

# Phytoremediation Technology of Cadmium Pollution

Yanqi Li, Dongming Guan\*, Luxia Chen, Bo Yan, Shengnan Xie, Zheng Li

School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing

Email: [\\*gdm321@sina.com](mailto:gdm321@sina.com), [974223881@qq.com](mailto:974223881@qq.com)

Received: Oct. 8<sup>th</sup>, 2014; revised: Oct. 21<sup>st</sup>, 2014; accepted: Nov. 7<sup>th</sup>, 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

With the rapid development of economy, the cumulative environmental dyeing phenomenon has gradually revealed. In recent years, the serious soil pollution condition can also be compared with water pollution and air pollution. In the diversity of soil remediation technology, phytoremediation technology gradually showed its excellent place. This article simply introduced the overview of the phytoremediation of soil cadmium pollution, reviewed the cadmium enrichment plants with obvious effect in recent years, and made a prospect to the development of phytoremediation technology.

## Keywords

Phytoremediation Technology, Cadmium Pollution, Cadmium Enrichment Plants, Research Progress

---

## 镉污染植物修复技术

李彦奇, 关东明\*, 陈陆霞, 燕波, 谢胜男, 李铮

中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京

Email: [\\*gdm321@sina.com](mailto:gdm321@sina.com), [974223881@qq.com](mailto:974223881@qq.com)

收稿日期: 2014年10月8日; 修回日期: 2014年10月21日; 录用日期: 2014年11月7日

---

## 摘要

随着我国经济的飞速发展, 累积的环境污染现象已逐步显露。近几年来, 土壤污染状况的日益严重也可  
\*通讯作者。

与水污染和大气污染相提并论。在种类繁杂的土壤修复技术中，植物修复技术逐渐显露它的优异之处。本文对土壤镉污染植物修复进行了简单的介绍，综述了近几年来效果显著的镉富集植物，并对植物修复技术的发展作出展望。

## 关键词

植物修复技术，镉污染，镉富集植物，研究进展

## 1. 引言

近几十年来，随着生产力的进步与城市化建设的逐步推进，通过各种渠道引发的土壤污染状况越发严重，不仅对我们赖以生存的土地造成伤害，而且通过作物富集方式影响到人类健康的案例也数不胜数。其中镉污染对人体健康造成的损害尤为突出。下面将简单介绍植物修复对于镉污染的控制作用，并介绍近几年来逐步登上现实舞台的几种镉富集植物。

## 2. 修复矿区镉污染重要性

根据农业部环保监测系统对全国 24 个省、市 320 个严重污染区 8223 万亩土地的调查结果发现，重金属超标占污染土壤和作物的 80% [1]，其中镉污染涉及 11 个省市的 25 个地区 [2]。土壤重金属中，镉污染范围较大，分布广泛且具有较强的危险性。我国土壤中普遍存在轻、中度 Cd 污染。Cd 具有很强的毒性，是最易在人体内蓄积的有毒物质 [3]。Cd 污染不仅使土壤肥力退化，作物产量和品质下降，水环境恶化，而且通过食物链进入人体时，就会直接影响和危及人类的健康 [4]-[6]。另一方面，目前世界上 Cd 的供应远远不足 [7] [8]。因此，将镉金属自土壤中提取出来并作为资源加以利用，是镉污染修复的重要目标之一。

自然状态下，镉通常伴随锌存在，因此在矿区周边，尤其是有金属锌伴随的矿区周边通常会有镉的存在。当前，全社会对矿山废弃地生态修复的热情空前高涨，国家对废弃地生态工程建设的投资力度也大幅度提升，废弃地生态工程实施后究竟其生态效益如何，是否达到预期的目标，备受国内外各界关注。所以结合矿山废弃地生态恢复的特点，通过植物对金属镉的富集作用，进行矿区重金属污染土壤恢复的植物选择研究，对于矿山废弃地的生态修复具有重要的科学指导意义。

## 3. 植物修复

土壤重金属修复的传统方法有很多，如填埋法、稀释法、淋洗法、物理分离法、电化学法等。这些方法虽然能够有效地去除土壤中的污染物，但通常耗时较长，成本较高，受环境限制较强，因此对原地大规模修复造成诸多不便。1983 年美国科学家 Chaney 首次提出了利用能够富集重金属的植物来清除土壤重金属污染的设想，即植物修复技术 [9]。

植物修复是 20 世纪 80 年代前期提出的一项污染环境治理技术，其中最具有发展前途的作用方式是植物提取修复，即利用超积累植物对重金属的超量富集作用以去除污染土壤中超标的重金属 [10]。通过植物转移、容纳或转化环境介质中有毒有害污染物等途径，使其对环境无害，从而达到对污染环境修复与治理的目的。

有些重金属离子，如锌、铁、铜等离子是植物生长代谢必需的微量元素。植物通过吸收土壤中的有利的重金属离子来维持自身生长发育，与此同时，土壤中的重金属离子被植物吸收带走，成为不可分离状态，从而达到对土壤的净化。但过量的重金属会引起大部分植物中毒。主要表现为生长迟缓，发育异常，叶片脱落，植株衰弱甚至死亡。其中具体的情况还要根据植物的品种而定。因此寻找可以高效吸收

重金属的植物便成为植物修复的首要任务。

超积累植物(hyperaccumulator, 国内许多学者也将其翻译成超富集植物)一词最初是由 Brooks 等人提出的, 当时是指植物茎中 Ni 含量大于 1000 mg/kg(干重)的植物, 现多指能超量富集一种或几种重金属元素的植物[11]。

选用污染物富集效果突出的植物, 能在有效改善土壤质量的同时, 减少消耗的人力物力财力, 是一种结合了经济性与高效性的修复技术。尽管目前报道的超积累植物已有 400 多种[12], 但植物提取修复技术还不成熟, 其主要原因在于这些已发现的超积累植物种类单一, 修复效率比较低, 种植成本较高导致很难大规模商业应用, 因此, 超积累植物的筛选仍然是植物修复领域的基础与核心问题。

## 4. 镉污染植物修复技术

### 4.1. 镉金属超富集植物

虽然 Cd 不是植物生长的必需元素, 但是当 Cd 在环境中积累到一定高的水平时, Cd 很容易被植物的根系吸收, 并可能转运到植物的地上部分[13]。目前, 全世界已发现可富集重金属的植物约 20 科, 500 种, 其中对 Cd 污染土壤修复效果较好的超富集植物包括十字花科、禾本科在内的 10 余种植物, 可以达到 1000 mg/Kg 以上, 如天蓝褐蓝菜、叶芽阿拉伯芥、宝山堇菜、东南景天和壶瓶碎米荠等[14] [15]。

Chaney 等人[16]研究认为 Cd 超积累植物的临界含量标准是 100 mg/kg, 同时还认为超积累植物对重金属应有较强的转移能力并提出超积累植物的一个极其关键的特征是其对重金属有超强的耐性。Wenzel 等人[17]认为 Cd 超积累植物的临界含量标准应降为 50 mg/kg, 最终确定 Cd 超积累植物的临界含量标准为 100 mg/kg, 且具有较强的 Cd 耐受性。

Pence(2000)等人发现天蓝遏兰菜(*Thlaspi caerulescens*)可同时超富集锌镉两种金属。且以锌累积量 39600 mg/kg, 镉累积量 1800 mg/kg 直观表明这类植物的锌镉富集能力远远超出其他普通植物所能忍受的极限。刘威等人(2003)通过野外调查和温室试验, 发现自然条件下生长的宝山堇菜地上部平均含镉量达 1 168 mg/kg[18]。龙新宪等(2008)发现, 土壤添加重金属 Cd 后, 矿山生态型东南景天(*Sedum alfredii*)生长正常, 且地上部和根系 Cd 含量随着土壤中 Cd 含量的增加而增加, 在 400 mg/KgCd 处理下, Cd 含量分别高达 2900 mg/Kg 和 500 mg/Kg, 因此也是一种 Cd 超积累植物[19]。魏树和、周启星等认为较少富集植物培育成本, 先后在杂草中发现了蒲公英、龙葵、三叶鬼针草等多个镉超富集植物品种[20]-[22]。吴丹等人(2013)对观赏植物吊兰进行盆栽实验, 结果表明, 吊兰对重金属镉、锌、铅复合污染具有明显的修复效果, 且修复能力依次为镉>锌>铅[23]。

2006 年, 聂发辉[24]、彭克俭[25] [26]先后发现商陆和对镉的超富集作用。

通过食品中镉积累对人体造成种种危害间接表明, 许多农作物成为富集镉金属的优秀植物。王松良(2004)通过温室水培 13 个小白菜和 11 个结球甘蓝品种, 筛选出小白菜品种福绿 1 号、94-N1、日本华冠、日本冬妃、虹桥矮青和结球甘蓝品种 Ducati, Matsumo, Gideon, Invinto 可作为潜在修复土壤镉污染的植物材料[27]。曹德菊等(2004)发现, 苕麻(*Triticum aestivum*)对 Cd 的富集系数最高达 9.95[28]。Shumaker & Begonia (2005)发现冬小麦(*Triticum aestivum*)茎中可积累 26 mg/kg 的镉[29]。汤叶涛(2005)发现圆锥南芥(*Arabis paniculata* L.)具有超量富集重金属铅锌镉的能力, 是国内首次发现的铅锌镉复合重金属超富集植物[30]。作为镉的超富集污染处理植物, 是不能用于人类食品的。所以在植物修复技术实施前应先衡量该种修复植物作为修复植物的成果与作为作物的成果哪一种更具有实际操作的必要性。

#### 4.1.1. 镉污染植物修复技术

重金属污染的植物修复技术可以分为: 植物吸取技术、植物转化技术、植物挥发技术、植物稳定技

术及植物过滤技术等,但针对镉污染最常用的技术仍然是植物吸取技术。目前,微生物与植物联合修复技术在修复镉污染土壤中也得到了广泛的运用。

#### (1) 镉污染的植物吸取技术

植物吸取技术指利用对土壤中重金属具有较强的富集能力的植物,经吸收、运转将土壤中重金属转移、储存在植物根部以上部分,收获后集中处理,从而降低土壤中重金属含量的方法。该技术被视为最具发展前景的植物修复方式[31]。该技术常用的评价指标为转运系数,及地上部重金属含量与根部重金属含量的比值,用TF表示,具有 $TF > 1$ 的特征的植物几位镉超富集植物。有研究表明禾本科小麦属的冬小麦茎中可积累26 mg/Kg的镉,荨麻科苎麻属的苎麻对镉的转移系数最高达到了9.95;禾本科芦竹属的芦竹对镉污染土壤有很好的耐受力和吸收积累镉的能力,Beaupre发现在法国北部镉污染区生长的白杨镉含量高达209 mg/Kg,是森林树种中的耐性植物[32]。

与转运系数相对应,还有一个评价指标也经常用到,即富集系数(用BF表示),指地上部重金属含量与土壤中重金属含量的比值。李海军(2009)年探讨了不同植物的富集镉能力,结果表明红叶李的富集镉能力较强,富集系数达4.344,而紫叶小檗、芍药和紫丁香的富集系数为0,即地上部分不具有富集镉的能力[33]。

#### (2) 镉污染的微生物-植物联合修复技术

土壤中的某些微生物对重金属具有生物吸附、胞外沉淀、生物转化、生物累积和外排作用。因此,可以利用微生物的某些特性降低土壤中重金属的生物有效性,从而达到减缓对动植物的危害的目的。土壤中重金属Cd的去除也可以利用土壤微生物或者向污染土壤中添加高效微生物,在优化条件下将 $Cd^{2+}$ 离子还原或吸附成沉淀后再除去。目前发现的可有效降低重金属生物有效性的微生物主要有细菌、真菌、藻类微生物。肖春文等(2013)对目前已发现的吸附镉的微生物的吸附能力进行了汇总,其中细菌的吸附能力较真菌、藻类微生物强一些,芽孢杆菌最强,平均吸附率达1.90 mmol/g[34]。刘红娟等(2009)通过研究发现,蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)对Cd有较强的抗性和富集能力,其机理主要是通过细胞壁上的某些化学官能团与重金属形成络合物从而降低其有效性。

目前,单一的微生物修复技术还处于科研和实验模拟阶段,实例研究并不多。微生物修复通常还与植物修复结合在一起进行研究[35]。马文亨等(2012)通过盆栽模拟试验,研究了木霉(*Trichoderma*)对伴矿景天生长和Cd修复效率的影响。结果表明,里氏木霉(*T. reesei*)FS10-C使伴矿景天地上部干重比对照组增加了17.1%~42.5%,并显著提高伴矿景天地上部对Cd的积累[36]。刘莉华等通过人工制备镉污染培养基,从中分离筛选出2株具有较强镉耐受能力的细菌,最高镉耐受浓度达300 mg/L,并通过盆栽实验检验了2株菌对龙葵吸收土壤中镉的强化作用,结果表明2株菌对龙葵吸收镉具有显著的提升作用,且能够促进植株的生长[37]。杜瑞英等(2013)实验结果表明,土壤Cd有效态含量与微生物对碳源的利用能力呈负相关( $p < 0.05$ )。在不同水分条件处理下,土壤微生物群落对6类碳源利用能力的增强能降低土壤中Cd有效态的含量。微生物对纤维素、果胶酸、几丁质/黏多糖/糖蛋白等不同类型碳源利用能力的增强有利于植物根际环境微生物功能多样性的改善[38]。

## 5. 现状与展望

我国幅员辽阔,在广袤的土地上存在明显的地理差异。在不同土质情况下,采用不同的修复植物修复不同的污染问题,搭配复杂,限制颇多。种种不利因素使中国的植物修复道路上充满坎坷。近几十年来,植物修复技术的发展突飞猛进,但与中国如此丰富的诸多物种相比较,现已发掘的可用来修复的植物品种依然稀缺。所以,在任何时候,探索发掘新的修复植物都是发展植物修复技术的核心内容。对重金属有超富集能力的植物如何利用也成为我们在筛选超富集植物时不得不考虑的问题,其中植物通过一

系列化学、生物作用向生产新能源方向的转变值得引起我们的注意，如生产燃料乙醇、汽油、柴油等，这不仅解决了重金属污染土壤的修复问题，还可以为缓解我国的能源危机贡献微薄之力。

发展植物修复技术不能靠单一思路。现已有不少实验表明，将微生物与植物融入到植物修复技术中，对重金属污染土壤的修复起到了显著的改善作用。针对重金属污染土壤的复杂性，筛选耐多种重金属的菌株也应该成为研究的重点。随着分子生物学和转基因技术的不断发展，对不同植物和微生物的耐镉特性进行基因水平的研究，通过基因突变、基因分离、克隆等方法培育生长迅速、生物量大、富集能力强、能够迅速适应不同土壤和不同重金属种类和浓度的植株和菌株，也将成为研究的热点。这些都是值得我们去实践的新的道路，但是鉴于目前很多研究仍处于实验室阶段，因此今后的研究筛选需要更加注重实验的实用性，以推广实践为最终目的，寻求品种更多、富集效果更好的重金属富集植物和菌株。

## 参考文献 (References)

- [1] 周启星, 宋玉芳 (2004) 污染土壤修复原理与方法. 科学出版社, 北京.
- [2] Gu, J.G. and Zhou, Q.X. (2002) Clearing up through phytoremediation: A review of Cd contaminated soils. *Ecological Science*, **21**, 352-356. (In Chinese with English abstract)
- [3] 徐正浩, 沈国军, 诸常青, 徐林娟, 何勇, 俞谷松 (2006) 植物镉忍耐的分子机理. *应用生态学报*, **6**.
- [4] Luo, Y.M. (1999) Phytoremediation of soil heavy metal pollution. *Soils*, **31**, 261-265. (In Chinese)
- [5] Marlowe, M., Errera, J. and Jacobs, J. (1983) Increased lead and cadmium burdens among mentally retarded children and children with border line intelligence. *American Journal of Mental Deficiency*, **87**, 477-483.
- [6] Sugiyama, M. (1994) Role of cellular antioxidants in metal induced damage. *Cell Biology and Toxicology*, **10**, 1-22.
- [7] Dong, Y. (2004) Analyses on the cadmium need in the world. *World Non Ferrous Metals*, **4**, 37-38. (In Chinese)
- [8] Doty, S.I., Sheng, T.Q. and Wilson, A.M. (2000) Enhanced metabolism of halogenated hydrocarbons in transgenic plants containing mammalian cytochrome P4502E1. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **97**, 6287-6291.
- [9] Chaney, R.L. (1983) Plant up take of inorganic waste constituents. In: Parr, J.F., Ed., *Land Treatment of Hazardous Wastes*, NoyesData Corporation, Park Ridge, New Jersey, 50-76.
- [10] 魏树和, 周启星, 王新, 张凯松, 郭观林 (2004) 一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L). *科学通报*, **24**, 2568-2573.
- [11] Brooks, R.R., Lee, J. and Reeves, R.D. (1977) Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants. *Journal of Geochemical Exploration*, **7**, 49-77.
- [12] Brooks, R.R., Chambers, M.F., Nicks, L.J. and Robinson, B.H. (1998) Phytomining. *Trends in Plant Science*, **3**, 359-362.
- [13] Wu, F.B. and Zhang, G.P. (2003) Phytochelatin and its function in heavy metal tolerance of higher plants. *Journal of Applied Ecology*, **14**, 632-636. (In Chinese)
- [14] 彭少邦, 蔡乐, 李泗清 (2014) 土壤镉污染修复方法及生物修复研究进展. *环境与发展*, **3**, 86-90.
- [15] 易泽夫, 余杏, 吴景 (2014) 镉污染土壤修复技术研究进展. *现代农业科技*, **9**, 251-253.
- [16] Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S. and Baker, A.J. (1997) Phytoremediation of soil metals. *Current Opinion in Biotechnology*, **8**, 279-284.
- [17] Wenzel, W.W. and Jockwer, F. (1999) Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralized soils of the Austrian Alps. *Environmental Pollution*, **104**, 145-155.
- [18] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰 (2003) 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物. *科学通报*, **19**, 2046-2049.
- [19] 龙新宪, 王艳红, 刘洪彦 (2008) 不同生态型东南景天对土壤中 Cd 的生长反应及吸收积累的差异性. *植物生态学报*, **1**, 168-175.
- [20] 魏树和, 周启星, 王新, 曹伟, 任丽萍, 宋玉芳 (2003) 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选. *自然科学进展*, **12**, 1259-1265.
- [21] 魏树和, 杨传杰, 周启星 (2008) 三叶鬼针草等 7 种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征. *环境科学*, **10**, 2912-2918.

- [22] 周启星, 魏树和 (2008) 一种利用十字花科植物修复镉污染土壤的方法. 中国专利: CN200410020981.2.
- [23] 吴丹, 王友保, 胡珊, 汪楠楠 (2013) 吊兰生长对重金属镉、铅复合污染土壤修复的影响. *土壤通报*, **5**, 1245-1252.
- [24] 聂发辉 (2006) 镉超富集植物商陆及其富集效应. *生态环境*, **2**, 303-306.
- [25] Peng, K.J., Luo, C.L., You, W.X., Lian, C., Li, X. and Shen, Z. (2008) Manganese uptake and interactions with cadmium in the hyperaccumulator-*Phytolacca americana* L. *Journal of Hazardous Materials*, **154**, 674-681.
- [26] Peng, K.J., Li, X.D., Luo, C.L. and Shen, Z. (2006) Vegetation composition and heavy metal uptake by wild plants at three contaminated sites in Xiangxi area, China. *Journal of Environmental Science and Health. Part A*, **41**, 65-76.
- [27] 王松良, 郑金贵 (2004) 芸苔属蔬菜的 Cd 富集特性及其修复土壤 Cd 污染的潜力. *福建农林大学学报: 自然科学版*, **1**, 94-99.
- [28] 曹德菊, 周世杯, 项剑 (2004) 苧麻对土壤中镉的耐受和积累效应研究. *中国麻业*, **6**, 272-274.
- [29] Shumaker, K.L. and Begonia, G. (2005) Heavy metal uptake, translocation, and bioaccumulation studies of *Triticum aestivum* cultivated in contaminated dredged materials. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2**, 293-298.
- [30] 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 方晓航 (2005) 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥(*Arabis paniculata* L.). *中山大学学报: 自然科学版*, **4**, 135-136.
- [31] 毛海立, 杨波, 龙成梅, 邹洪涛, 钟才宁 (2011) 重金属镉超富集、富集植物筛选的研究进展. *黔南民族师范学院学报*, **6**, 4-9.
- [32] 谭长银, 余霞, 邓楚雄, 杨燕, 黄道友, 宓彦彦, 孙花 (2011) 镉污染土壤的植物修复剂修复植物的能源利用潜力. *低碳经济*, **8**, 52-53.
- [33] 李海军 (2009) 不同植物富集镉能力初探. *河北林业科技*, **9**, 38-39.
- [34] 肖春文, 罗秀云, 田云, 卢向阳 (2013) 重金属镉污染生物修复的研究进展. *化学与生物工程*, **8**, 1-4.
- [35] 刘红娟, 张慧, 党志, 易筱筠, 杨琛 (2009) 一株耐镉细菌的分离及其富集 Cd 的机理. *环境工程学报*, **2**, 367-371.
- [36] 马文亭, 滕应, 凌婉婷, 李振高, 吴龙华, 骆永明 (2012) 里氏木霉 FS10-C 对伴矿景天吸取修复镉污染土壤的强化作用. *土壤*, **6**, 991-995.
- [37] 刘莉华, 刘淑杰, 陈福明, 杨小龙, 杨春平, 赵晶晶, 吴秉奇 (2013) 两株镉抗性奇异变形杆菌对龙葵修复镉污染土壤的强化作用. *环境工程学报*, **10**, 4109-4115.
- [38] 杜瑞英, 唐明灯, 艾绍英, 王艳红, 李盟军, 曾招兵, 姚建武 (2013) 含水量对 Cd 污染菜地土壤中微生物多样性的影响. *安全与环境学报*, **2**, 1-4.