

# Analysis on Phytoremediation Technology of Heavy Metal Polluted Soil

Yan Xu<sup>1,2,3,4</sup>, Yike Wang<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Land and Resources of China, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi  
Email: 1213349323@qq.com

Received: May 29<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jun. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Jun. 19<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In recent years, the situation of heavy metal pollution in soil is quite serious. Phytoremediation technology has the advantages of permanently solving soil pollution, preventing soil erosion, preventing secondary pollution, improving soil, etc. As a kind of pollution control method with high ecological benefit and low cost, it has broad application prospects and strong practicality and effectiveness. The super-accumulated plants in phytoremediation have significant effects on the restoration of contaminated soil. In this paper, combined with the definition, characteristics, repair mechanism and recycling application of super-enriched plants, this paper discussed the research on the remediation of heavy metal-contaminated soil by super-enriched plants, in order to provide a theoretical basis for the super-enriched plants to repair heavy metal contaminated soil.

## Keywords

Hyperaccumulator, Soil, Heavy Metal

---

# 浅析重金属污染土壤植物修复技术

徐 艳<sup>1,2,3,4</sup>, 汪怡珂<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>国土资源部退化及未利用土地整治工程重点试验室, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

<sup>4</sup>陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

Email: 1213349323@qq.com

收稿日期: 2019年5月29日; 录用日期: 2019年6月12日; 发布日期: 2019年6月19日

## 摘要

近年来, 土壤重金属污染状况非常严峻。植物修复技术具有永久性解决土壤污染、防止水土流失、防止二次污染, 改良土壤等优势, 作为一种生态效益高、成本低的污染治理手段, 应用前景广阔, 具有较强的实用性和实效性。植物修复中超积累植物对污染土壤的修复效果较为显著, 本文结合超富集植物定义, 特点, 修复机理及回收应用等方面, 探讨超富集植物对重金属污染土壤的修复研究, 以为超富集植物修复重金属污染土壤提供一定理论依据。

## 关键词

超富集植物, 土壤, 重金属

Copyright © 2019 by author(s) 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

## 1. 引言

土壤是每个国家最有价值的自然资源之一[1]。2014年全国土壤污染调查显示土壤总超标率达16.1%, 无机污染超标点位占全部超标点位的82.8% [2]。近年来植物修复技术具有永久性解决土壤污染、防止水土流失及二次污染, 改良土壤等优势, 作为一种生态效益高、成本低的污染治理手段, 应用前景广阔, 具有较强的实用性和实效性[3] [4]。

重金属指比重大于 $5 \text{ g/cm}^3$ 的金属, (一般密度 $> 4.5 \text{ g/cm}^3$ 的金属), 环境污染中主要指汞、铬、镉、铜、铅、锌、砷、镍、硒等。因重金属无法被降解, 植物主要通过植物固定、植物提取、植物挥发和根际过滤等方式修复重金属[5] [6] [7] [8]。在不同植物中超积累植物对污染土壤的修复效果较为显著, 本文主要探讨超富集植物对重金属污染土壤的修复研究。

## 2. 超富集植物

1853年意大利植物学家Cesalpino首次发现生长在“黑色岩石”上的特殊植物, 能够超量吸收和积累重金属[9]。新西兰科学家Brooks (1977)认为超富集植物指能从土壤中超量富集重金属并能转移到地上的植物, 其吸收量超过普通植物的100倍以上且不影响自身正常生长[10]。Baker重新定义了超积累植物: 植物能富集 $\gg 1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的铜、钴、镍、铅, 铬或是大于 $10,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的锰或锌, 高于 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的金,  $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的镉, 且地上部分重金属含量大于地下部分的本地植物就称为超积累植物[11]。我国学者对超富集植物的研究也有了迅速发展, 聂发辉(2005) [12]提出了生物富集量系数这一新的评价系数, 即给定生长期单位面积地上部分植物吸收的重金属总量与土壤含量之比。

一般认为超富集植物具备以下特征: 植物地上部(茎和叶)重金属含量是普通植物在同一生长条件下的100倍; 植物地上部重金属含量大于根部该种重金属含量; 植物生长没有出现明显的受害症状且地上部富集系数大于1。另外超富集植物应具有发达的根系组织, 生长速度快, 生长周期短, 生物产量高, 能反复种植、多次收割; 在重金属重污染土壤中, 具有很强的吸收富集能力; 吸收的重金属元素可大量迁移至地上部分; 具有抗虫、抗病能力[13]。

### 3. 重金属污染土壤修复机理

土壤中重金属污染物多以难溶态存在, 只有其转化为可吸收态时才能被吸收。超富集植物通过其超强的根部重金属吸收系统, 从土壤介质中吸收和蓄积重金属。目前, 学者们的相关研究表明: 超富集植物对重金属离子的活化吸收作用, 一是通过根系分泌的有机酸如脂肪酸等强化植物根系; 二是受环境影响, 植物根系直接分泌某些金属结合蛋白与重金属螯合; 三是某些根系细胞质膜上的金属还原酶将高价重金属离子还原, 增大重金属污染物的溶解性[14]。影响超富集植物对重金属吸收的因素主要有土壤、金属离子的拮抗与协同作用以及重金属的形态等[15]。

金属离子进入根部细胞内并通过根内皮进入木质部。相较一般非超累积植物, 超富集植物可使植物体内的重金属离子更有效的从木质部向地上部以及叶片转移, 在金属搬运能力方面较为显著。

此外, 植物在受到重金属污染胁迫时, 其正常生长也会受到影响, 如发芽时间推迟, 生长滞后, 严重的甚至死亡。相较普通植物, 超富集植物对进入细胞内的重金属可通过区域化形成沉淀及螯合方式解毒[16]。研究表明, 超富集植物的表皮, 下表皮组织, 地上部亚细胞液泡等组织中有较大空间储存重金属污染物, 部分重金属与植物体内某些蛋白或多肽相结合, 形成沉淀或者结合态, 从而降低其对植物的毒害作用, 比如 Ni 超富集植物 *T.goessingense* 叶片中 Ni 主要贮存在细胞壁中, 其余以 Ni-有机酸复合物存在液泡内, 少部分以 Ni-组氨酸复合物存在细胞质中[17]; 超富集植物 *T.caerulescens* 叶片中富集的 Zn 有 48% 贮存在叶片表皮细胞的液泡中[18]。

### 4. 超富集植物的种类及回收处置

目前, 全世界已发现的重金属超富集植物有 700 多种, 已报道的铅超富集植物有 17 种, 其中印度芥菜是目前筛选出的一种生长快、生物量大的镉/铅/锌忍耐-富集型植物[16]; 已报道的锌超富集植物超过 20 种, 分布在欧洲和澳大利亚等, 我国杨肖娥等[19]发现东南景天可以富集锌并且具有无性繁殖、生长快、适于收割的特点; 铬超富集植物目前报道的仅有 3 种, 包括张学洪等[20]发现的李氏禾叶片内平均铬含量达  $1786.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 不仅对铬富集能力强, 而且生长快、适应性强。另外两种是在津巴布韦发现的尼科菊和线蓬, 其铬含量分别为  $1500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $2400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 砷超富集植物已发现 10 多种, 蜈蚣草是第一种被发现砷超富集植物, 地上部积累的砷可达  $22.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。目前已报道的金属和重金属超富集植物见表 1 [21]。

**Table 1.** Classification of hyperaccumulator [21]

**表 1.** 超富集植物分类[21]

重金属	超富集植物
铅(Pb)	印度芥菜、羊茅、普通芥麦、白莲蒿、圆锥南芥、羽叶鬼针草、圆叶无心菜、肾蕨、马蔺等
镉(Cd)	壶瓶碎米荠、金边吊兰、蜀葵、龙葵、三叶鬼针草、商陆等
铜(Cu)	荸荠、海洲香薷、蓖麻、鸭跖草、密毛蕨等
铬(Cr)	狼尾草、李氏禾、假稻、扁穗牛鞭草
砷(As)	粉叶蕨、蜈蚣草、大虎杖、凤尾草、大叶井口边草
锌(Zn)	常柔毛委陵菜、圆锥南芥、叶芽阿拉伯芥、东南景天

植物对土壤中重金属污染物的吸收、代谢和积累过程也是一个动态过程。随着植物生长周期的延长, 生物量的增加, 植物修复结束后, 如何对其进行处置也是植物修复中非常重要的问题。目前对超富集植物修复后的处置方法有焚烧法、堆肥法、填埋法、液相萃取法、高温分解法和灰化法等[22], 这些方法可

减少部分修复植物的数量, 优化资源得到循环利用, 但同时也存在填埋法占用土地资源、液相萃取和高温分解法应用成本高, 焚烧、堆肥和灰化法易造成二次污染等问题[23]。

鉴于此, 学者们建议可根据修复植物的不同类型, 生长周期等动态监测不同植物在不同生长阶段, 其不同组织器官对重金属的吸附量变化。通过对植物富集重金属的吸附量及饱和时间进行研究, 可以定量评价不同类型植物不同部位对重金属污染物的富集能力, 修复周期进而确定修复植物的收割及处置方式。为避免超富集植物对环境造成的“二次污染”, 需对其进行妥善处理。Yan 等[24]研究发现焚烧可明显减少 As 超富集植物蜈蚣草的体积和重量, 800℃时, 样品重量可减少 94%, 同时温度增加, As 的挥发也会增加, 可对挥发气体进行回收处置。Hetland 等[25]在实验室环境下, 将修复 Pb 的向日葵进行粉碎堆肥处理发现, 堆肥中产生的可溶性有机物能促进 Pb 的溶解。据此可在堆肥处理中添加一些改良剂如天然沸石、石灰、硫化钠、竹醋液等固化活性态的重金属, 降低其生物有效性[26]。

## 5. 存在问题及发展趋势

超富集植物对重金属污染物具有极强耐性, 但大多为野生草本植物, 地上部生物量小, 生长较为缓慢且周期较长, 单位时间内其富集及转移的重金属数量非常有限。此外作为野生植物, 其农艺性状及耕作方式不好把控, 因此应用超积累植物修复重金属污染土壤时, 存在修复周期长, 效率低等缺点。未来研究可以基因工程为载体, 将促进植物生物量增大, 生长加快和周期缩短的基因转移到超富集植物中以缩短修复周期, 提高修复效率。同时可围绕耐重金属和超富集植物及其根际微生物共存体系开展, 一方面不仅可以更好地揭示超富集植物耐重金属胁迫的机理, 另一方面可将植物及其共生的根际微生物联合起来, 共同修复土壤中的重金属污染物, 提高修复效率。此外对超富集植物体内重金属的回收再利用问题有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 陈小慧, 何威明, 王春, 等. 3 种污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 中国农技推广, 2016, 32(2): 43-46.
- [2] 陈玉成. 污染环境生物修复工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [3] 何翔, 吴海. 生物修复技术在重金属污染治理中的应用[J]. 化学通报, 2005(1): 36-42.
- [4] 侯晓龙, 常青山, 刘国锋, 等. 超富集植物金丝草、柳叶箬[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 989-994.
- [5] 贾永霞, 张春梅, 方继宇, 等. 细叶百日草对镉的生长响应及富集特征研究[J]. 核农学报, 2015, 29(8): 1577-1582.
- [6] 李翠兰, 邵泽强, 王玉军, 等. 几种花卉植物对铅富集特征的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 127-130.
- [7] 李硕, 刘云国, 李永丽, 等. 水葱对镉的超富集作用及其用于植物修复的潜力[J]. 广西植物, 2007, 27(2): 180-185.
- [8] 李思雯. DDT 污染土壤植物修复技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2016.
- [9] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, 21(3): 559-563.
- [10] 周际海, 黄荣霞, 樊后保. 污染土壤修复技术研究进展[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 367-370.
- [11] 王庆仁, 崔岩山, 董艺婷. 植物修复重金属污染土壤整治有效途径[J]. 生态学报, 2001, 21(2): 326-331.
- [12] 聂发辉. 关于超富集植物的理解[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138.
- [13] 孙磊. 土壤重金属污染的植物修复研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [14] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 794-798.
- [15] 戴媛, 谭晓荣, 冷进松. 超富集植物修复重金属污染的机制与影响因素田[J]. 河南农业科学, 2007(4): 10-13.
- [16] 孙涛, 张玉秀, 柴团耀. 印度芥菜(*Brassica juncea* L.)重金属耐性机理研究进展[J]. 中国生态农业报, 2011, 19(1): 227-228.
- [17] Kramer, U., Pickering, I.J., Princer, C., et al. (2000) Subcellular Localization and Speciation of Nickel Hyperaccumu-

- lator and Non-Accumulator Thlaspi Species. *Plant Physiology*, **122**, 1343-1353. <https://doi.org/10.1104/pp.122.4.1343>
- [18] Zhao, H., Butler, E., Rodgers, J., *et al.* (1998) Regulation of Zinhomeostasis in Yeast by Binding of the ZAP1 Transcriptional Activator to Zinc Responsive Promoter Elements. *The Journal of Biological Chemistry*, **273**, 28713-28720. <https://doi.org/10.1074/jbc.273.44.28713>
- [19] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟, 等. 东南景天一种新的锌超积累植物[J]. 科学通报, 2002, 47(13): 1003-1006.
- [20] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 一种新发现的湿生铬超积累植物-李氏禾[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 950-953.
- [21] 石润, 吴晓芙, 李芸, 等. 应用于重金属污染土壤植物修复中的植物种类[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(4): 140-141.
- [22] 杜博涛, 李华翔, 苏绘梦, 等. 土壤重金属污染的植物修复技术综述[J]. 湖南生态科学学报, 2016, 3(2): 33-36.
- [23] 郭彬, 李许明, 陈柳燕, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(33): 1077-1078.
- [24] Yan, X.L., Chen, T.B., Liao, X.Y., *et al.* (2008) Arsenic Transformation and Volatilization during Incineration of the Hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental Science & Technology*, **42**, 1479-1484. <https://doi.org/10.1021/es0717459>
- [25] Hetland, M.D., Gallagher, J.R., Daly, D., *et al.* (2001) Processing of Plants Used to Phytoremediate Lead-Contaminated Sites. *The 6th International in Situ and On-Site Bioremediation Symposium*, San Diego, 4-7 June 2001, 129-136.
- [26] Singh, J. and Kalamdhad, A.S. (2012) Reduction of Heavy Metals during Composting: A Review. *International Journal of Environmental Protection*, **2**, 36-43.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2334-3338, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojswc@hanspub.org](mailto:ojswc@hanspub.org)