

The Current Research Progress on the Plant Response to Cadmium Enriched in Soil

Qi Chen, Xiaorui Guo*

Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin
Email: xruigu@nefu.edu.cn

Received: Apr. 12th, 2014; revised: May 4th, 2014; accepted: May. 12th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The heavy metal cadmium (Cd) enriched in soil is one of the most harmful pollution issues in the whole world. The most of the research related to plant response to Cd stress mainly focus on Cd stress alone, ignoring the question that multiple kinds of heavy metals including Copper (Cu), Zinc (Zn) frequently combined with Cd in soil in the natural environment. It has brought great difficulties in governance. Here, we combine the recent research reports from the aspect of Cd harm, the resistance of plant and the interaction with other metal elements under Cd stress to make a brief summary. Then, the development and prospect in heavy metal contamination of soil research were proposed.

Keywords

Cadmium Pollution, Tolerance, Bioremediation, Research Progress

植物对土壤中镉毒害的响应研究进展

陈 琪, 郭晓瑞*

东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨
Email: xruigu@nefu.edu.cn

收稿日期: 2014年4月12日; 修回日期: 2014年5月4日; 录用日期: 2014年5月12日

*通讯作者。

摘要

在我国的重金属土壤污染中,镉(Cd)污染是危害性最大的,因此有关植物对镉胁迫的耐受性机制一直是人们研究的热点,其中多数研究主要是针对单一Cd胁迫进行的,但是在自然环境下Cd通常与铜(Cu)、锌(Zn)等其它重金属共同富集在土壤中,给重金属污染修复带来很大困难。本文主要从Cd污染的危害、植物自身抗性及Cd与其它金属元素的相互作用等方面做出了简要综述,对重金属土壤污染的研究提出了发展和展望。

关键词

镉污染, 耐受性, 生物修复, 研究进展

1. 引言

随着人类工业活动的频繁发生,在给人类带来方便快捷的同时也引起了土壤重金属污染的日趋恶化。在我国土壤污染中,Cd污染是危害性最大的[1]-[3]。Cd具有高流动性和对生物体的高毒性,被广泛认为是毒性最强的重金属之一[4]。即使在低浓度的情况下,也具有很高的潜在毒害[5],已经成为全球范围内亟待解决的问题。虽然现阶段,物理、化学等手段已经可以较好的改善Cd污染,但是它所带来的巨大副作用又会成为新的问题;植物修复作为一种新兴的绿色技术也受到环境和气候等自然条件的制约。

在对重金属的交互污染研究中发现,钙(Ca),Cu,Zn等一些金属可以通过与 Cd^{2+} 产生拮抗作用[6],从而达到金属治理金属污染的双重解决优势。但是目前对这方面的研究报道较少。

2. Cd对植物的毒害

Cd污染不仅会引起土壤功能的失调、土质的下降,还会不同程度的损害植物的生理发育,影响植株的生长代谢[7][8]:根是植物最先接触Cd污染的器官,一定浓度的Cd处理就会导致斑叶芒(*Miscanthus sinensis*)加速木质化,根尖伸长受阻,变短变粗[9];这种毒害在植株中积累到一定程度时,植物就会表现出叶片发黄、掉落、色素减少、植株早衰,最终导致植株矮小、生物量下降,以至死亡[10][11];在Cd污染环境下生长的草莓,叶绿素a和叶绿素b的含量会失衡,且净光合速率,气孔导度,蒸腾速率及胞间 CO_2 浓度的含量均显著降低,破坏光合器官的完整性,损坏植株的光合系统[5][12];Cd胁迫还能导致植株质膜过氧化,活性氧簇(ROS)积累增多,干扰电荷平衡和酶反应活性,甚至使植株凋零死亡[13][14]。

Cd主要是通过膜电位或与其它金属元素竞争的方式,迫使植物根系进行交换吸收、非代谢结合和共质体运输等途径,获得进入植物体内的机会[15]。并通过抑制植株生长点的细胞分裂,加快细胞老化,而减少植物对必需元素的吸收;侵占或取代酶活性中心及蛋白巯基,扰乱植株正常发育,毒害植物[16]。

另外,Cd还会通过植物吸收,富集而转移进入食物链危害人类的生命和健康[16]。Cd所引起的污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性,同时Cd又极易进入水体和大气,从而影响食品安全,危害生命保障。Cd元素已被联合国环境规划署列为全球性意义危害化学物质之首,所以Cd污染是我们所面临的、急需解决的首要土壤问题[17]。

3. 植物自身的抗性机制

在长期Cd胁迫的危害下,植物也产生了相应的抗性对策,以达到通过避开或耐受重金属污染而继续生存的目的。现阶段,所发现的方式主要有排斥、沉淀和螯合。

3.1. 金属排斥

金属排斥是植物抑制重金属进入其体内，或吸收后排出，或阻碍转运过程的现象。有研究表明，植物的细胞脂膜具有选择特异性，是限制 Cd^{2+} 利用跨膜运输进入细胞内的重要屏障[18]。另外，依据对耐性植物的金属吸收与代谢关系的相关性研究发现，植物的原生质膜能够利用转运器运载主动将重金属排除体外[19]。植物还会通过影响 Eh 状况、pH 变化、根系分泌物等根际环境减少植物对毒害金属物质的吸收或者中止毒害金属物质进入植物体的方式排斥金属[20]。在重金属污染的土壤中具有耐性的外生菌根会利用菌丝鞘显著提高寄主植物的重金属耐性[21]。芥菜(*Brassica juncea* L.)会将 Cd 富集在叶片表皮毛中，其含量比叶片组织高 43 倍，以避免叶肉细胞直接受到伤害[22]。Dahmani-Muller 等研究发现，植物也会采取掉落老叶的方式将重金属排除体外[23]。或者将 Cd^{2+} 富集于根系来阻止 Cd^{2+} 对植株生理发育伤害的生存策略。虽然金属排斥有效地保护了生长周期中的植物，但是从整体的土壤污染危害来讲，它的贡献是零星的。

3.2. 沉淀作用

植物对 Cd 的沉淀主要是通过细胞壁和液泡来完成的，通常被沉淀后的 Cd 会失去毒性。细胞壁是植株阻碍 Cd^{2+} 进入植物细胞的第一道屏障，通过利用细胞壁的沉淀发挥功能， Cd^{2+} 在穿过细胞壁时会部分与细胞壁上的基团结合、沉淀、络合或吸附，从而阻止了大量 Cd^{2+} 进入原生质体内，降低 Cd 毒害[24] [25]。据研究发现，大多数植物会将所吸收 Cd^{2+} 的 65%~90% 储存在根部；而根部耐受 Cd 的有效途径是液泡的区域化，植物会通过转运蛋白将 Cd 以 HMW 复合物的形式累积在液泡中，避免 Cd 与细胞器的接触[26]。Hu 等研究发现 Cd 胁迫下长柔毛委陵菜吸收的 Cd^{2+} 主要分布于根部表层和皮层等部位，而在叶片中则主要分布在表层和维管束的液泡中[27]。Isaure 等也在拟南芥叶片中发现，Cd 沉淀的主要部分是毛状体，但结合的这部分 Cd 主要是与细胞壁提供的配合体结合[28]。

3.3. 螯合作用

螯合作用是通过诱导合成金属配位体，并形成金属配位体复合物，且在器官、细胞和亚细胞水平区室化分布，来降低 Cd 的毒性。现阶段研究结果表明，主要起作用的金属螯合蛋白有金属硫蛋白(Metallothionein, MTs)和植物螯合素(Phytochelatins, PCs)；是衡量植物是否能超级累重金属的一项重要指标。它们能结合植物吸收的 Cd^{2+} 并去毒化转运至液泡储存，有效减少游离态 Cd[29]。Grill et al.等在对 10 多种植物进行 Cd 胁迫实验后得出 PCs 能结合所吸收 Cd 的 90% 之多。Grispen 等通过实验将 *AtMT1b* 在烟草内表达后，提高了植物地上部对 As 的富集能力，促进了 As 向地上部的转运[30]。在白杨树中编码 PCs 合成酶基因显著提高了其叶中 PCs 含量，提高植物抗 Cd 性能[31]。MTs 也已被证实，在重金属胁迫下被诱导表达，将其基因转入耐受性低的植物中可显著提其重金属抗性。螯合作用不仅能减少 Cd 对植株的毒害，提高耐性，而且还降低了土壤中的 Cd 通过植物向生态系统迁移的风险。

4. Cd 与其它金属的相互作用

自然界中的重金属污染主要是多元素复合污染，Cd 在与其它金属交互作用中，表现为协同、累加或拮抗等特性，其中以拮抗作用对植物的生长最为有利，研究价值最大。

4.1. Cd 与 Cu 的相互作用

Cd 在与 Cu 的复合污染中，会通过竞争吸附位点表现出拮抗效果，而相对有效降低 Cd 的富集[6]。Cu 是很多酶类的核心金属元素，外源施加 Cu 后人为的补充了这种关键元素的缺失；在吸附位点的竞争

中也更加优势化,从而提高植株的整体机能,更有利于应对 Cd 胁迫的伤害[32]。但是 Cd 和 Cu 的处理浓度会影响复合污染的作用结果,因为不同浓度的 Cd 会不同程度的改变植物体内 Cu 离子通道的饱和度和竞争力,从而影响了植物对 Cd 的吸收和富集[33]。

4.2. Cd 与 Zn 的相互作用

在 Cd 与 Zn 的复合污染土壤研究中发现, Cd 会与 Zn 竞争土壤胶体中的吸附点,释放土壤中的化合态 Zn,从而提高土壤中 Zn 的有效性,减少 Cd 进入植株体的几率[34]。Zn 作为植物体内的必需营养元素,会有效参与植物的代谢活动,维持酶反应中心结构与催化功能的完整性等植物生长发育必需活动,它的含量提高可能加强了某些与植物抗性相关的性能的提高[35]。从而,表现出与 Cd 明显的拮抗性,并有效缓解 Cd 的吸入与毒害。Zn 由于其与有机污染物的特异复合效应,完全降低 Cd 毒害特性,而越来越受到研究者的关注[35]。

4.3. Cd 与 Ca 的相互作用

Ca 与 Cd 在土壤中的相互作用,主要呈现出显著抑制吸收的拮抗作用,更好地提高了植株的耐受性,Ca 拮抗 Cd 的主要方式在地上部分,通过有效运转 Cd 到地上进行消耗或排解。Cd 与 Ca 本身就是离子通道的竞争对手,据 L. Perfus 等报道 Cd 主要是通过侵占 Ca^{2+} 通道进入植物体内的,所以 Ca 的高吸收就会抑制 Cd 的高转运[36] [37]。Cd 进入植株的多少也许是通过浓度的阈值差来决定的,所以适量的 Ca 可以作为一种很好的 Cd 抑制离子阻碍 Cd 进入植物[38]。Ca 有效降低 Cd 含量,保护植株正常生长,其作为植物细胞壁和细胞膜的主要构成成分通过保证细胞完整性来防止膜过氧化,胞质成分外渗等细胞氧化损伤,也是很重要的一个原因[39]。

5. 展望

在我国土壤污染中, Cd 污染是危害性最大的;直接干扰着生态环境的正常运转和人类的日常生活,单一的 Cd 污染处理不仅对植物毒副作用大,且在自然环境中应用价值较小。施加 Cu、Zn、Ca 等元素模拟自然状态下复合污染处理,可以通过有效提高耐受性或富集性,使植物拥有种植在超越其忍受限度的更高浓度的 Cd 污染土壤上的机会;显示了其巨大的利用植物修复手段去治理更高浓度重金属污染的潜能。且达到金属治理金属污染的双重解决优势。在改善环境土壤污染方面具有深远意义。

项目基金

感谢国家科技支撑计划课题(2012BAD21B0501)、林业公益性行业科研专项经费(20120460108)、国家林业局林业科学技术推广项目([2012]46)的资助。

参考文献 (References)

- [1] Cuypers, A., Karen, S., Jos, R., Kelly, O., Els, K., Tony, R., Nele, H., Nathalie, V., Suzy, V.S. and Frank, V.B. (2011) The cellular redox state as a modulator in cadmium and copper responses in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Journal of Plant Physiology*, **168**, 309-316.
- [2] 苏德纯, 黄焕忠 (2002) 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力. *中国环境科学*, **1**, 48-51.
- [3] 马学文, 翁焕新, 章金骏 (2011) 中国城市污泥重金属和养分的区域特性及变化. *中国环境科学*, **8**, 1306-1313.
- [4] Li, T., Yang, X., Lu, L., Islam, E. and He, Z. (2009) Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions. *Journal of Hazardous Materials*, **169**, 734-741.
- [5] Masood, A., Iqbal, N. and Khan, N.A. (2012) Role of ethylene in alleviation of cadmium-induced photosynthetic capacity inhibition by sulphur in mustard. *Plant, Cell & Environment*, **35**, 524-533.

- [6] Abboud, P. and Wilkinson, K.J. (2013) Role of metal mixtures (Ca, Cu and Pb) on Cd bioaccumulation and phytochelatin production by *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Pollution*, **179**, 33-38.
- [7] Li, T., Yang, X., Lu, L., Islam, E. and He, Z. (2009) Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions. *Journal of Hazardous Materials*, **169**, 734-741.
- [8] Matusik, J., Bajda, T. and Manecki, M. (2008) Immobilization of aqueous cadmium by addition of phosphates. *Journal of Hazardous Materials*, **152**, 1332-1339.
- [9] Belkhadi, A., Hediji, H., Abbes, Z., Nouairi, I., Barhoumi, Z., Zarrouk, M., Chaïbi, W. and Djebali, W. (2010) Effects of exogenous salicylic acid pre-treatment on cadmium toxicity and leaf lipid content in *Linum usitatissimum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **73**, 1004-1011.
- [10] Sc Gebba, F., Arduini, I., Ercoli, L. and Sebastiani, L. (2006) Cadmium effects on growth and antioxidant enzymes activities in miscanthus sinensis. *Biologia Plantarum*, **50**, 688-692.
- [11] Belkhadi, A., Hediji, H., Abbes, Z., Nouairi, I., Barhoumi, Z., Zarrouk, M., Chaïbi, W. and Djebali, W. (2010) Effects of exogenous salicylic acid pre-treatment on cadmium toxicity and leaf lipid content in *Linum usitatissimum*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **73**, 1004-1011.
- [12] Liu, C., Guo, J., Cui, Y., Lü, T., Zhang, X. and Shi, G. (2011) Effects of Cadmium and Salicylic Acid on Growth, Spectral Reflectance and Photosynthesis of Castor Bean Seedlings. *Plant and Soil*, **344**, 131-141.
- [13] Son, Y.-O., Lee, J.-C., Hitron, J.A., Pan, J., Zhang, Z. and Shi, X. (2010) Cadmium induces intracellular Ca^{2+} - and H_2O_2 -dependent apoptosis through Jnk-and P53-mediated pathways in skin epidermal cell line. *Toxicological Sciences*, **113**, 127-137.
- [14] Kabała, K., Janicka-Russak, M. and Kłobus, G. (2010) Different responses of tonoplast proton pumps in cucumber roots to cadmium and copper. *Journal of Plant Physiology*, **167**, 1328-1335.
- [15] Vangronsveld, J. and Clijsters, H. (1994) Toxic Effects of Metals. In: Farago, M.E., Ed., *Plants and the chemical elements*, VCH Publishers, New York, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 149-177.
- [16] Moya, J., Ros, R. and Picazo, I. (1993) Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. *Photosynthesis Research*, **36**, 75-80.
- [17] Niu, Z.-X., Sun, L.-N., Sun, T.-H., Li, Y.-S. and Wang, H. (2007) Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. *Journal of Environmental Sciences*, **19**, 961-967.
- [18] Sanita di Toppi, L. and Gabbriellini, R. (1999) Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, **41**, 105-130.
- [19] Nies, D.H. and Silver, S. (1989) Plasmid-determined inducible efflux is responsible for resistance to cadmium, zinc, and cobalt in *Alcaligenes eutrophus*. *Journal of Bacteriology*, **171**, 896-900.
- [20] Castiglione, S., Franchin, C., Fossati, T., Lingua, G., Torrigiani, P. and Biondi, S. (2007) High zinc concentrations reduce rooting capacity and alter metallothionein gene expression in white poplar (*Populus AlbL*. Cv. Villafranca). *Chemosphere*, **67**, 1117-1126.
- [21] Miller, H.R. (1996) Mucosal mast cells and the allergic response against nematode parasites. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, **54**, 331-336.
- [22] 张玉秀, 柴团耀, Burkard, G. (199) 植物耐重金属机理研究进展. *植物学报*, **5**, 453-457.
- [23] Dahmani-Muller, H., Van Oort, F., Gelie, B. and Balabane, M. (2000) Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter. *Environmental Pollution*, **109**, 231-238.
- [24] Cobbett, C. and Goldsbrough, P. (2002) Phytochelatin and metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, **53**, 159-182.
- [25] Dietz, K.-J., Baier, M. and Krämer, U. (1999) Free radicals and reactive oxygen species as mediators of heavy metal toxicity in plants. In: *Heavy Metal Stress in Plants*, Springer, 73-97.
- [26] Bezel, V., Zhukova, T. and Pozolotina, V. (1998) The structure of dandelion cenopopulations and specific features of heavy metal accumulation. *Russian Journal of Ecology*, **29**, 331-337.
- [27] Hu, P.J., Qiu, R.L., Senthikumar, P., et al. (2009) Tolerance, Accumulation and Distribution of Zinc and Cadmium in Hyperaccumulators Potendlla. *Environmental and Experimental Botany*, **66**, 317-325.
- [28] Isaure, M.P., Fayard, B., Sarret, G., et al. (2006) Localization and chemical forms of cadmium in plant samples by combining analytical electron microscopy and X-ray spectromicroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **61**, 1242-1252.
- [29] Küpper, H., Mijovilovich, A., Meyer-Klaucke, W. and Kroneck, P.M. (2004) Tissue- and age-dependent differences in the complexation of cadmium and zinc in the cadmium/zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (ganges ecotype)

- revealed by x-ray absorption spectroscopy. *Plant Physiology*, **134**, 748-757.
- [30] Grlsphen, V.M.J., Irllelli, B., Hakvoort, H.W.J., et al. (2009) Expression of the arabidopsis metallothionein 2b enhance sarsenite sensitivity and root to shoot translocation in tobacco. *Environmental and Experimental Botany*, **66**, 69-73.
- [31] Noctor, G., Aris, A.C., Jouanin, L., Kunert, K.J.H. and Foyer, C.H. (1998a). Glutathione: Biosynthesis, metabolism and relationship to stress tolerance explored in transformed plants. *Journal of Experimental Botany*, **49**, 623-647.
- [32] 金勇, 付庆灵, 郑进, 康薇, 刘永红, 胡红青 (2012) 超积累植物修复铜污染土壤的研究现状. *中国农业科技导报*, **4**, 93-100.
- [33] Kärenlampi, S., Schat, H., Vangronsveld, J., Verkleij, J., van der Lelie, D., Mergeay, M. and Tervahauta, A. (2000) Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soils. *Environmental Pollution*, **107**, 225-231.
- [34] 丁疆华, 舒强 (2001) 土壤环境中镉, 锌形态转化的探讨. *城市环境与城市生态*, **2**, 47-49.
- [35] 华璐, 陈世宝, 白玲玉, 韦东普 (2008) 土壤腐殖酸与~(109)Cd、~(65)Zn 及其复合存在的络合物稳定性研究. *腐植酸*, **1**, 1 p.
- [36] Perfus-Barbeoch, L., Leonhardt, N., Vavasseur, A. and Forestier, C. (2002) Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. *The Plant Journal*, **32**, 539-548.
- [37] 周卫, 汪洪 (2007) 植物钙吸收, 转运及代谢的生理和分子机制. *植物学通报*, **6**, 762-778.
- [38] Blume, B., Nürnberger, T., Nass, N. and Scheel, D. (2000) Receptor-mediated increase in cytoplasmic free calcium required for activation of pathogen defense in parsley. *The Plant Cell Online*, **12**, 1425-1440.
- [39] 张化生, 郭晓冬, 王萍 (2007) Ca^{2+} 与钙调素拮抗剂对辣椒幼苗抗冷性的影响. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, **3**, 209-212.