由表3可知,Cd 对互花米草的株高、地上/地下部分干重、脯氨酸含量、地上/地下部分 Cd 含量均有极显著的影响,Cd 对互花米草的分蘖数有显著影响,Cd 对互花米草过氧化氢酶含量、地上/地下部分 Cd 积累量、转运系数影响均不显著;Ca 对互花米草的株高、地上部分干重、脯氨酸含量、地上/地下部分 Cd 含量、转运系数均有极显著影响,Ca 对互花米草的地下部分干重、过氧化氢酶含量、地上部分 Cd 积累量均有显著影响,Ca 对互花米草分蘖数影响不显著。

3 讨 论

植物对重金属的吸收效率受多种因素的影响 (Tyler & McBride,1982),如土壤类型、植物种类、土壤 pH 值高低、重金属离子之间的相互作用以及重金属离子与必需矿质元素之间的相互作用等 (陈怀满和郑春荣,1994; Tyler & Olsson, 2001; 黄益宗, 2004;宋正国,2006)。钙离子作为植物生长所必需的营养元素,参与气孔运动、光合作用、光敏色素反应等生理过程,也具有稳定膜结构的功能,是膜的保护器,对保护酶的活性也有一定的促进作用 (苏梦

云和范铭庆,2000)。Ca 还能促进脯氨酸的合成,脯氨酸是生物界分布广泛的渗透保护物质之一,它可以清除自由基,对于逆境胁迫有一定的缓解作用。本研究中,互花米草叶内脯氨酸含量在 CaCl₂ 和 CdCl₂ 交互作用比单独 CdCl₂ 作用时下降,表明 CaCl₂ 减轻了 CdCl₂对互花米草的胁迫。互花米草有两种繁殖方式,即有性繁殖和无性繁殖 (苑泽宁等, 2008;马俊改和石福臣,2011)。互花米草依靠根部产生分蘖进行无性繁殖,因此,根部分蘖数的多少可以代表其无性繁殖的能力。本研究中,低、中、高浓度 CaCl₂与 200 μg · g⁻¹ CdCl₂交互作用使互花米草分蘖数较 CdCl₂单独作用时增加,表明 CaCl₂促进互花米草的无性繁殖。此外,低浓度 CaCl₂与 200 μg · g⁻¹ CdCl₂交互作用与 200 μg · g⁻¹ CdCl₂单独作用相比,互花米草的分蘖数、生物量和过氧化氢酶 (CAT)活性也均升高。这表明,Ca 从一定程度上减轻了重金属 Cd 胁迫对互花米草的伤害。

植物对重金属的解毒作用也多与钙离子相关。有研究表明,烟草对 Cd 的解毒作用是通过形成 Ca-Cd 结晶来实现,并经由毛状体排出体外 (Choi *et al.*, 2001)。Cd 与 Ca 共用 Ca 通道进入细胞内 (Hinkle *et al.*, 1987),进而打乱植物正常代谢,造成植物生长受阻甚至萎蔫死亡 (Perfus-Barbeoch *et al.*, 2002)。然而,Ca 与 Cd 同为二价金属阳离子,可与 Cd 竞争植物根系上的吸收位点,影响植物吸收重金属 Cd。由于植物对重金属 Cd 的吸收受植物种类的影响,同时,土壤中 Ca 的添加剂存在不同的形式,如硝酸盐形式、盐酸盐形式等,因此,不同植物在添加不同 Ca 盐的情况下,对 Cd 的吸收效率是不同的。大量研究表明,Ca 对 Cd 的吸收起抑制作用:培养液中加入 CaCl₂与不加入 CaCl₂相比,拟南芥幼苗吸收重金属 Cd 的量减少了 1/3 (Suzukia, 2005);外源 CaCl₂的加入对水花生吸收 Cd 有抑制作用,Ca 离子促进 Cd 结合蛋白的形成,从而缓解 Cd 对植物体的伤害 (刘华,2003)。但也有研究表明:CaCl₂阻止重金属 Cd 向地上部分运输,但根部含量不受影响 (汪洪等,2001);CaCl₂处理增加了水稻对 Cd 的吸收 (胡坤等,2011)。本研究中,不同浓度 CaCl₂的加入均增加了互花米草地上、地下部分吸收富集重金属 Cd 的量,且 CaCl₂浓度越高,互花米草对重金属 Cd 的转运系数越大,表明适当增加 CaCl₂的浓度,可

以促进重金属 Cd 由地下部分向地上部分的转移,增加了互花米草对重金属 Cd 的吸收富集作用。所以 CaCl_2 可能是一种促使互花米草吸收重金属 Cd 的增强剂。

需要说明的是,图 5 和图 6 未经 Cd 处理的 CK 组植株中也含有少量的 Cd,这可能是因为 4~5 叶期的互花米草幼苗采自受轻度 Cd 污染的滨海滩涂所致。但幼苗移回实验室后,经过 1 个月相同条件培养,在此基础上又经过幼苗生长状态的严格筛选,保证了处理前所有供试材料均处于相同的生理水平,因此早期植株体内含有微量的 Cd 不会影响整体实验效果。

研究表明,适量 CaCl_2 可以促进互花米草吸收重金属 Cd 能力,阻滞并降低游离态的有害重金属 Cd 扩散到海洋水体环境中。因此,在实践中通过适量投入 CaCl_2 的办法,可以促进互花米草对 Cd 的生物富集。多年生的地下部分通过生物富集可以起到长期固定有害重金属的效果,而地上部分的生物富集,可以在每年生长季后期通过收获法对地上部分移除并妥善处理,而达到减缓 Cd 等有害重金属对周围环境的污染。

参考文献

柴民伟,刘福春,曹迪,等. 2011. Pb 对互花米草的生理特性和 Pb 在体内积累的影响. 南开大学学报(自然科学版), **44**(6): 33-39.

陈怀满,郑春荣. 1994. 交互作用对植物生长和元素循环的影响. 土壤学进展, **22**(1): 47-49.

邓新,温璐璐,迟鑫姝. 2010. 镉对人体健康危害及防治研究进展. 中国医疗前沿, (10): 4-5.

邓自发,谢晓玲,王中生,等. 2010. 基质及水位对入侵种互花米草生长的影响. 生态学杂志, **29**(2): 256-260.

冯颖俊,孙龙仁. 2009. 重金属污染土壤的植物修复技术研究进展. 现代农业科学, **16**(2): 30-32.

黄朝表,郭水良,李海斌. 2004. 浙江金华市郊苔藓植物体内重金属离子含量测定与分析. 上海交通大学学报(农业科学版), **22**(3): 231-236.

黄益宗. 2004. 镉与磷、锌、铁、钙等元素的交互作用及其生态学效应. 生态学杂志, **23**(2): 92-97.

黄铮,徐力刚,徐南军,等. 2007. 土壤作物系统中重金属污染的植物修复技术研究现状与前景. 农业环境科学学报, **26**(增刊): 58-62.

胡坤,喻华,冯文强,等. 2011. 中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响. 生态学报, **31**(8): 2341-2348.

路畅,王英辉,杨进文. 2010. 广西铅锌矿区土壤重金属污染及优势植物筛选. 土壤通报, **41**(6): 1471-1475.

李玲. 2009. 植物生理学模块实验指导. 北京: 科学出版社.

李美如,刘鸿先,王以柔,等. 1996. 水稻幼苗冷锻炼过程中钙的作用. 作物学报, **38**(9): 735-742.

刘华. 2003. 钙对水花生耐镉毒害的影响以及镉结合蛋白的分离纯化(硕士学位论文). 南京: 南京师范大学.

马俊改,石福臣. 2011. 养分条件对互花米草表型可塑性的影响. 生态学杂志, **30**(3): 459-463.

潘秀,刘福春,柴民伟,等. 2012. 镉在互花米草中积累、转运及亚细胞的分布. 生态学杂志, **31**(3): 526-531.

史跃林,罗庆熙,刘佩瑛. 1995. Ca^{2+} 对盐胁迫下黄瓜幼苗中 CaM, MDA 含量和质膜透性的影响. 植物生理学通讯, **31**(5): 347-349.

宋正国,徐明岗,李菊梅,等. 2009. 钙对土壤镉有效性的影响及其机理. 应用生态学报, **20**(7): 1705-1710.

宋正国. 2006. 共存阳离子对土壤镉有效性影响及其机制(博士学位论文). 北京: 中国农业科学院.

苏梦云,范铭庆. 2000. 渗透胁迫和钙处理对杉木幼苗膜脂过氧化及保护酶活性的影响. 林业科学研究, **13**(4): 391-396.

汪洪,周卫,林葆. 2001. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响. 植物营养与肥料学报, **7**(1): 78-87.

肖燕,汤俊兵,安树青. 2011. 芦苇、互花米草的生长和繁殖对盐分胁迫的响应. 生态学杂志, **30**(2): 267-272.

杨根平,高向阳,荆家海. 1995. 水分胁迫下钙对大豆叶片光合作用的改善效应. 作物学报, **21**(6): 711-716.

苑泽宁,石福臣,李君剑,等. 2008. 天津滨海滩涂互花米草有性繁殖特性. 生态学杂志, **27**(9): 1537-1542.

周卫,汪洪,李春花,等. 2001. 添加碳酸钙对土壤中镉形态转化与玉米叶片镉组分的影响. 土壤学报, **38**(2): 219-225.

Choi YE, Harada E, Wada M, et al. 2001. Detoxification of cadmium in tobacco plant formation and active excretion of crystal containing cadmium and calcium through trichomes. *Planta*, **213**: 45-50.

Dong J, Wu FB, Zhang GP. 2005. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *Journal of Zhejiang University (Science B)*, **6**: 974-980.

Hinkle PM, Kinsella PA, Osterhoudt KC. 1987. Cadmium uptake and toxicity via voltage-sensitive calcium channels. *Journal of Biological Chemistry*, **262**: 16333-16337.

Marchiol L, Assolari S, Sacco P, et al. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environmental Pollution*, **132**: 21-27.

Meng W, Qin YW, Zheng BH, et al. 2008. Heavy metal pollution in Tianjin Bohai Bay, China. *Journal of Environmental*

- Sciences*, **20**: 814–819.
- Österås AH, Greger M. 2003. Accumulation of, and interactions between, calcium and heavy metals in wood and bark of *Picea abies*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **166**: 246–253.
- Pcovalah RW, Reddy ASN. 1993. Calcium and signal transduction in plants. *Critical Review of Plant Science*, **12**: 185–221.
- Perfus-Barbeoch L, Leonhardt N, Vavasseur A, *et al.* 2002. Heavy metal toxicity: Cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *The Plant Journal*, **32**: 539–548.
- Suzukia N. 2005. Alleviation by calcium of cadmium-induced root growth inhibition in *Arabidopsis* seedlings. *Plant Biotechnology*, **22**: 19–25.
- Tiwari KK, Singh NK, Patel MP, *et al.* 2011. Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **74**: 1670–1677.
- Tyler G, Olsson T. 2001. Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant and Soil*, **230**: 307–321.
- Tyler LD, McBride MB. 1982. Influence of Ca, pH and humic acid on Cd uptake. *Plant and Soil*, **64**: 259–262.
- Wang CQ, Song H. 2009. Calcium protects *Trifolium repens* L. seedlings against cadmium stress. *Plant Cell Reports*, **28**: 1341–1349.
- Windham L, Weis JS, Weis P. 2001. Lead uptake, distribution and effects in two dominant salt marsh macrophytes, *Spartina alterniflora* (cordgrass) and *Phragmites australis* (common reed). *Marine Pollution Bulletin*, **42**: 811–816.
- Zhang S, Chen M, Li T, *et al.* 2010. A newly found cadmium accumulator: *Malva sinensis* Cavan. *Journal of Hazardous Materials*, **173**: 705–709.

作者简介 何真真,女,1987年生,硕士研究生,主要从事环境与资源植物学研究。E-mail: hezhenzhen1009@126.com
责任编辑 魏中青
